

УДК 624.07

Овчинников Илья Игоревич

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»
Россия, Саратов¹

ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет (МАДИ)»
Сочинский филиал
Россия, Сочи
Доцент
Кандидат технических наук
E-Mail: bridgear@mail.ru

Овчинников Игорь Георгиевич

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
Россия, Пермь
Профессор
Доктор технических наук
E-Mail: bridgesar@mail.ru

Чесноков Георгий Владимирович

«НИИ Графит» Предприятие госкорпорации «Росатом»
Россия, Москва
Главный специалист Проектного офиса «Строительный кластер»
E-Mail: gchesnokov@niigrafit.org

Татиев Даурен Амантаевич

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»
Россия, Саратов
Магистрант кафедры «Транспортное строительство»
E-Mail: daur_t90@mail.ru

Покулаев Константин Валерьевич

«Приволжская железная дорога-филиал ОАО «РЖД»»
Россия, Саратов
Заместитель начальника службы пути по ИССО
E-Mail: sam_iskenderov@bk.ru

Усиление металлических конструкций фиброармированными пластиками: часть 1. состояние проблемы

¹ 410008, 1-й Автодорожный проезд, д. 5/8, кв. 122

Аннотация. Работа посвящена анализу состояния проблемы применения композитных материалов для усиления строительных конструкций. Необходимо отметить, что в России в настоящее время интенсивно развивается применение композитных материалов (фиброармированных пластиков) для усиления железобетонных и предварительно напряженных железобетонных конструкций.

В основном экспериментальные и теоретические разработки посвящены проблеме усиления железобетонных конструкций. Имеется ряд руководств, рекомендаций, стандартов организаций и сводов правил по применению композитов для усиления железобетонных конструкций. В статье приведены данные, как о российских, так и о зарубежных нормативных документах и руководствах по применению композитных материалов для усиления строительных конструкций. Указывается, что практически все они посвящены проблеме усиления бетонных и железобетонных конструкций фиброармированными пластиками.

В подавляющем большинстве они опираются на иностранные нормативные документы и иностранные экспериментальные и теоретические исследования. Для расчета в них предлагается использовать методику предельных значений, причем разумного обоснования применимости этой методики не приводится. В предлагаемых нормативных документах не всегда указывается на их рекомендательный характер, сами документы не снабжаются приложениями, в которых обосновываются, те предложения, формулы, положения, которые закладываются в эти документы. В России практически отсутствуют экспериментальные, да и теоретические исследования, посвященные проблеме усиления металлических строительных конструкций композитными материалами, хотя в авиации и космонавтике подобные наработки имеются. Приведенные в списке литературы иностранные публикации могут послужить основой для разработки предварительного варианта нормативного документа по применению композитов для усиления металлических конструкций.

Ключевые слова: усиление; композиты; фиброармированные пластики; углеволокно; металлические конструкции; нормативные документы; железобетон; арматура.

Идентификационный номер статьи в журнале 19TVN314

Металлические конструкции сооружений промышленного, гражданского, транспортного назначения в процессе эксплуатации подвергаются воздействию разнообразных эксплуатационных факторов – нагрузки, температуры, агрессивной окружающей среды, в результате чего несущая способность сооружений снижается, долговечность сокращается. Одним из способов восстановления и, при необходимости, повышения несущей способности строительных конструкций является их усиление. Можно сказать, что усиление строительных, в том числе и металлических, конструкций представляет собой неотъемлемую часть процессов строительства и эксплуатации зданий и сооружений различного назначения.

К наиболее часто встречающимся причинам усиления металлических конструкций можно отнести:

- повреждение металлических конструкций, которое привело к снижению их несущей способности, жесткости, трещиностойкости;
- изменение условий эксплуатации металлических конструкций;
- изменение расчетной схемы металлических конструкций;
- необходимость повысить надежность и долговечность металлических конструкций;
- ошибки при проектировании, монтаже и эксплуатации металлических конструкций.

Вопросы прогнозирования несущей способности и долговечности металлических конструкций, подвергающихся коррозионному разрушению рассмотрены в работах [1, 2, 3].

Для усиления металлических конструкций могут использоваться традиционные способы, включающие увеличение и наращивание сечений элементов, установку дополнительных элементов в существующие конструкции, устройство дополнительных опор и подкосов с целью изменения конструктивной схемы элементов, устройство дополнительных связей, ребер, диафрагм и распорок для увеличения местной и общей устойчивости металлических конструкций, обетонирование металлических конструкций и другие способы.

В последнее время для усиления металлических конструкций все чаще стали применяться современные способы усиления, основанные на применении армированных фибрами полимерных материалов (композитных или композиционных материалов или, короче, композитов).

В литературе композитные материалы, армированные стеклотканью, арамидными или углеродными волокнами, называются композиционными материалами с фиброй – КМФ, или фиброармированными пластиками - ФАП. Наибольшее распространение получили углепластики, то есть композиты, армированные углеволокном.

Внешнее армирование из фиброармированных пластиков используется для усиления стержневых растягиваемых и изгибаемых элементов, для создания армирующих усиливающих оболочек на колоннах и опорах, для усиления элементов ферм, эстакад, пластинок, оболочек и других конструкций.

При проектировании усиления металлических конструкций с использованием фиброармированных пластиков необходимо учитывать остаточную несущую способность и жесткость элементов, подвергаемых усилению. Для расчетной оценки усилий в элементах усиливаемых конструкций и в элементах самого усиления необходимо использовать данные,

полученные при обследовании, которое в обязательном порядке должно предшествовать усилению.

