Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 http://naukovedenie.ru/

Том 8, №3 (2016) http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol8-3

URL статьи: http://naukovedenie.ru/PDF/24TVN316.pdf

Статья опубликована 30.05.2016.

Ссылка для цитирования этой статьи:
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 // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №3 (2016) http://naukovedenie.ru/PDF/24TVN316.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 624.042

Овчинников Илья Игоревич
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов[1]
ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»
Филиал в г. Сочи, Россия, Сочи
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: bridgeart@mail.ru

Овчинников Игорь Георгиевич
ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», Россия, Пенза
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Россия, Саратов
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, Пермь
Доктор технических наук, профессор
E-mail: bridgesar@mail.ru

Чесноков Георгий Владимирович
АО «НИИграфит» предприятие Госкорпорации «Росатом», Россия, Москва
Отдел строительных проектов
Руководитель проекта
E-mail: gchesnokov@niigrafit.org

Михалдыкин Евгений Сергеевич
«НИИграфит» предприятие Госкорпорации «Росатом», Россия, Москва
Отдел строительных проектов
Главный инженер по строительству
E-mail: emihaldikin@niigrafit.org

Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами. Часть 1. Отечественные эксперименты при статическом нагружении

Аннотация. Рассматривается проблема сбора, анализа и систематизации экспериментальной информации об испытаниях железобетонных конструкций, усиленных полимерными композиционными материалами. Отмечается, что эти данные разбросаны по большому количеству публикаций, что затрудняет их использование. Поэтому создание баз данных по результатам экспериментальных исследований усиленных конструкций – важная

[1] 410054, Саратов, Политехническая 77

задача. По этой проблеме написано на русском языке всего 3 книги, причем две из них по результатам зарубежных исследований. Отмечается, что в подавляющем большинстве остальных публикаций излагаются общие представления об усилении железобетонных конструкций с помощью полимерных композитных материалов, технология наклеивания композитов, в ряде работ приводится описание методик расчета усиливаемых композитными материалами железобетонных конструкций по методу предельных состояний без обоснования. Далее рассматриваются результаты отечественных экспериментов по поведению усиленных полимерными композитными материалами железобетонных конструкций при статическом нагружении.

Делается вывод, что во многих отечественных публикациях приводится не всегда полная и систематизированная информация о деформировании железобетонных конструкций, усиленных полимерными композиционными материалами, об условиях испытания, а только данные о величине разрушающих нагрузок для некоторых схем усиления. Затем приводятся результаты ряда корректных экспериментов по исследованию поведения усиленных железобетонных конструкций, с анализом, который отличается от проделанного авторами экспериментальных исследований.

Ключевые слова: железобетонные балки; колонны; усиление; фиброармированный пластик; углепластик; композит; статическое нагружение; экспериментальные исследования

Введение

При решении задачи усиления элементов железобетонных конструкций, поврежденных в процессе эксплуатации, с использованием полимерных композитных материалов приходится иметь дело с ресурсами двух видов.

К ресурсам первого вида относятся материалы, энергия, время. Эти ресурсы обладают свойством убывать по мере их использования.

К ресурсам второго вида относятся знания, информация. Эти ресурсы с течением времени не убывают, а могут даже увеличиваться в процессе их использования.

Понятно, что чем разумнее, эффективнее организована работа, тем меньше при ее выполнении используются ресурсы первого вида и больше ресурсы второго вида.

При этом, эффективно используя ресурсы второго вида, можно добиться значительной экономии ресурсов первого вида. Но для этого нужно правильно организовать, систематизировать, сделать пригодными для использования ресурсы второго вида.

Информация о полимерных композиционных материалах и их применении, как для создания новых конструкций и их элементов, так и для усиления существующих конструкций, поврежденных в процессе эксплуатации, разбросана по большому числу источников, включая книги, диссертации, научные журналы, сборники трудов и докладов на конференциях, статьи, отчеты справочники, стандарты организаций, рекомендации и так далее. Причем объем этой информации с каждым годом растет чрезвычайно быстро, поэтому процедура поиска и последующего анализа теоретических и особенно экспериментальных данных, описывающих поведение конструкций и их элементов, как в процессе, так и после усиления полимерными композиционными материалами является весьма трудоемкой и продолжительной. Ситуация тем более усложняется, что данные по одному и тому же вопросу приходится собирать в различных по характеру, объему, полноте описания и срокам выхода публикациях.

Необъятность области поиска давно уже повлекла за собой применение компьютерных информационных технологий для хранения и поиска информации. Разработаны и

применяются информационные системы, ставшие обширными базами знаний, помогающими исследователям в решении их задач.

Ясно, однако, что создание большой системы хранения и поиска необходимой исследователю информации - задача гигантской сложности, тем более, что возможность настроить ее на любого пользователя с учетом его интересов представляется труднореализуемой. Более того, такая система никогда не будет завершена, ибо она должна регулярно пополняться вновь добываемой информацией.

Поэтому, более разумным представляется использование опыта, знаний и интуиции исследователя для разработки структуры и создания баз данных, содержащих информацию об интересующей исследователя области сведений и обеспечивающей быстрый доступ к необходимым разделам.

Базы данных в этом случае являются как бы некоторыми информационными моделями, описывающими интересующий исследователя набор данных и отражающими его личный опыт, знания, интересы и пристрастия. Это справедливо, ибо при построении модели обычно стремятся оставить главные, существенные черты, отбросив второстепенные (по отношению к рассматриваемой проблеме).

Наш опыт проведения исследований в области применения полимерных композиционных материалов для усиления железобетонных и других конструкций [1 - 8] показал, что в этой относительно узкой области, накоплен определенный объем экспериментальной и теоретической информации, систематизация и анализ которой позволит оценить достигнутый уровень решения проблемы, тем более что русскоязычных книг, содержащих достаточно полную информацию по рассматриваемому вопросу не так уж и много [9 - 11], а написание их практически никем не стимулируется.

Книги [9, 10] содержат похожий материал и в них «изложены основы проектирования и технологии усиления железобетонных конструкций современными композиционными материалами на основе углеродных, арамидных и стекловолокон. Даны основные положения по проектированию усиления изгибаемых железобетонных конструкций по первой и второй группам предельных состояний. Приведена технология усиления железобетонных конструкций композиционными материалами нового поколения. Рассмотрены …требования по обязательному мониторингу усиливаемой конструкции».

Книга [11] как отмечают авторы, «содержит научные основы по усилению строительных конструкций композитами на основе углеволокна. Приведены принципы усиления различных конструкций. Большое место отведено примерам реального усиления строительных объектов. Рассмотрены особенности механического поведения и механизмов разрушения композитов».

Справедливости ради следует отметить, что в подавляющем большинстве публикаций излагаются общие представления об усилении железобетонных конструкций с помощью полимерных композитных материалов, излагается с некоторыми нюансами технология наклеивания композитов, в ряде работ приводится описание методики расчета усиливаемых композитными материалами железобетонных конструкций по методу предельных состояний, причем делается это практически без какого-либо обоснования применимости этой методики, по принципу – ведь рассчитывали же железобетонные конструкции по этой методике раньше, и почему же она должна плохо работать и при расчете железобетонных конструкций, усиливаемых полимерными композитными материалами.

Весьма мало исследований долговечности усиленных полимерными композитными материалами железобетонных конструкций, то есть повторяются те же ошибки, которые были сделаны в эпоху интенсивного применения железобетона, когда считали, что он вечный

материал и потому ремонт и замена железобетонных конструкций не потребуется вовсе или потребуется не скоро.

При изложении основного материала мы постараемся придерживаться следующего разделения экспериментальных исследований по группам:

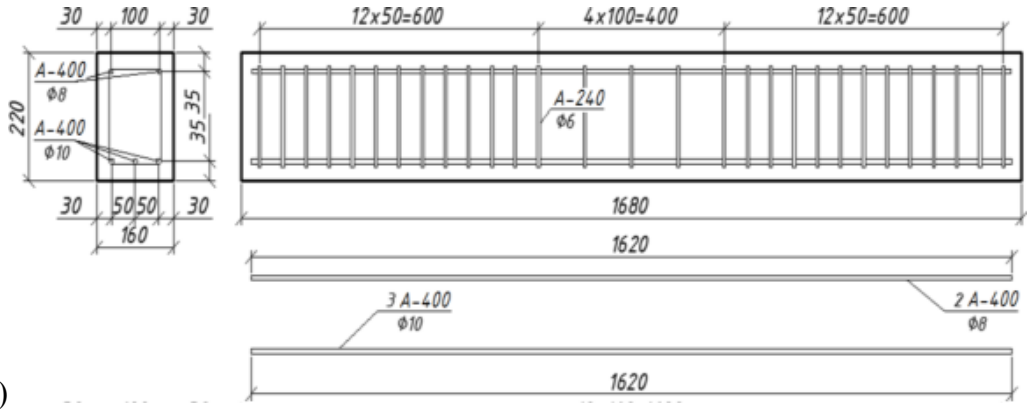
- эксперименты при статическом нагружении;
- экспериментальные исследования влияния температуры;
- экспериментальные исследования влияния агрессивных сред, физических полей;
- длительные экспериментальные исследования (выносливость, ползучесть, длительная прочность);
- экспериментальные исследования при режимном или динамическом нагружении.

Эксперименты при статическом нагружении

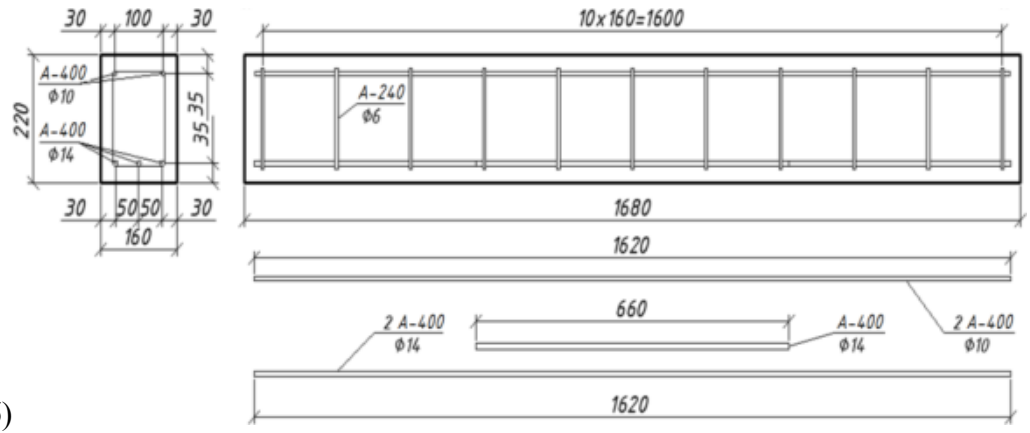
Отметим, что экспериментальные исследования работы изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных композитными материалами интенсивно проводились и проводятся в научно-исследовательской лаборатории «Мосты» Сибирского государственного университета путей сообщения коллективом исследователей (Смердов Д.Н., Устинов В.П., Яшнов А.Н., Неровных, А.А.) под руководством профессора Бокарева С.А. [12 - 18].

Часть результатов этих исследований рассмотрена в статье [16], а их анализ проведен в статье [1], поэтому здесь мы их приводить не будем.

В работе А.А. Неровных [19] описаны эксперименты по изучению поведения двух групп железобетонных балок с различной схемой армирования (рис. 1), причем для изготовления балок применялся бетон класса В30 и арматура А-400 и А-240.



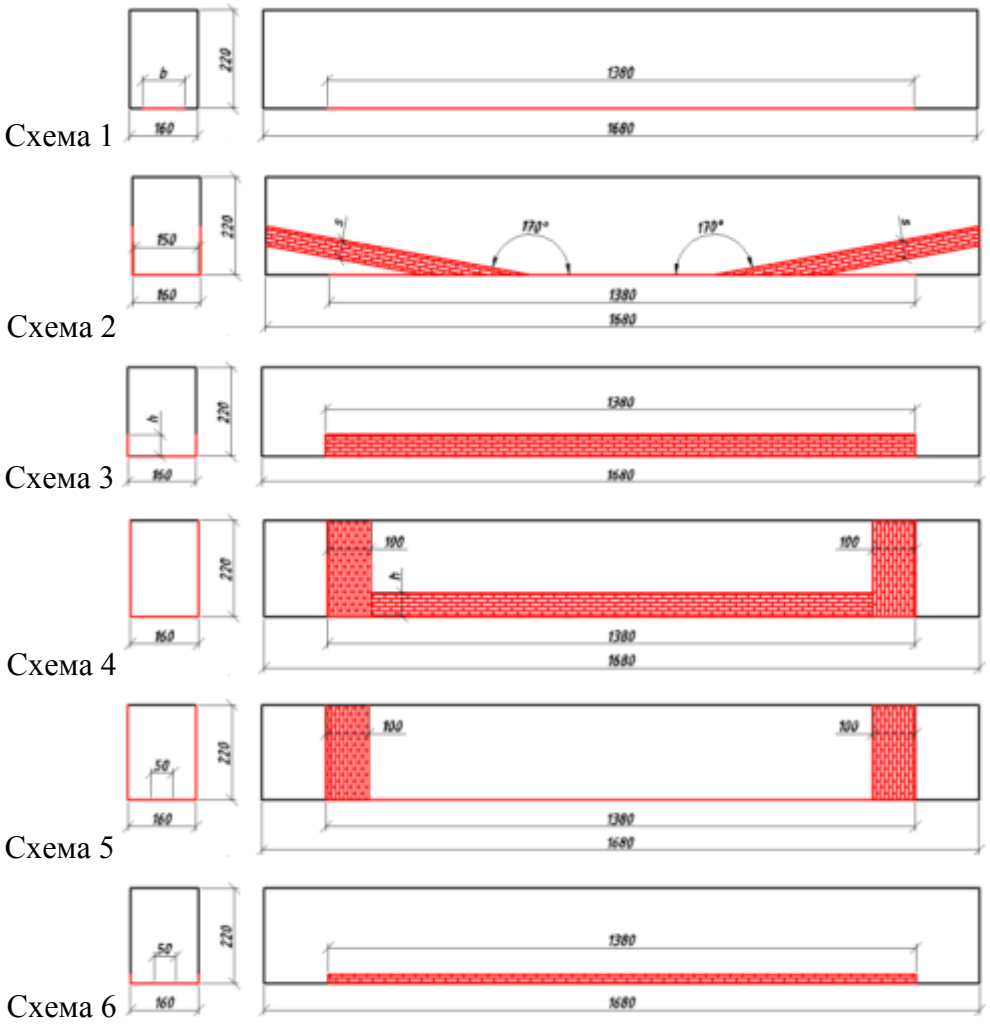
а)



б)

Рисунок 1. *Размеры и схема армирования испытываемых балок типа А (а) и типа Б (б) (источник [19])*

Усиление балок производилось с помощью системы внешнего армирования MBrace (производство концерна BASF) и системы FibARM (производство ЗАО «ХК «Композит»). Испытания производились по схеме четырехточечного изгиба, причем нагрузка на балку передавалась через траверсу с расстоянием между точками нагружения 500 мм, а опирание балок производилось с помощью металлических балансиров, установленных на каретках прессов. Испытанию на изгиб подвергались 16 серий образцов типа «А» и 9 серий образцов типа «Б», с различными схемами усиления (рис. 2):



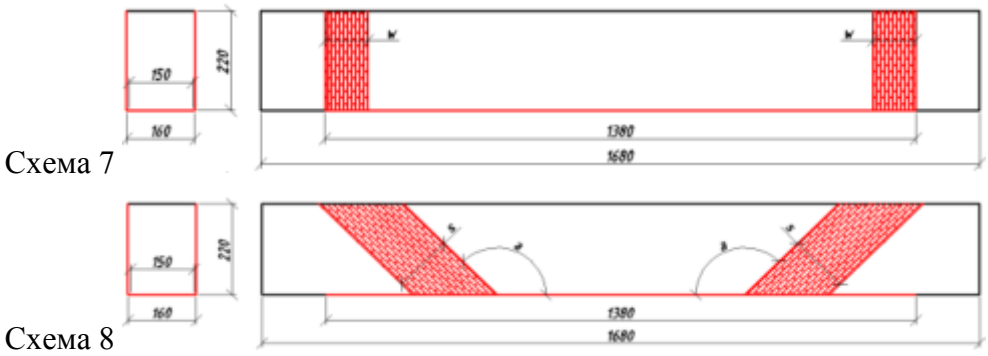


Рисунок 2. *Различные схемы усиления железобетонных балок (источник [19])*

1) в группу со схемой усиления 1 вошли 4 серии балок типа «А», у которых усиливающие полосы холста наклеивались на нижнюю грань балок;

2) в группу со схемой усиления 2 вошли 2 серии балок с усилением полосой холста шириной 150 мм на нижней грани и с хомутами различной ширины, расположенными в приопорных участках балок под углом 10° к продольной оси;

3) в группу со схемой усиления 3 вошли 3 серии балок, усиленных U-образной обоймой из холста различной толщины с различной высотой заведения на боковые грани балок;

4) в группу со схемой усиления 4 вошли две серии балок, усиленных U-образной обоймой, которая дополнительно закреплялась в приопорных участках вертикальными хомутами шириной 100 мм;

5) в группу со схемой усиления 5 вошли 3 серии балок, усиленных по нижней грани уже ламелями различной прочности, которые были дополнительно закреплены в приопорных участках вертикальными хомутами шириной 100 мм; образцы, усиленные U-образной обоймой;

6) в группу со схемой усиления 6 вошли балки, усиленные U-образной обоймой, наклеенной поверх полосы;

7) в группу со схемой усиления 7 вошли четыре серии образцов типа «Б», усиленных по нижней грани полосой холста шириной 150 мм грани, закрепленной вертикальными хомутами различной ширины;

8) в группу со схемой усиления 8 вошли четыре серии образцов типа «Б», усиленных по нижней грани полосой холста шириной 150 мм грани, закрепленной уже наклонными хомутами различной ширины.

Для измерения деформаций бетона и усиливающих элементов из полимерного композиционного материала использовались съемные деформометры с электронными индикаторами с ценой деления 0,001 мм, установленные на базе 500 мм, и тензометрические датчики деформаций, установленные на базе 62 мм.

Для измерения прогибов в середине пролета балок использовались электронный индикатор с ценой деления 0,01 мм и тензометрический датчика перемещений.

Для измерения величины местного обжатия в местах опирания балок использовались такие же электронные индикаторы с ценой деления 0,01 мм.

Для измерения величины нагрузки на балку использовался тензодинамометр, а также измерения по шкале пресса WPM-300 (рис. 3). Съем информации с тензодатчиков и ее обработка производились малогабаритным измерительным комплексом «Тензор-МС».

При статических испытаниях нагружение балок производилось поэтапно, с шагом в 1 т, при этом скорость нагружения в среднем составляла в 500 кг/мин.

Рисунок 3. *Испытательный пресс WPM-300 с установленной на нем балкой (источник [19])*

Перед началом испытаний усиленных балок были проведены контрольные испытания не усиленных железобетонных балок, в результате которых несущая способность балок типа «А» оказалась равна 8,17 тс, а балок типа «Б» - 15,17 тс. Ниже в таблице 1 приведено увеличение в процентном отношении несущей способности усиленных балок при разных схемах усиления.

Таблица 1

Увеличение несущей способности балок в зависимости от схемы усиления (составлено авторами на основе данных [19])

Номер схемы усиления	1	2	3	4	5	6
Процент усиления по отношению к не усиленной балке	64	130	152	184	106	140

Увеличение несущей способности по прочности наклонного сечения для балок со схемой усиления 7 составило 33%, а со схемой усиления 8 – 55%.

В работах ростовской научной школы под руководством Д.Р. Маиляна и П.П. Польского, проводятся определенные исследования прочности и деформативности железобетонных конструкций, усиливаемых полимерными композиционными материалами [20 - 25]. Однако анализ доступных авторам публикаций показал, что в них приводится не всегда полная и систематизированная информация о деформировании железобетонных конструкций, усиленных полимерными композиционными материалами, а только данные о величине предельных разрушающих нагрузок для разных схем усиления композитами. И

потому использовать результаты экспериментальных исследований этой научной школы могут только ее члены, так как в доступной литературе систематизированных данных обнаружить не удалось.

Аналогичное высказывание можно сделать и по работам С.В. Клюева с соавторами [26-31], в которых либо рассматривается предельное поведение усиленных полимерными композиционными материалами конструкций, либо рассматривается технология усиления или расчет усиленных конструкций. Детального же описания проведенных экспериментов не приводится.

В работах Гапонова В.В. [32, 33, 34], выполненных под научным руководством Шилина А.А., проведены эксперименты по исследованию поведения балочных и плитных конструкций, усиленных сетками из углеродных волокон в связующем на минеральной основе.

Для испытаний использовались 18 железобетонных балок сечением 120*140 мм, длиной 1550 мм, из бетона марки 200, армированных двумя стержнями ∅5 мм класса Вр-1. В качестве внешнего армирования использовалась углеродная сетка с поверхностной плотностью в продольном направлении 400 г/кв. м. Углеродная сетка размещалась по всей ширине (120 мм) нижней поверхности балок с заходом на боковые поверхности. Варианты расположения армирующей сетки по длине балок и по их контуру показаны на рис. 4 и 5.