При расчете усиливаемых конструкций обычно используется метод предельных состояний, разработанный в Советском Союзе и в дальнейшем получивший широкое распространение в мире под названием метода частных коэффициентов.

Расчет по первой группе предельных состояний производится для всех конструкций, усиленных фиброармированными пластиками. По второй группе предельных состояний расчет производится, если после усиления расчетная нагрузка увеличивается. При расчете усиленных фиброармированными пластиками металлических конструкций обычно рассматривается несколько возможных схем разрушения и наступления предельных состояний усиленного элемента. Так как расчет может проводиться на несколько сочетаний нагрузок, то обычно используется итерационный подход – то есть вначале ориентировочно назначается, или определяется для одного из вариантов нагружения площадь сечения армированного пластика, а затем эта площадь сечения корректируется в соответствии с результатами проверок соответствующих предельных состояний.

Диаграмма деформирования фиброармированных пластиков представляет собой линейную зависимость между напряжениями и деформациями практически до разрушения, поэтому для моделирования поведения армированных пластиков используется закон Гука. При этом следует учитывать, что свойства фиброармированных пластиков зависят от типа, количества и ориентации армирующих фибровых волокон. При этом также надо учитывать что фиброармированные пластики обычно являются ортотропными материалами, а их коэффициент линейного расширения отличается от такового для усиливаемых металлических конструкций.

Весьма важным условием надежной эксплуатации металлических конструкций, усиленных с помощью фиброармированных пластиков, является соблюдение конструктивных требований, которые являются неотъемлемой частью проектирования.

Довольно распространенной причиной появления и развития повреждений металлических конструкций также является отсутствие мониторинга их состояния, а также практически полное отсутствие систем эксплуатации.

С другой стороны увеличение действующих нагрузок на металлические сооружения, в частности, увеличение нагрузки от подвижного состава и интенсивности его движения на мостах может потребовать усиления существующих металлических мостовых сооружений. При этом может оказаться, что расходы, связанные с усилением эксплуатируемых металлоконструкций будут меньше, чем расходы, необходимые для демонтажа, реконструкции или замены эксплуатируемого сооружения.

Для усиления металлических конструкций с целью повышения их несущей способности обычно применяются металлические накладные пластины, для прикрепления которых используются болтовые или сварные соединения. Однако этот способ имеет ряд недостатков. Металлические накладки приводят к увеличению собственного веса сооружения, они подвержены разрушению от коррозии и усталости. Нередко может оказаться трудным приваривание их к усиливаемым элементам.

Кроме того, усиление металлических конструкций транспортных сооружений, находящихся в эксплуатации, может привести к необходимости ограничить или вообще прекратить движения транспорта на период проведения ремонтных работ.

Применение для усиления металлических конструкций внешнего армирования из композитных материалов на основе углеродных, арамидных и стеклянных волокон позволяет

преодолеть трудности, возникающие при использовании традиционных материалов и технологий.

Армированные волокнами полимерные материалы имеют более высокую, чем сталь прочность, малый вес (то есть большую удельную прочность), они хорошо сопротивляются воздействию коррозионных эксплуатационных сред, удобны в применении и не требуют тяжелого оборудования.

Дополнительно отметим, что использование армированных волокнами полимерных материалов для усиления металлических конструкций не так широко распространено, как их применение для усиления бетонных, железобетонных или каменных конструкций.

Применение армированных волокнами полимерных материалов для усиления старых металлических конструкций может оказаться также эффективным вследствие хорошего сочетания свойств композита и материала усиливаемой конструкции. Высокая прочность композитного материала, а также использование технологии предварительного напряжения могут компенсировать низкую прочность на растяжение материала усиливаемой конструкции.

При этом важное значение имеет технология приклеивания усиливающего элемента к усиливаемому. При выборе армированных волокнами полимерных материалов для усиления конструкций следует иметь в виду, что углеродные волокна нередко более предпочтительны, так как они имеют модуль упругости, близкий к модулю упругости стали или превышающий его. Арамидные или стеклянные волокна такими свойствами не обладают. Однако при использовании полимеров, армированных углеродными волокнами, следует применять специальный изолирующий слой между композитом и усиливаемым элементом во избежание протекания электрохимической коррозии. При использовании полимеров, армированных стеклянными или арамидными волокнами, такой предосторожности не требуется.

Результаты опубликованных исследований и испытаний, посвященных применению полимеров, армированных волокнами различного типа, для усиления металлических конструкций показывают, что получаемые соединения являются достаточно универсальными и надежными, и потому их применение постоянно расширяется.

Следует сразу же отметить, что проблема усиления металлических конструкций внешним армированием с использованием композитных материалов не так разработана, как скажем проблема усиления бетонных, железобетонных и каменных конструкций, и потому эффективные решения возможны только для некоторых типов конструкций.

Различные конструкции (фермы, рамы, опорные системы, эстакадные конструкции и так далее) представляют собой сочетание тонкостенных стержневых, пластинчатых и оболочечных элементов, работающих, на растяжение, сжатие, сдвиг, кручение, изгиб. Поэтому усиление этих, сложных на первый взгляд, конструкций сводится к усилению составляющих их металлических элементов – стержней, работающих на растяжение – сжатие, балок, работающих на изгиб, элементов, работающих на сдвиг и пластинчатых или оболочечных элементов, работающих чаще всего на двухосное растяжение.

Мы полагаем, что материалы данной работы могут оказаться полезными при выявлении проблем, которые до сих пор остаются нерешенными и позволят инженерам и ученым сконцентрироваться на их решении в ближайшее время.