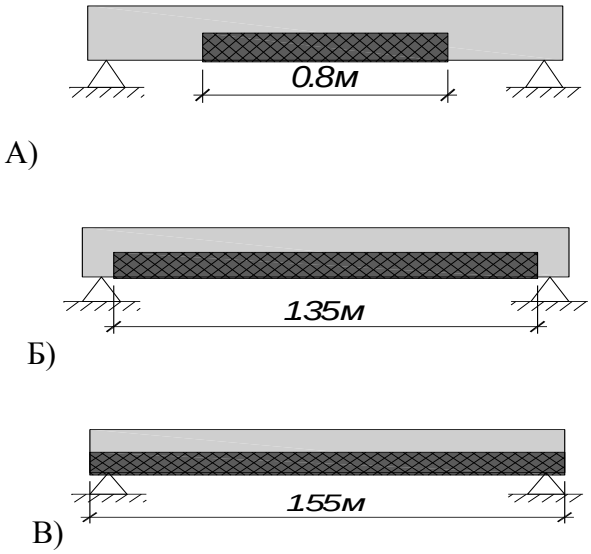


Рисунок 4. *Размещение усиливающей сетки по длине балки (источник [34])*

Рисунок 5. *Расположение усиливающей сетки по контуру сечения балок (источник [34])*

Перед усилением поверхность бетона обрабатывалась металлической щеткой и промывалась водой под давлением. Затем на усиливаемую поверхность наносился слой раствора толщиной 5-7 мм, в который втапливалась углеродная сетка, предварительно покрытая низковязким эпоксидным составом для обеспечения сцепления. Загружение балок производилось по четырехточечной схеме с приложением нагрузки в третях пролета.

Для создания нагрузки использовался гидравлический пресс, причем величина нагрузки фиксировалась манометром, для измерения прогибов балок использовались прогибомеры с ценой деления 0,1 мм, расположенные в середине и в третях балок, деформации бетона измерялись тензорезисторами. Разрушающая нагрузка для не усиленных балок составила 700 кг, при длине усиления 0,8 м для усиленных одним слоем сетки 900 кг, а двумя слоями – 1000 кг. Причем если разрушение не усиленных балок происходило по нормальным к продольной оси сечениям, то разрушение усиленных балок – по наклонным сечениям. При увеличении длины усиления до 1,35 м разрушающая нагрузка в случае одного слоя сетки составила 1900 кг, а в случае двух слоев – 2200 кг. Интересно, что если перед втапливанием сетки она не пропитывалась эпоксидным раствором, то разрушающая нагрузка оказывалась меньше и составляла 1050 кг при одном слое сетки.

Также в экспериментах было установлено, что использование для усиления двух слоев сетки разной длины (первый слой – 1,35 м и второй слой 0,8 м) приводило к такому же эффекту, что и использование двух слоев, каждый длиной 1,35 м. Влияние количества слоев усиления и длины усиливающего элемента на величину разрушающей нагрузки на балки иллюстрируется рис. 6 и 7.

В процессе испытаний был реализован случай, когда усиливающие элементы (накладки) располагались по всей длине нижней грани балки длиной 1.55 м и опирание балок на опоры происходило через эти накладки. В этом случае величина разрушающей нагрузки оказалась равной 4300 кг, что значительно больше, чем в случае опирания не через усиливающие накладки (2200 кг). Причина такого значительного увеличения разрушающей нагрузки кроется в том, что балка по сути дела опиралась на ленту из усиливающего материалы, которая работала на растяжение и играла роль шпренгельной системы. Рисунок 8 иллюстрирует разрушение балки в этом случае, которое наступало с результате образования нормальной к оси балки трещины и последующего отслоения усиливающей накладки.

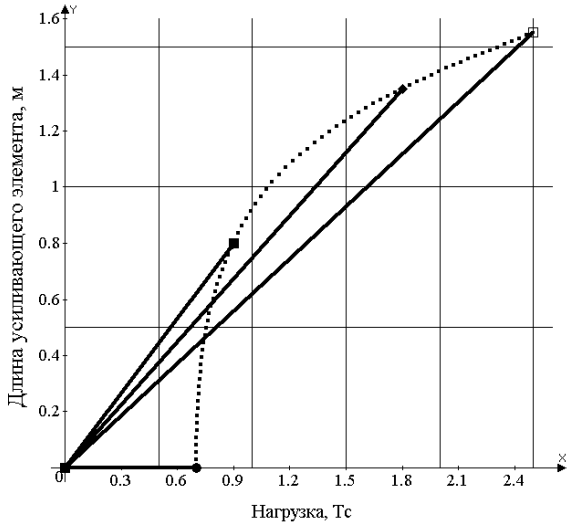


Рисунок 6. *Усиление балок по схеме U в один слой (источник [34])*

Длина элемента усиления 0,8 м
Длина элемента усиления 1,35 м
Длина элемента усиления 1,55 м
Без усиления

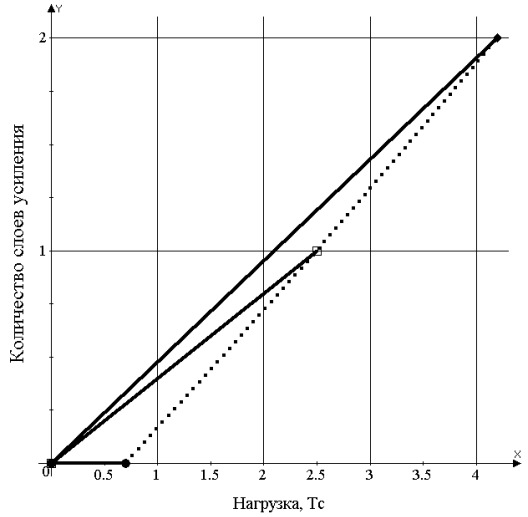


Рисунок 7. *Усиление балок по схеме U длиной 1,55 м (источник [34])*

Усиление в два слоя
Усиление в один слой
Без усиления

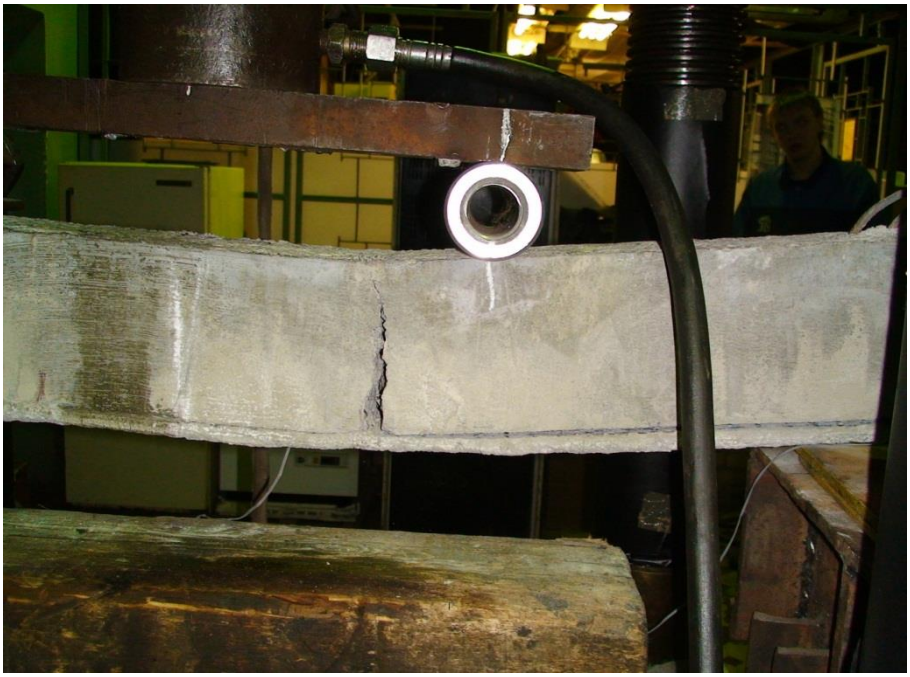


Рисунок 8. *Разрушение балки, усиленной углеродной сеткой длиной 1,55 м (источник [34])*

Недостатком данных испытаний, да и испытаний, проведенных в Сибирском государственном университете путей сообщения, является то, что реальных условиях усилению подлежат поврежденные железобетонные конструкции, которые предварительно доводятся до нужной геометрии специальными растворами, и наклейка усиливающих элементов производится не на здоровый бетон, а на слой раствора, выравнивающего поврежденную поверхность.

В какой-то мере проверкой может служить программа испытаний, реализованная В.В. Гапоновым [34]. В этих испытаниях железобетонная балка нагружалась до появления в ней силовых трещин, затем балка разгружалась, и образовавшиеся трещины залечивались инъектированием эпоксидного состава низкой вязкости. После этого производилось усиление балки путем наклейки одного слоя углеродной сетки на длине 1,35 м. Залеченная и усиленная таким образом балка нагружалась до разрушения. При этом оказалось, что трещины начинали образовываться в третях пролета, причем имели наклонную ориентацию, а отслоение усиливающей накладки происходило по направлению к опорам балки. Разрушающая нагрузка оказалась равной 2000 кг, что превышает разрушающую нагрузку 1900 кг при испытаниях балки одноступенчатым нагружением. Систематизированные результаты испытаний железобетонных балок, не усиленных и усиленных сеткой их углеродных волокон, втапливамой в слой раствора, наносимого на усиливаемую грань приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты испытаний изгибаемой балки с различными схемами усиления (составлено авторами на основе данных [34])

Вид усиления балки	Длина усиливающего слоя, м	Вид усиления		Наличие предварительной пропитки сетки в эпоксидном составе	Разрушающая нагрузка, кг
		L – образное (рис. 5 слева)	U – образное (рис. 5 справа)		
Без усиления	-	-	-	-	700
Без усиления	-	-	-	-	680

Вид усиления балки	Длина усиливающего слоя, м	Вид усиления		Наличие предварительной пропитки сетки в эпоксидном составе	Разрушающая нагрузка, кг
		L – образное (рис. 5 слева)	U – образное (рис. 5 справа)		
Усиление одним слоем сетки	0,8	да	-	да	900
Усиление двумя слоями сетки	0,8	да	-	да	1000
Усиление одним слоем сетки	1,35	да	-	да	1900
Усиление двумя слоями сетки	1,35	да	-	да	2200
Усиление одним слоем сетки	1,35+0,8	да	-	-	1050
Усиление двумя слоями сетки	1,35	да	-	да	1800
Усиление 1-м слоем сетки (после инъектирования трещин)	1,35	да	-	да	2300
Усиление 1-м слоем сетки (с защемлением на опорах)	1,55	-	да	да	2500
Усиление 2-мя слоями сетки (с защемлением на опорах)	1,55	-	да	да	4200

В работе [35] приведены результаты испытаний железобетонных колонн при усилении их холстами на основе углеродных волокон FibARM Tape 530/300 и ламелями FibARM Lamel 14/100. Высота колонн 2500 мм, сечение квадратное со стороной 250 мм. Класс бетона по прочности не менее В20, морозостойкости F300 и по водонепроницаемости W6. Схема армирования колонн показана на рисунке 9.