Анализ опубликованной литературы показал, что в России количество исследований, в которых анализируются проблемы усиления металлических конструкций фиброармированными пластиками, а также поведение усиленных пластиками металлических конструкций весьма ограничено, а нормативные документы, в отличие от руководств по усилению железобетонных конструкций, практически отсутствуют.

Отметим, например, российские документы, разработанные для усиления железобетонных конструкций композитными материалами [4 -13].

В руководстве [4] по усилению железобетонных конструкций композитными материалами рассматривается усиление конструкций композиционными материалами как заводского изготовления (ламинатами), так и создаваемыми непосредственно на строительном объекте из тканей (лент, холстов) за счёт пропитки и наклейки их специальными полимерными составами (в основном на эпоксидной основе). Приведена методика расчета усиливаемых железобетонных конструкций внешним армированием композиционными материалами на основе углеродных, арамидных и стеклянных волокон, основанная на применении метода расчета по предельным состояниям. В основу разработки этого руководства положен опыт проектирования и выполнения работ по усилению конструкций ООО «ИнтерАква», исследования, проведенные в НИИЖБ, а также результаты зарубежных экспериментальных исследований, рекомендации производителей композиционных материалов для усиления строительных конструкций, анализ данных практического применения композиционных материалов для усиления строительных конструкций в России и за рубежом.

В работе [5] «Инновационные методы усиления конструкций мостов» приведено описание технологий усиления элементов автодорожных мостов и приведены результаты расчета усиления железобетонной балки и мостовой опоры. Отмечено, что применение композитов позволяет не только усилить ослабленные конструкции пролетных строений в кратчайшие сроки но и увеличить нормативную грузоподъемность морально устаревших мостов до современного уровня исключая дорогостоящую замену несущих элементов пролетных строений, применение тяжелой техники, строительство подъездных дорог и так далее.

В технических условиях [6] приведены требования у углеродным однонаправленным лентам, применяемым в качестве наполнителей в полимерных композиционных материалах для систем внешнего армирования.

В Стандарте организации [7] приведена методика расчета усиливаемых железобетонных конструкций внешним армированием композитными материалами на основе углеродных, арамидных и стеклянных волокон (фиброармированными пластиками) примеры расчета и рекомендации по технологии усиления. Так как в основу разработки этого стандарта организации положен опыт проектирования и выполнения работ по усилению конструкций, научные исследования, проведенные в НИИЖБе, ООО «ИнтерАква», ЗАО «Триада-Холдинг», то очевидно, что стандарт [7] является определенного рода модернизацией руководства [4].

Стандарт организации [8] - система внешнего армирования из полимерных композитов FibARM для ремонта и усиления строительных конструкций - устанавливает общие требования к проведению работ, требования к оборудованию, приспособлениям, инструменту и материалам, используемым в технологическом процессе, последовательность выполнения отдельных технологических операций, включая приемы выполнения отдельных видов работ, требования к технологическим режимам, методы контроля качества работ и материалов, а также требования безопасности и охраны окружающей среды. В экспертном заключении [9] на этот стандарт от «НИЦ Мосты» содержится интересный вывод: цитируем «Представленный к Заключению Стандарт организации ... в целом соответствует по содержанию, номенклатуре операций и требований к рассматриваемому в нем процессу, а также требованиям нормативной документации».

Наверное, после такого заключения разработчик документа [8] ЗАО «Препрег-СКМ» привлек к разработке и НИИЖБ и новый стандарт организации [10] содержит уже не 16, а 61

страницу и как отмечается в документе «рекомендуется для использования проектными организациями при разработке документации на ремонт и реконструкцию железобетонных и бетонных конструкций различного назначения системами внешнего армирования из полимерных композитов.

Участие НИИЖБа, судя по всему, вылилось в разработку рекомендаций по расчету усиления железобетонных конструкций системой внешнего армирования из полимерных композитов FibARM [11], которые и вошли составной частью в [10].

Представляет интерес руководство по усилению железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов системой внешнего армирования на основе углеродных волокон [12], в котором приведены основные положения, нормы и практические указания по определению грузоподъемности балочных железобетонных пролетных строений эксплуатируемых железнодорожных мостов, усиленных композиционными материалами. Расчетные формулы построены на основе методики расчета инженерных сооружений по предельным состояниям. Расчет грузоподъемности не усиленных пролетных строений проводился по Руководству по определению грузоподъемности железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов, а методология расчета усиленных пролетных строений разработана авторами руководства [12].

Свод правил «Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами» [13] распространяется на проектирование восстановления и усиления железобетонных конструкций зданий и сооружений различного назначения путем устройства внешнего армирования композиционными материалами на основе углеродных, арамидных и стеклянных волокон. Нормы устанавливают требования к проектированию восстановления и усиления железобетонных конструкций, изготавливаемых из тяжелого и мелкозернистого бетонов.

При анализе данного свода правил (СП) авторы данной статьи в свое время высказали следующие замечания и рекомендации:

- В области применения композитов для усиления конструкций поставлено не так уж много экспериментов, причем их результаты не всегда однозначны.

Поэтому мы полагаем, что не всегда обоснован прямой перенос формул и положений документов по усилению железобетонных конструкций стальными элементами на случай усиления композитами.