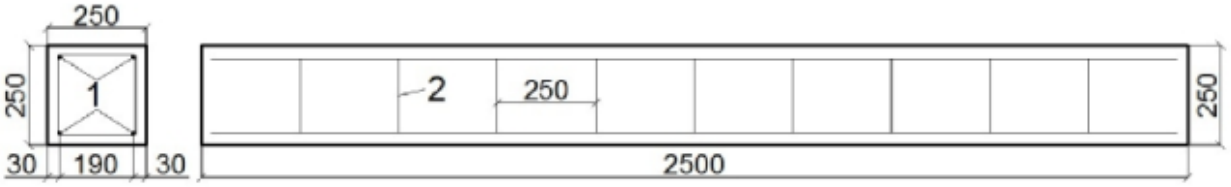


Рисунок 9. *Конструкция и схема армирования железобетонных колонн: 1 – стержневая арматура диаметром 10 мм класса А400, 2 – поперечная арматура диаметром 6,5 мм класса А240 (источник [35])*

Испытывались три группы колонн: А – не усиленные колонны, Б – колонны, усиленные хомутами FibARM Tape 530/300 в один слой (рис. 10), В - усиленные ламелями FibARM Lamel 14/100 шириной 100 мм, при этом образец 5 усилен только ламелями (рис. 11), а образец 6 ламелями и дополнительно хомутами (рис. 12).

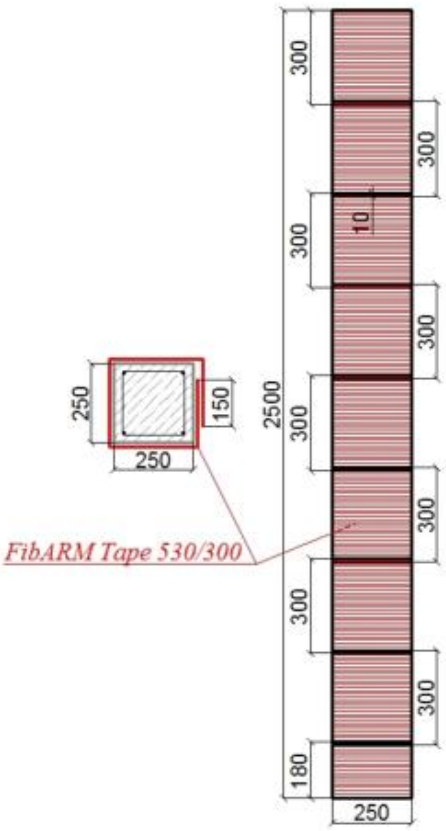


Рисунок 10. *Схема усиления колонн группы Б (источник [35])*

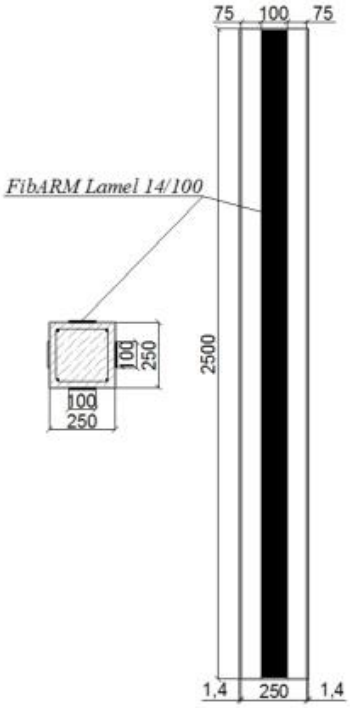


Рисунок 11. *Усиление колонны группы В только ламелями (источник [35])*

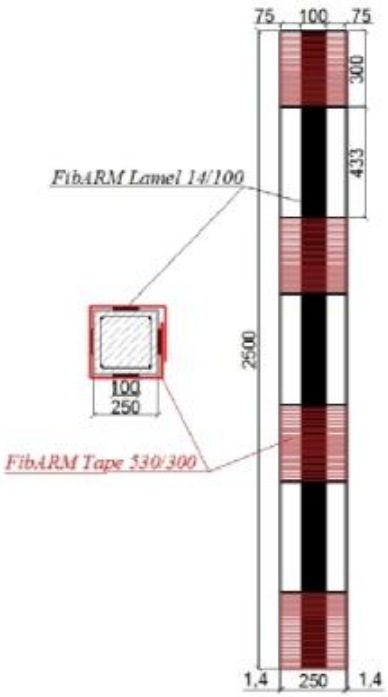


Рисунок 12. *Усиление колонны группы В ламелями и хомутами (источник [35])*

Испытания проводились при температуре + (15 – 22)ºС на испытательной машине ЦД 20/400 ПУ по схеме осевого сжатия, при этом на базе 500 мм в середине длины колонн фиксировались абсолютные деформации. Нагрузка прикладывалась к колонне шагами величиной 5000 кг со скоростью 500 кг/мин.

На рисунке 13 показан процесс испытаний не усиленной колонны (слева) и усиленной холстами (справа). На рисунке 14 показан процесс испытаний железобетонных колонн, усиленных ламелями (слева) и ламелями и хомутами (справа). Полученные в результате испытаний зависимости величины укорочения железобетонных колонн от приложенной нагрузки для различных групп колонн приведены на рисунке 15.

В таблице 3 приведены значения разрушающих нагрузок для разных групп колонн, полученные в результате испытаний.

Анализ результатов испытаний показывает, что усиление железобетонных колонн, работающих на сжатие, путем обмотки их углеродными холстами привело к увеличению несущей способности на сжатие на 54%, в то же время усиление их ламелями привело к увеличению несущей способности колонн только на 8%, и только добавление к ламелям частичной обмотки холстами привело к увеличению несущей способности на сжатие на 35%. Очевидно, что здесь срабатывает «эффект обоймы», хотя для более корректного анализа следовало бы сопоставить площади поперечных сечений обоймы их углеродного холста и ламелей, использованных для усиления. Кроме того, в эксперименте не упоминается о величине усилия натяжения, которое создавалось при обмотке колонны холстами.

Рисунок 13. *Процесс испытания не усиленной (слева) и усиленной холстами (справа) железобетонной колонны (источник [35])*

Рисунок 14. *Процесс испытания усиленной ламелями (слева) и ламелями и хомутами (справа) железобетонной колонны (источник [35])*

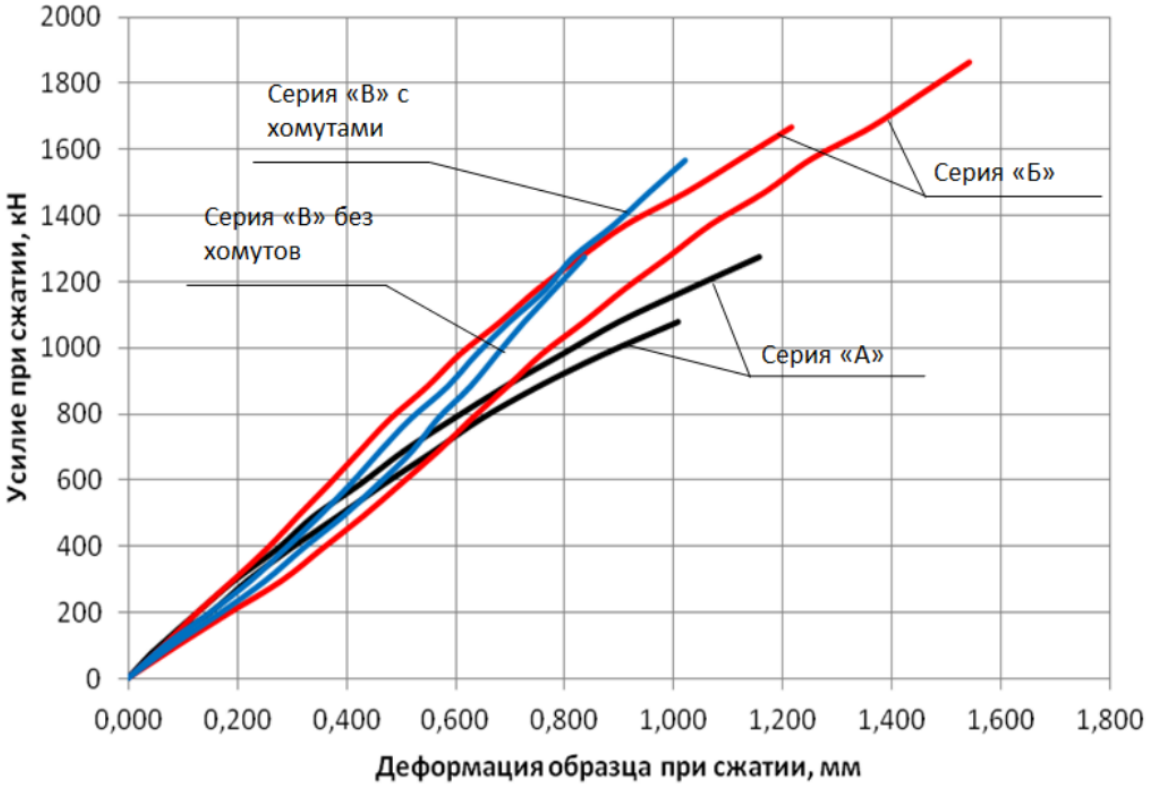


Рисунок 15. *Экспериментальные кривые деформирования различных групп железобетонных колонн: не усиленных (А) и усиленных (Б и В) (источник [35])*

Таблица 3

Результаты испытаний железобетонных колонн при различных схемах усиления (источник [35])

Группа	Номер колонны	Разрушающая нагрузка, кН	Сопротивление сжатию, МПа	Среднее сопротивление сжатию, МПа	Увеличение несущей способности колонны на сжатие, %
А	1	1274	20	18,5	0
	2	1078	17		
Б	3	1666	27	28,5	54
	4	1862	30		
В	5	1274	20	20	8
	6	1568	25	25	35

Также в работе [35] представлены результаты испытаний на изгиб двух типов тавровых балок длиной 12 и 18 метров из бетона с такими же, как и у колонн характеристиками. Схемы балок приведены на рисунках 16 и 17.