- Может быть, поэтому имеет смысл снабдить СП приложениями, в которых будут в определенной мере обосновываться, или хотя бы объясняться те предложения, формулы, положения, которые закладываются в СП.
- Как мы понимаем, СП относится не к техническим регламентам и не к стандартам предприятий (организаций), то есть не является обязательным для использования документом, а имеет статус национального стандарта (в рамках ФЗ 184 «О техническом регулировании...»). А значит надо убедить расчетчика (проектировщика) использовать его не потому, что в нем все жестко прописано – как, когда, что делать, а потому, что понятно, почему делать именно так и, значит, проектировщик, выполнив расчет по СП, сможет убедительно обосновать правильность выполненного расчета и проекта разумными рассуждениями, а не тупой ссылкой на СП, где этих рассуждений и обоснований нет.
- Наше мнение – неудобно пользоваться документом, в котором то и дело даются ссылки на формулы или положения другого документа, в котором надо еще

разобраться и понять применимость приводимых там формул и положений. Может быть, сделать СП потолще, но самодостаточным, чтоб в нем расчетчик мог найти как можно больше нужного ему.

- Следует иметь ввиду, что расчет по деформационной модели гораздо сложнее расчета по предельным состояниям и потому получается непонятно, что простой расчет приводится подробно, а сложный расчет с недомолвками и недосказанностями и без указания о принятых гипотезах (сплошность, однородность, нелинейность – есть или нет разгрузка или циклическое нагружение, учитываются ли где – то реономные свойства (ползучесть) материалов. Об этом как-то не говорится.
- При какой температуре производится расчет? Какие характеристики бетона, стали и композитов для этой температуры принимать? Учитывать или нет температурные напряжения, деформирование во времени? Как быть с деформациями, накопленными в конструкции до усиления? Убирать их (разгружая конструкцию) или нет?
- Мы полагаем, что каждую методику расчета в силу новизны предмета следует сопроводить численными примерами расчета с конкретными цифрами, размерами, коэффициентами, с объяснением, почему делается так, а не иначе. И это замечание относится и к расчету по предельным состояниям и, тем более к расчету по деформационной модели. Следует учитывать, что нынешние молодые инженеры многих вещей недоучили в вузе и не всегда есть, кому подсказать и объяснить, потому известное правило, что научают примеры, ох как важно.
- Надо бы в начале четко сформулировать, что существуют два подхода к расчету железобетонных элементов: один основан на методе предельных состояний и включает в себя то-то и то-то. Он применим тогда-то и тогда-то. Второй подход, основанный на деформационной модели железобетона, (а правильнее на использовании общего метода решения задач строительной механики и теории упругости путем совместного рассмотрения уравнений равновесия, геометрических и физических соотношений) имеет более широкую область применения и характеризуется тем-то и тем-то. Он сложнее, чем первый, но корректнее, так как опирается на непротиворечивые (как в первом случае) гипотезы и потому не приводит к противоречивым выводам.
- Возникает также вопрос. На сколько можно повысить грузоподъемность (несущую способность) конструкций при использовании композитов. Второй вопрос. Насколько долговечным будет такое усиление. Не получится ли, что для обеспечения достаточной долговечности лучше заменить полностью железобетонные элементы на более мощные – это и повысит несущую способность и обеспечит требуемую долговечность (лет 30-50). А усиление композитами будет гарантировать только долговечность лет 10, а потом придется возвращаться к замене железобетона новым. То есть мы имеем в виду то, что надо четко определить область применения композитов и по несущей способности и по долговечности. В СП мы этого не нашли.

- В Своде правил отсутствуют положения по технологии и контролю качества производства работ при усилении железобетонных конструкций композиционными материалами.

Нам почему-то кажется, что высказанные вопросы и замечания можно отнести практически ко всем рассмотренным выше нормативным документам.

Отметим еще раз, что практически все отечественные нормативные документы основаны на использовании зарубежных нормативных документов. Поэтому кратко укажем на эти нормативные документы.

Документ [14] представляет собой рекомендации по проектированию и конструированию бетонных сооружений армированных композитными материалами, разработанные Японским обществом гражданских инженеров.

Японская строительная ассоциация по предотвращению разрушений разработала руководство по модернизации существующих бетонных сооружений в зоне сейсмической активности при помощи армирования композитными материалами [15].

Международной Федерацией по армированию бетона, являющейся группой экспертов, включающей представителей большинства Европейских университетов, научно-исследовательских институтов и промышленных компаний, работающих в области армирования бетонных конструкций композитной арматурой в 1999 году подготовлен документ по армированию бетонных конструкций композитной арматурой [16].

Американский институт бетона 2004 году выпустил руководство по методам испытания композитной арматуры для армирования бетонных конструкций [17].

В 2006 году итальянский национальный исследовательский совет разработал руководство по проектированию и конструированию бетонных сооружений армированных композитной арматурой [18].

Американским институтом бетона в 2007 году подготовлен документ «Арматура из фиброармированных пластиков для бетонных конструкций» [19], а в 2008 году подготовлено руководство по проектированию и конструированию наружного армирования бетонных конструкций с использованием композитной арматуры [20]. В этом документе отмечается, что фиброармированные системы являются альтернативой традиционным методам усиления, использующим металл, причем фиброармированные пластики используются в качестве дополнительной внешней арматуры. Системы армирования с применением ФАП обладают преимуществами по сравнению с традиционными методами усиления - они легкие, относительно просты в установке, не подвергаются коррозии. В указанных рекомендациях приведена информация об истории и использовании систем усиления из фиброармированных пластиков, описываются уникальные свойства ФАП и даются рекомендации по проектированию, применению и контролю систем усиления из ФАП, применяемых для усиления бетонных конструкций. Рассмотренные в руководстве принципы основаны на знаниях, полученных в процессе экспериментальных исследований, теоретического анализа и натурных исследованиях.

В 2001 году Канадская корпорация «Интеллектуальные разработки для инновационных структур» подготовила документ «Железобетонные конструкции с фиброармированной арматурой» [21], а в 2007 году Канадская ассоциация стандартов выпустила документ под названием «Проектирование и разработка строительных конструкций с использованием композитной арматуры» [22].

В 2004 году Американский институт бетона выпустил, а в 2011 году переутвердил документ «Предварительно напряженные бетонные конструкции с стержневой композитной арматурой» [23].

Международная федерация строительного бетона в 2007 году выпустила в Швейцарии документ «Композитная арматура в железобетонных конструкциях» [24].

В Италии Консультативный комитет по разработке технических рекомендаций для строительства при Национальном исследовательском совете стимулировал разработку ряда важных документов, в том числе «Руководства по проектированию и строительству бетонных конструкций, армированных композитами» [25], «Руководства по проектированию и монтажу фиброармированных систем для усиления существующих конструкций. Металлические конструкции» [26], «Руководства по проектированию и монтажу фиброармированных систем для усиления существующих конструкций. Железобетонные и преднапряженные конструкции, каменные конструкции» [27], «Руководства по проектированию и монтажу фиброармированных систем для усиления существующих конструкций. Деревянные конструкции» [28].

Как видно, преобладающий объем нормативных документов, а значит и теоретических и экспериментальных исследований, относится к проблеме усиления железобетонных конструкций композитными материалами. Следовательно, в этой сфере имеется достаточно большой объем проведенных исследований, что позволяет надеяться на достаточную проработанность методов расчета железобетонных конструкций, усиленных композитными материалами.

Применительно к проблеме усиления металлических конструкций композитными материалами даже иностранных нормативных документов весьма мало, а что же касается России, политический кризис, развившийся на территории СССР, и дальнейший экономический спад в 90-е годы 20-го столетия в России отодвинули и практически свели на нет научно-теоретические и технологические исследования в этом направлении. Поэтому наши поиски отечественных разработок применительно к сфере строительства, оказались безуспешными и мы вынуждены были обратиться к зарубежным исследованиям.

В связи со сказанным в завершение этой первой части статьи приведем список иностранных публикаций по различным аспектам проблемы применения композитных материалов для усиления металлических конструкций.

В работах [29 - 55] рассмотрены общие вопросы применения композитных материалов (фиброармированных пластиков) для усиления металлических конструкций, а также проблема усиления металлических конструкций, подвергающихся изгибу.

Проблемы усиления металлических конструкций, подвергающихся циклическому нагружению, рассмотрены в работах [56 - 63].

В публикациях [64 - 72] рассматриваются вопросы возможного отслаивания композитных материалов от усиливаемых металлических конструкций и пути их решения.

Статьи [73 - 78] посвящены исследованию вопроса усиления сжатых элементов металлических конструкций.

Проблемы долговечности металлических конструкций, усиливаемых композитными материалами и сопутствующие проблемы повышения коррозионной устойчивости усиленных металлических элементов конструкций рассмотрены в статьях [79- 96].

Выводы:

Проведенный анализ состояния проблемы применения фиброармированных пластиков для усиления металлических конструкций показал следующее:

- 1) В России в настоящее время интенсивно развивается применение композитных материалов (фиброармированных пластиков) для усиления железобетонных и предварительно напряженных железобетонных конструкций.
- 2) Имеется ряд руководств, рекомендаций, стандартов организаций и сводов правил по применению композитов для усиления железобетонных конструкций. В подавляющем большинстве они опираются на иностранные нормативные документы и иностранные экспериментальные и теоретические исследования. Для расчета в них предлагается использовать методику предельных состояний, причем сколько-нибудь разумного обоснования применимости этой методики не приводится, а используется тезис: все так делают.
- 3) В предлагаемых нормативных документах не всегда указывается на их рекомендательный характер, сами документы не снабжаются приложениями, в которых в определенной мере обосновываются, объясняются те предложения, формулы, положения, которые закладываются в эти документы. То есть используется старая (СНиПовская) методика построения документов, но если СНиПы опирались на результаты многочисленных экспериментальных исследований, но здесь ничего подобного не наблюдается.
- 4) В России практически отсутствуют экспериментальные, да и теоретические исследования, посвященные проблеме усиления металлических строительных конструкций композитными материалами, хотя в авиации и космонавтике подобные наработки имеются.
- 5) Приведенные в списке литературы публикации (к сожалению, иностранные) могут послужить основой для разработки предварительного варианта нормативного документа по применению композитов для усиления металлических конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников И.Г., Почтман М.Ю. Тонкостенные конструкции в условиях коррозионного износа. Расчет и оптимизация (монография). Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1995. 192 с.
2. Наумова Г.А., Овчинников И.Г. Расчеты на прочность сложных стержневых и трубопроводных конструкций с учетом коррозионных повреждений (монография). СГТУ. Саратов. 2000. 227 с.
3. Наумова Г.А., Овчинников И. Г., Снарский С.В. Расчет трубопроводных конструкций с эксплуатационными повреждениями. Волгоград. Научное издание. ВолГАСУ, 2009. 184 с.
4. Чернявский В.Л., Хаютин Ю.Г., Аксельрод Е.З., Клевцов Н.В., Фаткуллин Н.В. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами. М. 2006. 60 с.
5. Бокарев С.А., Иванов А.А., Смердов Д.Н., Яшнов А.Н., Жильцов П.Д., Максименков П.Е. Инновационные методы усиления конструкций мостов. СибГУПС и ООО Главгросстрой. Новосибирск. 2008. 38 с.
6. ТУ 1916-005-61664530-2011. Углеродные однонаправленные ленты для систем внешнего армирования (СВА). Технические условия. ЗАО «Препрег-СКМ». М. 2011. 24 с.
7. СТО 13613997-001-2011. Стандарт организации. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. ООО «Зика». М. 2011. 55 с.
8. СТО 2236-002-2011. Стандарт организации. Система внешнего армирования из полимерных композитов FibARM для ремонта и усиления строительных конструкций. Общие требования. Технология устройства. ЗАО «Препрег-СКМ». М. 2011. 16 с.
9. Экспертное заключение на СТО 2256-002-2011. «Система внешнего армирования из полимерных композитов FibARM для ремонта и усиления строительных конструкций. Общие требования. Технология устройства. ЗАО «Препрег-СКМ». М. 2011. 16 с.». Филиал ОАО ЦНИИС «НИЦ Мосты». 2011. 5 с.
10. СТО 2256-002-2011. Стандарт организации. Система внешнего армирования из полимерных композитов FibARM R для ремонта и усиления строительных конструкций. ЗАО «Препрег-СКМ» при участии НИИЖБ. М. 2012. 61 с.
11. Залесов А.С., Зенин С.А., Пашанин А.А., Кудинов О.В. Рекомендации по расчету усиления железобетонных конструкций системой внешнего армирования из полимерных композитов FibARM. М. НИИЖБ. 2012. 29 с.
12. Бокарев С.А., Неровных А.А., Бардаев П.П. Руководство по усилению железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов системой внешнего армирования на основе углеродных волокон. Первая редакция. ОАО «Российские железные дороги». М. 2012. 60 с.
13. Свод правил. Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами. Первая редакция. ОАО «НИЦ «Строительство»-НИИЖБ им.А.А.Гвоздева, ЗАО «Триада-Холдинг». М. 2012. 61 с.
14. Concrete Engineering Series 23»Recommendation For Design And Construction Of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials, Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials», Tokyo, 1997. Japan Society of Civil Engineers (JSCE). 325 p.