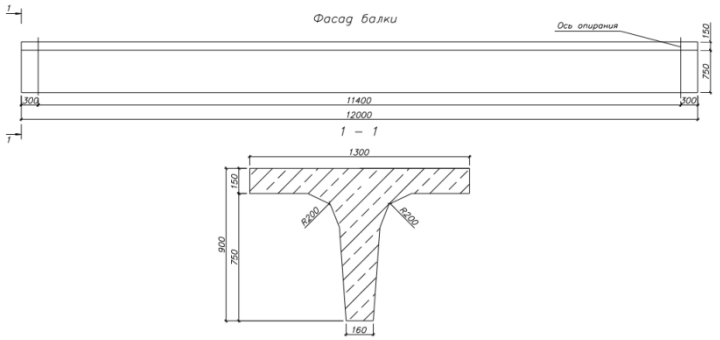


Рисунок 6. *Схема тавровой железобетонной балки длиной 12 м (источник [35])*

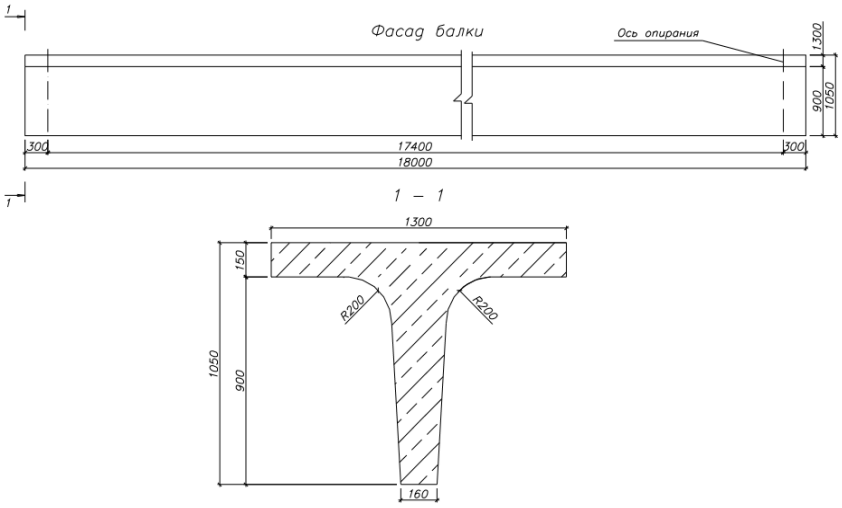


Рисунок 17. *Схема тавровой железобетонной балки длиной 18 м (источник [35])*

Испытания проводились на трех группах балок. В первую группу А входили балки без усиления (рис. 16 и 17), ко второй группе Б – балки, усиленные холстами FibARM Tape 530/300, а в третью группу В – балки, усиленные ламелями FibARM Lamel 14/100. Балки длиной 12 м, относящиеся к группе Б усиливались наклейкой на нижнюю грань ребра холстов длиной 11,6 м и шириной 300 мм в виде U – образной обоймы, а балки группы В – полосой ламели длиной 11,6 м и шириной 100 мм (рис. 18).

Балки длиной 18 м, относящиеся к группе Б усиливались наклейкой на нижнюю грань ребра холстов длиной 17,6 м и шириной 300 мм в виде U – образной обоймы, а балки группы В – полосой ламели длиной 17,6 м и шириной 100 мм (рис. 19). Причем в приопорных зонах балок наклеивалось по два хомута шириной 300 мм. Наклеивание холстов и ламелей выполнялось клеем FibARM Resin.

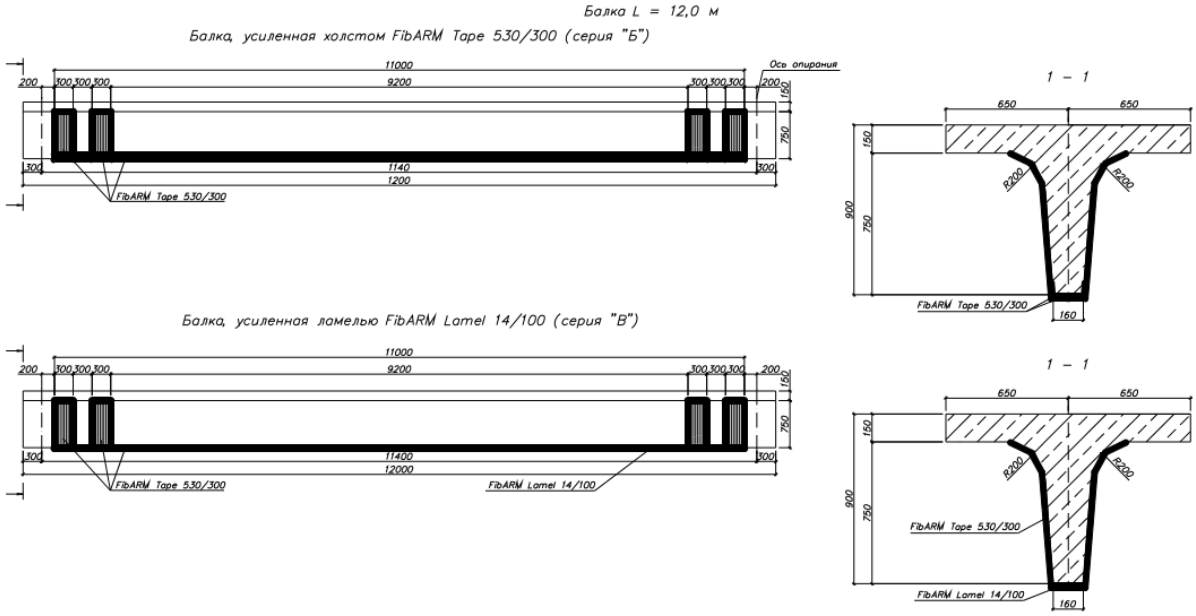


Рисунок 18. *Схема усиления балок длиной 12 м групп Б и В (источник [35])*

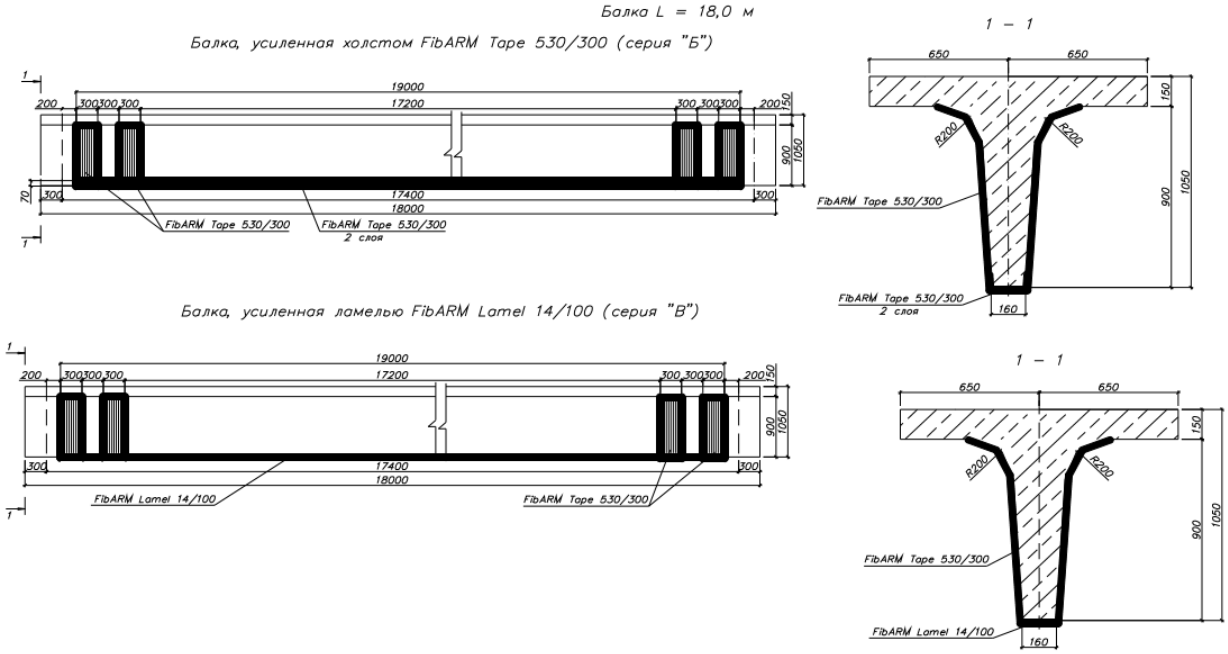


Рисунок 19. *Схема усиления балок длиной 18 м групп Б и В (источник [35])*

Загружение балок производилось на специальном стенде при температуре воздуха от – 15 до – 23ºС двумя гидродомкратами ДУ 100П150 по схеме четырехточечного изгиба в пролетах 11,4 м и 17,4 м с расстоянием между домкратами 1480 мм. Относительные деформации замерялись индикаторами Tesa DISIGO-12 на базе 50 см в среднем сечении балок, прогиб балок в середине пролета замерялся прогибомером 6-ПАО. Нагрузка, прикладываемая шагами по 2500 кг со скоростью 500 кг/мин, замерялась манометром.

Процесс испытаний балок групп А, Б, В иллюстрируется рисунками 20, 21, 22.

Рисунок 20. *Процесс испытания балок группы А длиной 12 м (слева) и 18 м (справа) (источник [35])*

Рисунок 21. *Процесс испытания балок группы Б длиной 12 м (слева) и 18 м (справа) (источник [35])*

Диаграммы нагрузка прогиб для всех трех групп балок приведены ниже на рисунке 23.

Рисунок 22. *Процесс испытания балок группы В длиной 12 м (слева) и 18 м (справа) (источник [35])*

Автором [35] произведено сравнение результатов испытаний балок групп А, Б и В. Но почему-то автор в качестве разрушающей нагрузки, при которой происходит потеря несущей способности не усиленных балок группы А принимает нагрузку, при которой происходит переход от упругого деформирования к упруго-пластическому (при раскрытии нормальных трещин Δ более 1 мм – показано пунктиром на рис. 23). Но сравнивает эту якобы «разрушающую» нагрузку для балок группы А с действительно разрушающими нагрузками балок групп Б и В и получает увеличение «несущей способности» на 50 и более процентов.

Мы полагаем такое сравнение некорректным, и провели сравнение реальных разрушающих нагрузок для балок групп Б и В с действительно разрушающей нагрузкой для балок группы А. Результаты сравнения приведены в таблице 4. Как видно, при таком корректном сравнении усиление балок приводит к росту разрушающей нагрузки не более чем на 13%.

Таблица 4

Сравнение разрушающих нагрузок усиленных и не усиленных балок (составлена авторами на основании анализа результатов [35])

Группа балок	Способ усиления	Разрушающая нагрузка, кН	Увеличение разрушающей нагрузки при усилении,%
Балки длиной 12 м			
А	Без усиления	570	0
Б	FibARM Tape 530/300	621	8,9
В	FibARM Lamel 14/100	600	5,2
Балки длиной 18 м			
А	Без усиления	580	0
Б	FibARM Tape 530/300	625	7,8
В	FibARM Lamel 14/100	653	12,6

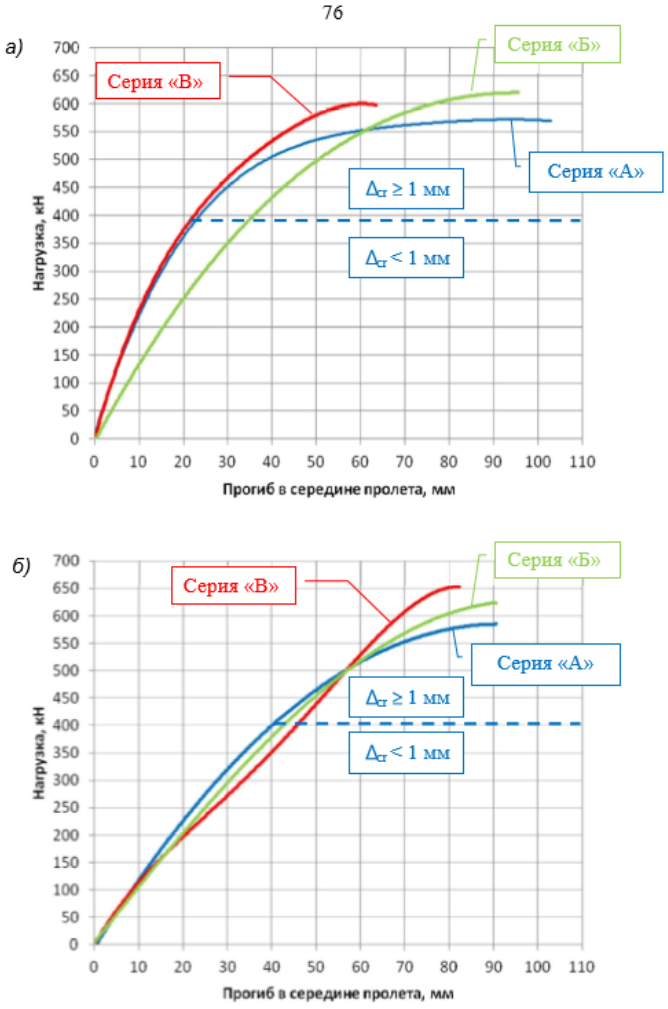


Рисунок 23. *Экспериментальные диаграммы нагрузка – прогиб для трех групп балок длиной 12 м (вверху) и 18 м (внизу) (источник [35])*

Заключение

Проведенный анализ показывает, что в нашей стране к настоящему времени проводится недостаточное количество исследований по экспериментальному изучению поведения железобетонных конструкций, усиленных полимерными композиционными материалами, а описание значительной части тех экспериментов, которые проводятся, не отличается полнотой и систематизацией данных, что затрудняет их использование для построения и идентификации моделей деформирования усиленных полимерными композиционными материалами конструкций.

Мы не ставили своей задачей анализ зарубежных публикаций по рассматриваемой проблеме, однако отметим работы [36 - 48], в которых приводится описание и анализ достаточно корректно поставленных экспериментов.

Следует отметить, что имеется достаточно большое количество публикаций, в которых проводится расчетный анализ поведения усиленных полимерными композиционными материалами железобетонных конструкций, однако все они в основном ориентированы на использование метода расчета по предельным состояниям, применимость которого в рассматриваемых случаях не доказана, а просто постулируется, или же на использование метода конечных элементов, причем модели деформирования и железобетона и усиливающего материала в этом случае используются примитивные, без учета таких эффектов как нелинейность деформирования и неодинаковость работы железобетона на растяжение и сжатие, а потому корректность получаемых результатов сомнительна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников И.Г., Валиев Ш.Н., Овчинников И.И., Зиновьев В.С., Умиров А.Д. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: 1. Экспериментальные исследования особенностей усиления композитами изгибаемых железобетонных конструкций // Интернет-журнал «Науковедение» 2012, № 4, http://naukovedenie.ru/PDF/13tvn412.pdf. - М. с. 1 - 22.
2. 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 // Интернет-журнал «Науковедение» 2012, № 4, http://naukovedenie.ru/PDF/14tvn412.pdf. - М. с. 1 - 37.
3. Овчинников И.Г., Валиев Ш.Н., Овчинников И.И., Зиновьев В.С., Умиров А.Д. Анализ проблем усиления железобетонных конструкций композитными материалами // Развитие транспорта в регионах России: проблемы и перспективы. Материалы II Всероссийской конференции с международным участием. Киров. 2012. с. 49-52.
4. Зиновьев В.С., Овчинников И.Г. Возможность применения композитных материалов при изготовлении и монтаже пешеходных мостов // Новые идеи нового века – 2013: материалы Тринадцатой Международной научной конференции = The new Ideas of New Century-2013: The Thirteen International Scientific Conference Proceedings: в 3 т. / Тихоокеан. Гос. Ун-т. – Хабаровск. Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та. 2013. – 3 т. С. 278-284.

5. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Чесноков Г.В., Покулаев К.В., Татиев Д.А. Особенности расчета металлических конструкций, усиливаемых фиброармированными пластиками // Инновации и исследования в транспортном комплексе: Материалы II Международной научно-практической конференции. Курган. 2014. 456 с. с. 141-151.

6. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Чесноков Г.В., Покулаев К.В., Татиев Д.А. О разработке нормативных документов по усилению металлических строительных конструкций композиционными материалами // Инновации и исследования в транспортном комплексе: Материалы II Международной научно-практической конференции. Курган. 2014. 456 с. с. 151-157.

7. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Татиев Д.А., Покулаев К.В. Усиление металлических конструкций фиброармированными пластиками: часть 1. состояние проблемы // Интернет-журнал "Науковедение" № 3, 2014. Май-июнь. с. 1-27. Идентификационный номер статьи в журнале 19TVN314.

8. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Татиев Д.А., Покулаев К.В. Усиление металлических конструкций фиброармированными пластиками: часть 2. Применение метода предельных состояний к расчету растягиваемых и изгибаемых конструкций // Интернет-журнал "Науковедение" №3, 2014. Май-июнь. с. 1-23. Идентификационный номер статьи в журнале 20TVN314.

9. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. М.: Стройиздат. 2004. 139 с.

10. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. – М., ОАО «Издательство «Стройиздат», 2007. 181 с.

11. Клюев С.В., Клюев А.В., Лесовик Р.В. Усиление строительных конструкций композитами на основе углеволокна. Монография. Lambert. 2011. 123 с.

12. Смердов Д.Н., Устинов В.П., Яшнов А.Н. Перспективы применения неметаллической арматуры в железобетонных конструкциях // Наука, инновации, образование: актуальные проблемы развития транспортного комплекса России: Мат-лы Междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург: Изд-во УрГУПСа, 2006. С. 258–260.

13. Смердов Д.Н. К вопросу усиления железобетонных и бетонных элементов мостов // Современное состояние и инновации транспортного комплекса: Мат-лы Междунар. науч.-техн. конф. Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. Т. 2. С. 48–54.

14. Бокарев С.А., Смердов Д.Н., Устинов В.П., Яшнов А.Н. Усиление пролетных строений с использованием композитных материалов // Путь и путевое хозяйство. 2008. №6. С. 30–31.

15. Смердов, Д.Н. Методика проведения экспериментальных исследований изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами / Д.Н. Смердов, А.А. Неровных // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – Новосибирск: Изд-во СГУПСа, 2009. – Вып. 21. – С. 146-155. (1,25 п.л./0,50 п.л.).

16. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами // Известия вузов. Строительство. 2010. №2. С. 112–124.

17. Неровных, А.А. Повышение эффективности усиления изгибаемых железобетонных элементов композитными материалами / А.А. Неровных // Наука и молодежь XXI века. Материалы IX научно-технической конференции студентов и аспирантов. Часть I. Технические науки. – Новосибирск: Изд-во СГУПСа, 2010. – С. 83 – 84. (0,13 п.л./0,13 п.л.).

18. Неровных, А.А. Усиление композиционными материалами железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов / А.А. Неровных // Инновационные факторы развития Транссиба на современном этапе. Международная научно-практическая конференция, посвященная 80летию Сибирского государственного университета путей сообщения. Тезисы конференции. Ч. I. – Новосибирск: Изд-во СГУПСа, 2012. – С. 127-128. (0, п.л./0,13 п.л.).

19. Неровных А.А. Совершенствование методики оценки грузоподъемности железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов, усиленных композиционными материалами. Автореф. к.т.н. Новосибирск. СибГУПС. 2013. 24 с.

20. Польской П.П., Маилян Д.Р. Композитные материалы - как основа эффективности в строительстве и реконструкции зданий и сооружений // Инженерный вестник Дона, 2012, №4 (часть 2) URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1307.

21. Хишмах Мерват, Польской П.П., Михуб Ахмад К вопросу о деформативности балок из тяжелого бетона, армированных стеклопластиковой и комбинированной арматурой // Эл. журнал «Инженерный вестник Дона». 2012. №4. С. 163-166.

22. Польской П.П., Маилян Д.Р., Мерват Хишмах, Кургин К.В. О деформативности изгибаемых элементов из тяжелого бетона при двухрядном расположении углепластиковой и комбинированной арматуры // Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2094.

23. Польской П.П., Георгиев С.В. Вопросы исследования сжатых железобетонных элементов, усиленных различными видами композитных материалов // Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2134.

24. Маилян Д.Р., Польской П.П. Прочность и деформативность вновь усиленных композитными материалами балок, при различных варьируемых факторах // Электронный научный журнал Инженерный вестник Дона, №2, 2013 - Режим доступа: ivdon@ivdon.ru.

25. Маилян Д.Р., Польской П.П., Георгиев С.В. Методики усиления углепластиком и испытания коротких и гибких стоек // Научное обозрение, 2014, №10, ч.2. С. 415-418.

26. Лесовик Р.В., Клюев С.В. Расчет усиления железобетонных колонн углеродной тканью // Инновационные материалы технологии; сборник докладов Международной научно-практической конференции: Белгород, 11-12 октября 2011 г. / Белгор. гос. технол. ун-т, Белгород: Из-во БГТУ, 2011. – Ч. 2 – С. 3 – 5

27. Клюев С.В., Лесовик Р.В. Внешнее армирование конструкций композитами на основе углеродного волокна // Инновационные материалы технологии; сборник докладов Международной научно-практической конференции: Белгород, 11-12 октября 2011 г. / Белгор. гос. технол. ун-т, Белгород: из-во БГТУ, 2011 – Ч. 1 – С. 239 – 243.