15. Design Manual «Seismic Retrofitting Design and Construction Guidelines for Existing Reinforced Concrete (RC) Buildings with FRP Materials». Japan Building Disaster Prevention Association (JBDPA). Tokyo, Japan, (1999), 115 p.
16. FIP Task Group 9.3 - FRP reinforcement in RC structures, 1999. Fib CEB-FIP
17. ACI 440.3R-04 - Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures. American Concrete Institute (ACI). Farmington Hills, Mich., (2004), 40 p.
18. CNR-DT 203/2006 - Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars, 2006. Consiglio Nazionale Delle Ricerche.
19. ACI 440R-07 “Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures,” ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., (2007), 100p.
20. 440.2R-08 - Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. American Concrete Institute (ACI)
21. Design Manual No. 3, «Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers», Intelligent Sensing for Innovative Structures Canada Corporation, Winnipeg, Manitoba, Canada, (2001), 158 p.
22. CAN/CSA-S806-02 - Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers. Canadian Standards Association (CSA). Toronto, Ontario, Canada, (2007), 218p.
23. ACI 440.4R-04 "Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons (Reapproved 2011)," ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., (2004), 35p.
24. fib Bulletin No. 40, “FRP Reinforcement in RC Structures”, International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland, (2007), 160p.
25. CNR-DT 203/2006 «Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars». ROME – CNR, 2007. 39 p.
26. CNR-DT 202/2005 «Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures». Metallic structures. Preliminary study. ROME – CNR, 2007. 57 p.
27. CNR-DT 200/2004 «Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures». Materials, RC and PC structures, masonry structures. ROME – CNR, 2004. 154 p.
28. CNR-DT 201/2005 «Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures». Timber structures. Preliminary study. ROME – CNR, 2007. 58 p.
29. Al-Saidy, A.H, Klaiber, F.W. and Wipf, T.J. (2004), “Repair of Steel Composite Beams with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Plates,” ASCE Journal of Composites for Construction, 8, pp. 163-172.
30. Angus, C.C., Cheng, J.J. and Yam, C.H. “Study of the Tensile Strength of CFRP/Steel Double Lap Joints,” Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Calgary, Canada. 2004.
31. de Bruyne, N.A. (1944), “The Strength of Glued Joints”, Aircraft Engineering, 16, 115-118, 140.

32. Frauenberger, A., Liu, X., Meyyappan, L., Mata, J., Gupta, T., Silva, P.F., Dagli, C.H., Pottinger, H.J., Nanni, A. and Marianos, W.N. Jr. (2003), "FRP Repair and Health Monitoring of Railroad Steel Bridges", CIES Report 03-44, University of Missouri, Rolla.
33. Gillespie, J. W., Mertz, D. R., Edberg, W. M., Ammar, N., Kasai, K., and Hodgson, I. C. 1996. Rehabilitation of Steel Bridge Girders through Applications of Composite Materials. In Proc., 28th International SAMPE Technical Conference, November 4-7.
34. Hart-Smith, L.J. (2001), "Bolted and Bonded Joints", in Composites, Vol. 21, ASM Handbook, American Society for Materials (ASM) International, 271-289.
35. Hollaway L.C., Cadei J. (2002). Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites. Prog. Struct. Engng. Mater., 4, 131-148.
36. Kennedy, G.D. (1998), "Repair of Cracked Steel Elements Using Composite Fibre Patching," M.S. Thesis, University of Alberta, Canada
37. Lanier, B.K. (2005), "Study in the Improvement in Strength and Stiffness Capacity of Steel Multi-sided Monopole Towers Utilizing Carbon Fiber Reinforced Polymers as a Retrofitting Mechanism," M.S. Thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC
38. Liu, X., Silva, P., Nanni, A. 2001. Rehabilitation of Steel Bridge Members with FRP Composite Material. In Proc., CCC 2001, Composite in Construction, Porto, Portugal, 10-12 October, edited by J. Figueras, L. Juvandes and R. Furia. Eds.
39. Matta, F. (2003), "Bond between Steel and CFRP Laminates for Rehabilitation of Metallic Bridges", Thesis, University of Padova, Padova, Italy, 171 pp.
40. Mertz, D.R., and Gillespie, J.W. Jr (1996), "Rehabilitation of Steel Bridge Girders through the Application of Advanced Composite Materials," IDEA Project Final Report, Contract NCHRP-93-ID011, Transportation Research Board, 30 pp.
41. Mertz, D.R., Gillespie, J.W. Jr. and Edberg, W. (1996), "Rehabilitation of Steel Bridges with Composite Materials", Recent Advances in Bridge Engineering, Evaluation, Management and Repair, J.R. Casas, F.W. Klaiber and A.R. Marí, eds., CIMNE, Barcelona, Spain, 556-569.
42. Mertz, D. M., Gillespie, J. W., and Edberg, W. 1996. Rehabilitation of Steel Bridges with Composite Materials. In Proc., Recent Advances in Bridge Engineering, Barcelona.
43. Mosallam, A. S., Chakrabarti, P. R., and Spencer, E. 1998. Experimental Investigation on the Use of Advanced Composites & High-Strength Adhesives in Repair of Steel Structures. In 43rd International SAMPE Symposium May 31- June 4.
44. Moy, S. S. J., Nikoukar, F. 2002. Flexural Behaviour of Steel Beams Reinforced with Carbon Fibre Reinforced Polymer Composite. In Proc., ACIC 2002, Southampton University, UK, 15-17 April, edited by R. A. Shenoi, S. S. J. Moy, L. C. Hollaway. Thomas Telford.
45. Nozaka, K., Shield, C.K. and Hajjar, J.F. (2005), "Effective Bond Length of Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Strips Bonded to Fatigued Steel Bridge I-Girders," ASCE Journal of Composites for Construction, 10[2], pp. 195-205.
46. Ono, K., Sugiura, K., Sasaki, A., Wakahara, N. and Komaki, H. (2001), "Bond Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Plastics to Structural Steels" Proc. Int. Conf. on High Performance Materials in Bridges, Kona, Hawaii, ASCE, Reston, VA, 34-43.

47. Photiou, N., Hollaway, L.C., Chryssanthopoulos, M.K. (2004). Strengthening of an artificially degraded steel beam utilising a carbon/glass composite system. In L.C. Hollaway, M.K. Chryssanthopoulos and S.S.J. Moy (eds), Proc. Int. Conf., Advanced Polymer Composites for structural applications in construction ACIC 2004, 20-22 April 2004, Guilford UK. Cambridge, England: Woohed Publishing Limited.
48. Schnerch D., Stanford K., Sumner E.A., Rizkalla S. (2004). Strengthening steel structures and bridges with high modulus carbon fiber reinforced polymers: resin selection and scaled monopole behaviour. TRB 2004 Annual Meeting, CD-ROM.
49. Sebastian, W.M. (2003), "Nonlinear Influence of Contraflexure Migration on Near-curtailment Stresses in Hyperstatic FRP-Laminated Steel Members," Computers and Structures, 81[16], pp. 1619-1632.
50. Sen, R. and Liby L. (1994), "Repair of Steel Composite Bridge Sections using CFRP Laminates", Final Report submitted to the Florida Department of Transportation (FDOT), University of South Florida, Tampa, FL.
51. Sen, R., Liby, L., Mullins, G. 2001. Strengthening Steel Bridge Sections Using CFRP Laminates, Composites: Part B, 32: from 309-322.
52. Tavakkolizadeh A., Saadatmanesh H. (2003a). Repair of damaged steel-concrete composite girders using carbon fiber-reinforced polymer sheets. Journal of Composites for Construction, 7(4), November 1, 311-322.
53. Tavakkolizadeh, M., Saadatmanesh, H. 2001. Repair of Cracked Steel Girder Using CFRP Sheets. In Proc., ISEC-01, Creative Systems in Structural and Construction Engineering, Hawaii, January 24-27.
54. Tavakkolizadeh, M., Saadatmanesh, H. 2002. Repair of Steel Bridges with CFRP Plates. In Proc., ACIC 2002, Southampton University, UK, 15-17 April, edited by R. A. Shenoj, S. S. J. Moy, L. C. Hollaway. Thomas Telford.- Tavakkolizadeh, M. and Saadatmanesh, H. (2003), "Strengthening of Steel-Concrete Composite Girders Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Sheets," ASCE Journal of Structural Engineering, 129, pp. 30-40.
55. Vatovec, M., Kelley, P.L., Brainerd, M.L. and Kivela, J.B. (2002), "Post Strengthening of Steel Members with CFRP", Proceedings of the 47th International SAMPE Symposium and Exhibition, Long Beach, CA, May 12-16, 2002, Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE), pp. 941-954.
56. Albrecht, P. (1987), "Fatigue Strength of Adhesively Bonded Cover Plates," ASCE Journal of Structural Engineering, 113, pp. 1236-1250.
57. Bassetti, A., Nussbaumer, A., Hirt, M. 2000. Crack Repair and Fatigue Life Extension of Riveted Bridge Members using Composite Materials. In Proc., Bridge Engineering Conference, ESE-IABSE-FIB, 26-30 March 2000, Sharm El Sheik (Egypt).
58. Bassetti, A. 2001. Lamelles Précontraintes en Fibres de Carbone pour le Renforcement de Ponts Rivetés Endammées Endommagés par Fatigue. Ph.D. Thesis no. 2440, Swiss Federal Institute of Technology, (EPFL), Lausanne, Switzerland.
59. Jones, S.C. and Civjan, S.A. (2003), "Application of Fiber Reinforced Polymer Overlays to Extend to Steel Fatigue Life," ASCE Journal of Composites for Construction, 7, pp. 331-338.
60. Matta, F., Karbhari, V.M., Tinazzi, D., Vitaliani, R. Static and fatigue behaviour of steel/CFRP adhesive bonds for the rehabilitation of metallic bridges. In Di Tommaso A, editor. Mechanics of masonry structures strengthened with FRP – materials modelling, testing, design, control, Padova (I): Libreria Cortina; 2004, p. 411-420.