28. Клюев С.В. Технология усиления конструкций углеволокном // Белгородская область: прошлое, настоящее и будущее: материалы научн.-практ. конф. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – Ч.1. – С. 404 – 408.

29. Клюев С.В. Усиление и восстановление конструкций с использованием композитов на основе углеволокна // Бетон и железобетон. – 2012. – №3. – С. 23 – 26.

30. Клюев С.В., Гурьянов Ю.В. Внешнее армирование изгибаемых фибробетонных изделий углеволокном // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – №1 (36). – С. 21 – 26.

31. Клюев С.В., Рубанов В.Г., Павленко В.И., Гурьянов Ю.В., Гинзбург А.В. Расчет строительных конструкций усиленных углеволокном // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2013. – №5. – С. 54 – 56.

32. Гапонов В.В. Экспериментальные исследования усиления плит перекрытия коллекторных тоннелей сетками из углеродных волокон в матрице на минеральной основе // Промышленное и гражданское строительство. - 2011. - №11. – С. 69-71.

33. Гапонов В.В. Усиление изгибаемых железобетонных конструкций подземных сооружений композиционными материалами // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. - №12. – С. 238-246.

34. Гапонов В.В. Обоснование и разработка технологии усиления железобетонных конструкций подземных сооружений с использованием композиционных материалов. Автореф. дисс. к.т.н. М. 2012. 25 с.

35. Смердов М.Н. Исследование несущей способности железобетонных конструкций гидротехнических зданий и сооружений, усиленных композиционными материалами, с учетом температурных факторов. Диссертация … к.т.н. Екатеринбург. 2015. 135 с.

36. Bonacci, J.F., Maalej, M. Externally bonded fiber-reinforced polymer for rehabilitation of corrosion damaged concrete beams // ACI Structural Journal, 2000, 97(5), pp. 703–11.

37. Tan, K.Y. Evaluation of Externally Bonded CFRP System for the Strengthening of RC Slabs. University of Missouri-Rolla. Center for Infrastructure Engineering Studies: 2003.Master's Thesis. 141 p.

38. Ershad Ullah Chowdhury. Behaviour of fibre reinforced polymer confined reinforced concrete columns under fire condition. Queen’s University Kingston, Ontario, Canada. 2009. A thesis for the degree of Doctor of Philosophy. 235 p.

39. Denvid Lau, Hoat Joen Pam. Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams // Engineering Structures.2010. 32 pp. 3857–3865.

40. Ceroni F Experimental performances of RC beams strengthened with FRP materials // Construction and Building Materials. 2010, 24: pp. 1547-59.

41. Bukhari I.A., Vollum R.L., Ahmad S. and Sagaseta J. Shear strengthening of reinforced concrete beams with CFRP // Magazine of Concrete Research, 2010, 62, No. 1, January, pp. 65–77.

42. Habibur Rahman Sobuz, Ehsan Ahmed, Noor Md. Sadiqul Hasan, Md. Alhaz Uddin. Use of carbon fiber laminates for strengthening reinforced concrete beams in bending // International journal of civil and structural engineering, 2011, Volume 2, No 1, pp. 67-84.

43. Sümer Y. and Aktaş M. Bond length effect of fiber reinforced polymers bonded reinforced concrete beams // International Journal of the Physical Sciences. 2011. Vol. 6(24), pp. 5795-5803.

44. Shit, T. Experimental and Numerical Study on Behavior of Externally Bonded RC T-Beams Using GFRP Composites. Department of Civil Engineering National Institute of Technology Rourkela, Orissa: 2011. Master's Thesis. 97 p.

45. Sólrún Lovísa Sveinsdóttir. Experimental research on strengthening of concrete beams by the use of epoxy adhesive and cement-based bonding material. School of Science and Engineering at Reykjavík University. Thesis in Civil Engineering for the degree of Master of Science. 2012. 108 p.

46. Ghernouti Y., Rabehi B., Benhamna A. and Hadj Mostefa. Strengthening of concrete beams by CFRP: Experimental study and finite element analysis // J. Build. Mater. Struct. (2014) 1: pp. 47-57.

47. Spyrakos C.C., Raftoyiannis I.G., Credali L. and Ussia J. Experimental and Analytical Study on Reinforced Concrete Beams in Bending Strengthened with FRP // The Open Construction and Building Technology Journal, 2014, 8, pp. 153-163.

48. Marwan Bllkasem Salah Alferjani, Abdul Aziz Bin Abdul Samad Blkasem Salah Elrawaff, Noridah Binti Mohamad, Mohd Hilton Bin Ahmad. Shear strengthening of reinforced concrete beams using carbon fiber reinforced polymer laminate: A review // American Journal of Civil Engineering. 2014; 2(1): pp. 1-7.

Ovchinnikov Ilya Igorevich
Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Russia, Saratov
Moscow state automobile & road technical university
Sochi branch, Russia, Sochi
E-mail: bridgeart@mail.ru

Ovchinnikov Igor Georgievich.
Penza state university of architecture and construction, Russia, Penza
Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Russia, Saratov
Perm national research polytechnic university, Russia, Perm
E-mail: bridgesar@mail.ru

Chesnokov Georgiy Vladimirovich
«Research institute Grafit», Russia, Moscow
E-mail: gchesnokov@niigrafit.org

Mikhaldykin Eugeny Sergeevich
«Research institute Grafit», Russia, Moscow
E-mail: emihaldikin@niigrafit.org

Analysis of experimental studies strengthening of reinforced concrete structures by polymer composite materials. Part 1. Native experiments under static load

Abstract. The problem of collecting, analyzing and organizing information on the experimental testing of reinforced concrete structures, reinforced polymer composites are considered. It is noted that these data are scattered over a large number of publications, making them difficult to use. Therefore, the creation of databases on the results of experimental studies of reinforced structures - an important task. On this issue, it is written in Russian only 3 books, two of them based on the results of foreign studies. It is noted that in the vast majority of other publications set out general ideas on the strengthening of reinforced concrete structures using polymer composite materials, bonding composites technology in a number of papers describe methods for calculating the amplified composite materials reinforced concrete structures by the method of limiting states without justification. Next, we consider the results of local experiments on the behavior of reinforced polymer composite materials reinforced concrete structures under static loading.

The conclusion is that in many national publications is not always complete and systematic information on deformation of reinforced concrete structures, reinforced polymer composite materials, the conditions of the test, but only on the value of failure loads data for some amplification circuits. Then the results of the correct number of experiments to study the behavior of reinforced concrete structures, the analysis of which is different from the work done by the authors of experimental studies.

Keywords: reinforced concrete beam; columns; strengthening; fiber reinforced polymer; carbon fiber reinforced polymer; composites; static loading; experimental investigation

REFERENCES

1. Ovchinnikov I.G., Valiev Sh.N., Ovchinnikov I.I., Zinov'ev V.S., Umirov A.D. Voprosy usileniya zhelezobetonnykh konstruktsiy kompozitami: 1. Eksperimental'nye issledovaniya osobennostey usileniya kompozitami izgibaemykh zhelezobetonnykh

konstruktsiy // Internet-zhurnal «Naukovedenie» 2012, № 4, http://naukovedenie.ru/PDF/13tvn412.pdf. - M. s. 1 - 22.

2. Ovchinnikov I.G., Valiev Sh.N., Ovchinnikov I.I., Zinov'ev V.S., Umirov A.D. Voprosy usileniya zhelezobetonnykh konstruktsiy kompozitami: 2. Naturnye issledovaniya usileniya zhelezobetonnykh konstruktsiy kompozitami, voznikayushchie problemy i puti ikh resheniya // Internet-zhurnal «Naukovedenie» 2012, № 4, http://naukovedenie.ru/PDF/14tvn412.pdf. - M. s. 1 - 37.

3. Ovchinnikov I.G., Valiev Sh.N., Ovchinnikov I.I., Zinov'ev V.S., Umirov A.D. Analiz problem usileniya zhelezobetonnykh konstruktsiy kompozitnymi materialami // Razvitie transporta v regionakh Rossii: problemy i perspektivy. Materialy II Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Kirov. 2012. s. 49-52.

4. Zinov'ev V.S., Ovchinnikov I.G. Vozmozhnost' primeneniya kompozitnykh materialov pri izgotovlenii i montazhe peshekhodnykh mostov // Novye idei novogo veka – 2013: materialy Trinadtsatoy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii = The new Ideas of New Century-2013: The Thirteen International Scientific Conference Proceedings: v 3 t. / Tikhookean. Gos. Un-t. – Khabarovsk. Izd-vo Tikhookean. gos. un-ta. 2013. – 3 t. C. 278-284.

5. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Chesnokov G.V., Pokulaev K.V., Tatiev D.A. Osobennosti rascheta metallicheskikh konstruktsiy, usilivaemykh fibroarmirovannymi plastikami // Innovatsii i issledovaniya v transportnom komplekse: Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Kurgan. 2014. 456 s. s. 141-151.

6. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Chesnokov G.V., Pokulaev K.V., Tatiev D.A. O razrabotke normativnykh dokumentov po usileniyu metallicheskikh stroitel'nykh konstruktsiy kompozitsionnymi materialami // Innovatsii i issledovaniya v transportnom komplekse: Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Kurgan. 2014. 456 s. s. 151-157.

7. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Tatiev D.A., Pokulaev K.V. Usilenie metallicheskikh konstruktsiy fibroarmirovannymi plastikami: chast' 1. sostoyanie problemy // Internet-zhurnal "Naukovedenie" № 3, 2014. May-iyun'. s. 1-27. Identifikatsionnyy nomer stat'i v zhurnale 19TVN314.

8. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Tatiev D.A., Pokulaev K.V. Usilenie metallicheskikh konstruktsiy fibroarmirovannymi plastikami: chast' 2. Primenenie metoda predel'nykh sostoyaniy k raschetu rastyagivaemykh i izgibaemykh konstruktsiy // Internet-zhurnal "Naukovedenie" №3, 2014. May-iyun'. s. 1-23. Identifikatsionnyy nomer stat'i v zhurnale 20TVN314.

9. Shilin A.A., Pshenichnyy V.A., Kartuzov D.V. Usilenie zhelezobetonnykh konstruktsiy kompozitnymi materialami. M.: Stroyizdat. 2004. 139 s.

10. Shilin A.A., Pshenichnyy V.A., Kartuzov D.V. Vneshnee armirovanie zhelezobetonnykh konstruktsiy kompozitsionnymi materialami. – M., OAO «Izdatel'stvo «Stroyizdat», 2007. 181 s.

11. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Lesovik R.V. Usilenie stroitel'nykh konstruktsiy kompozitami na osnove uglevolokna. Monografiya. Lambert. 2011. 123 s.

12. Smerdov D.N., Ustinov V.P., Yashnov A.N. Perspektivy primeneniya nemetallicheskoy armatury v zhelezobetonnykh konstruktsiyakh // Nauka, innovatsii,

obrazovanie: aktual'nye problemy razvitiya transportnogo kompleksa Rossii: Mat-ly Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Ekaterinburg: Izd-vo UrGUPSa, 2006. S. 258–260.

13. Smerdov D.N. K voprosu usileniya zhelezobetonnykh i betonnykh elementov mostov // Sovremennoe sostoyanie i innovatsii transportnogo kompleksa: Mat-ly Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Perm': Izd-vo PGTU, 2008. T. 2. S. 48–54.

14. Bokarev S.A., Smerdov D.N., Ustinov V.P., Yashnov A.N. Usilenie proletnykh stroeniy s ispol'zovaniem kompozitnykh materialov // Put' i putevoe khozyaystvo. 2008. №6. S. 30–31.

15. Smerdov, D.N. Metodika provedeniya eksperimental'nykh issledovaniy izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh kompozitnymi materialami / D.N. Smerdov, A.A. Nerovnykh // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. – Novosibirsk: Izd-vo SGUPSa, 2009. – Vyp. 21. – S. 146-155. (1,25 p.l./0,50 p.l.).

16. Bokarev S.A., Smerdov D.N. Eksperimental'nye issledovaniya izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh kompozitnymi materialami // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 2010. №2. S. 112–124.

17. Nerovnykh, A.A. Povyshenie effektivnosti usileniya izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov kompozitnymi materialami / A.A. Nerovnykh // Nauka i molodezh' XXI veka. Materialy IX nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov. Chast' I. Tekhnicheskie nauki. – Novosibirsk: Izd-vo SGUPSa, 2010. – S. 83 – 84. (0,13 p.l./0,13 p.l.).

18. Nerovnykh, A.A. Usilenie kompozitsionnymi materialami zhelezobetonnykh proletnykh stroeniy zheleznodorozhnykh mostov / A.A. Nerovnykh // Innovatsionnye faktory razvitiya Transsiba na sovremennom etape. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posvyashchennaya 80letiyu Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. Tezisy konferentsii. Ch. I. – Novosibirsk: Izd-vo SGUPSa, 2012. – S. 127-128. (0, p.l./0,13 p.l.).

19. Nerovnykh A.A. Sovershenstvovanie metodiki otsenki gruzopod"emnosti zhelezobetonnykh proletnykh stroeniy zheleznodorozhnykh mostov, usilennykh kompozitsionnymi materialami. Avtoref. k.t.n. Novosibirsk. SibGUPS. 2013. 24 s.

20. Pol'skoy P.P., Mailyan D.R. Kompozitnye materialy - kak osnova effektivnosti v stroitel'stve i rekonstruktsii zdaniy i sooruzheniy // Inzhenernyy vestnik Dona, 2012, №4 (chast' 2) URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1307.

21. Khishmakh Mervat, Pol'skoy P.P., Mikhub Akhmad K voprosu o deformativnosti balok iz tyazhelogo betona, armirovannykh stekloplastikovoy i kombinirovannoy armaturoy // El. zhurnal «Inzhenernyy vestnik Dona». 2012. №4. S. 163-166.

22. Pol'skoy P.P., Mailyan D.R., Mervat Khishmakh, Kurgin K.V. O deformativnosti izgibaemykh elementov iz tyazhelogo betona pri dvukhryadnom raspolozhenii ugleplastikovoy i kombinirovannoy armatury // Inzhenernyy vestnik Dona, 2013, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2094.

23. Pol'skoy P.P., Georgiev S.V. Voprosy issledovaniya szhatykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh razlichnymi vidami kompozitnykh materialov // Inzhenernyy vestnik Dona, 2013, №4 URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2134.

24. Mailyan D.R., Pol'skoy P.P. Prochnost' i deformativnost' vnov' usilennykh kompozitnymi materialami balok, pri razlichnykh var'iruemykh faktorakh // Elektronnyy nauchnyy zhurnal Inzhenernyy vestnik Dona, №2, 2013 - Rezhim dostupa: ivdon@ivdon.ru.

25. Mailyan D.R., Pol'skoy P.P., Georgiev S.V. Metodiki usileniya ugleplastikom i ispytaniya korotkikh i gibkikh stoek // Nauchnoe obozrenie, 2014, №10, ch.2. S. 415-418.

26. Lesovik R.V., Klyuev S.V. Raschet usileniya zhelezobetonnykh kolonn uglerodnoy tkan'yu // Innovatsionnye materialy tekhnologii; sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Belgorod, 11-12 oktyabrya 2011 g. / Belgor. gos. tekhnol. un-t, Belgorod: Iz-vo BGTU, 2011. – Ch. 2 – S. 3 – 5.

27. Klyuev S.V., Lesovik R.V. Vneshnee armirovanie konstruktsiy kompozitami na osnove uglerodnogo volokna // Innovatsionnye materialy tekhnologii; sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Belgorod, 11-12 oktyabrya 2011 g. / Belgor. gos. tekhnol. un-t, Belgorod: iz-vo BGTU, 2011 – Ch. 1 – S. 239 – 243.

28. Klyuev S.V. Tekhnologiya usileniya konstruktsiy uglevoloknom // Belgorodskaya oblast': proshloe, nastoyashchee i budushchee: materialy nauchn.-prakt. konf. – Belgorod: Izd-vo BGTU, 2012. – Ch.1. – S. 404 – 408.

29. Klyuev S.V. Usilenie i vosstanovlenie konstruktsiy s ispol'zovaniem kompozitov na osnove uglevolokna // Beton i zhelezobeton. – 2012. – №3. – S. 23 – 26.

30. Klyuev S.V., Gur'yanov Yu.V. Vneshnee armirovanie izgibaemykh fibrobetonnykh izdeliy uglevoloknom // Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal. – 2013. – №1 (36). – S. 21 – 26.

31. Klyuev S.V., Rubanov V.G., Pavlenko V.I., Gur'yanov Yu.V., Ginzburg A.V. Raschet stroitel'nykh konstruktsiy usilennykh uglevoloknom // Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. – 2013. – №5. – S. 54 – 56.

32. Gaponov V.V. Eksperimental'nye issledovaniya usileniya plit perekrytiya kollektornykh tonneley setkami iz uglerodnykh volokon v matritse na mineral'noy osnove // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. - 2011. - №11. – S. 69-71.

33. Gaponov V.V. Usilenie izgibaemykh zhelezobetonnykh konstruktsiy podzemnykh sooruzheniy kompozitsionnymi materialami // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. – 2011. - №12. – S. 238-246.

34. Gaponov V.V. Obosnovanie i razrabotka tekhnologii usileniya zhelezobetonnykh konstruktsiy podzemnykh sooruzheniy s ispol'zovaniem kompozitsionnykh materialov. Avtoref. diss. k.t.n. M. 2012. 25 s.

35. Smerdov M.N. Issledovanie nesushchey sposobnosti zhelezobetonnykh konstruktsiy gidrotekhnicheskikh zdaniy i sooruzheniy, usilennykh kompozitsionnymi materialami, s uchetom temperaturnykh faktorov. Dissertatsiya … k.t.n. Ekaterinburg. 2015. 135 s.

36. Bonacci, J.F., Maalej, M. Externally bonded fiber-reinforced polymer for rehabilitation of corrosion damaged concrete beams // ACI Structural Journal, 2000, 97(5), pp. 703–11.

37. Tan, K.Y. Evaluation of Externally Bonded CFRP System for the Strengthening of RC Slabs. University of Missouri-Rolla. Center for Infrastructure Engineering Studies: 2003.Master's Thesis. 141 p.

38. Ershad Ullah Chowdhury. Behaviour of fibre reinforced polymer confined reinforced concrete columns under fire condition. Queen's University Kingston, Ontario, Canada. 2009. A thesis for the degree of Doctor of Philosophy. 235 p.

39. Denvid Lau, Hoat Joen Pam. Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams // Engineering Structures.2010. 32 pp. 3857–3865.

40. Ceroni F Experimental performances of RC beams strengthened with FRP materials // Construction and Building Materials. 2010, 24: pp. 1547-59.

41. Bukhari I.A., Vollum R.L., Ahmad S. and Sagaseta J. Shear strengthening of reinforced concrete beams with CFRP // Magazine of Concrete Research, 2010, 62, No. 1, January, pp. 65–77.

42. Habibur Rahman Sobuz, Ehsan Ahmed, Noor Md. Sadiqul Hasan, Md. Alhaz Uddin. Use of carbon fiber laminates for strengthening reinforced concrete beams in bending // International journal of civil and structural engineering, 2011, Volume 2, No 1, pp. 67-84.

43. Sümer Y. and Aktaş M. Bond length effect of fiber reinforced polymers bonded reinforced concrete beams // International Journal of the Physical Sciences. 2011. Vol. 6(24), pp. 5795-5803.

44. Shit, T. Experimental and Numerical Study on Behavior of Externally Bonded RC T-Beams Using GFRP Composites. Department of Civil Engineering National Institute of Technology Rourkela, Orissa: 2011. Master's Thesis. 97 p.

45. Sólrún Lovísa Sveinsdóttir. Experimental research on strengthening of concrete beams by the use of epoxy adhesive and cement-based bonding material. School of Science and Engineering at Reykjavík University. Thesis in Civil Engineering for the degree of Master of Science. 2012. 108 p.

46. Ghernouti Y., Rabehi B., Benhamna A. and Hadj Mostefa. Strengthening of concrete beams by CFRP: Experimental study and finite element analysis // J. Build. Mater. Struct. (2014) 1: pp. 47-57.

47. Spyrakos C.C., Raftoyiannis I.G., Credali L. and Ussia J. Experimental and Analytical Study on Reinforced Concrete Beams in Bending Strengthened with FRP // The Open Construction and Building Technology Journal, 2014, 8, pp. 153-163.

48. Marwan Bllkasem Salah Alferjani, Abdul Aziz Bin Abdul Samad Blkasem Salah Elrawaff, Noridah Binti Mohamad, Mohd Hilton Bin Ahmad. Shear strengthening of reinforced concrete beams using carbon fiber reinforced polymer laminate: A review // American Journal of Civil Engineering. 2014; 2(1): pp. 1-7.