61. Miller, T.C. (2000), "The Rehabilitation of Steel Bridge Girders Using Advanced Composite Materials", M.S. Thesis, University of Delaware, Newark, DE, 58-79.
62. Nussbaumer, A., Bassetti, A., Colombi, P. Elements en acier sous charges de fatigue renforcés par des lamelles precontraintes en materiau composite. *Construction Metallique* 2004; 3:3-13.
63. Tavakkolizadeh, M., and Saadatmanesh, H. 2003. Fatigue Strength of Steel Girders Strengthened With Carbon Fiber Reinforced Polymer Patch, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 2(129): from 186-196.
64. Buyukozturk, O., Gunes, O. and Karaca, E. (2004), "Progress on Understanding Debonding Problems in Reinforced Concrete and Steel Members Strengthened Using FRP Composites", *Construction and Building Materials*, Vol. 18[1], 9-19.
65. Buyukozturk, O., Gunes, O., Karaca, E. (2003). Progress on Understanding Debonding Problems in reinforced Concrete and Steel Members Strengthened using FRP Composite. In Proc., 10th International Conference and Exhibition London, UK, 1-3 July.
66. Colombi, P., Panzeri, N., Poggi, C. Experimental characterization of steel elements reinforced by adhesively bonded CFRP plates. In: Chryssanthopoulos M, Hollaway LC, editors. *Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction*, Abington (UK): Woodhead Publishing Limited; 2004, p. 245-257.
67. Colombi, P., Bassetti, A. and Nussbaumer, A. (2003), "Analysis of Cracked Steel Members Reinforced by Pre-Stress Composite Patch", *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 26(1), 59-66.
68. Colombi, P., Bassetti, A., Nussbaumer, A. (2003). Delamination Effects on Cracked Steel Members Reinforced by Prestressed Composite Patch, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Elsevier, 39: from 61-71.
69. Deng J., Lee M.M.K., Moy S.S.J. (2004). Stress analysis of steel beams reinforced with a bonded CFRP plate. *Composite Structures*, Vol. 65, 205-215.
70. Lenwari, A., Thepchatri, T. and Watanabe, E. (2002), "Prediction of Premature Separation of Bonded CFRP Plates from Strengthened Steel Beams Using a Fracture Criterion", *Structural Engineering and Mechanics*, 14(5), pp. 565-574.
71. McKnight, S. H., Bourban, P. E., Karbhari, V. M., and Gillespie, J. W. 1994. Surface Preparation of Steel for Adhesive Bonding in Rehabilitation Applications. In Proc. Of the Third Materials Engineering Conference, Infrastructure: New Materials and Methods of Repair, edited by Basham KD. San Diego, CA: ASCE.
72. Photiou, N., Hollaway, L.C., Chryssanthopoulos, M.K. (2003). Characterization of adhesively bonded plates for upgrading structural steelwork. In M.C. Forde (ed.), Proc. Int. Conf., Structural Faults and Repair, London. Edinburgh: Engineering Technics Press.
73. Carolin, A. 2003. Carbon Fiber Reinforced Polymers for Strengthening of Structural Elements. Doctoral Thesis no. 2003:18, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
74. Cecchi A., Zerbo V. 2004. Analisi di stabilità di travi metalliche rinforzate con FRP-materials. In 2nd Nat. Symp. Mechanics of Masonry Structures strengthened with FRP-materials: modeling, testing, design, control", Venezia, 6-8 Dicembre, edited by Ceriolo L., Zerbo V. Libreria internazionale Cortina:Padova.
75. Hill P. S. 2000. Use of High Modulus Carbon Fibers for Reinforcement of Cast Iron Compression Struts within London Underground – Project Details.

76. Liu, X., Nanni, A., Silva, P. 2003. Rehabilitation of Steel Bridge Columns with Composite Materials. In Proc., 10th International Conference and Exhibition London, UK, 1-3 July 2003.
77. Shaat, A. and Fam, A. (2004), "Strengthening of Short HSS Steel Columns Using FRP Sheets," Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Calgary, Canada.
78. Teng J.G., Hu Y.M. 2004. Suppression of local buckling in steel tubes by FRP jacketing in FRP Composites in civil Engineering, CICE 2004, Seracino ed., Taylor & Francis Group, London 2005.
79. Aylor, D.M. (1993), "The Effect of a Seawater Environment on the Galvanic Corrosion Behaviour of Graphite/Epoxy Composites Coupled to Metals", High Temperature and Environmental Effects on Polymeric Composites, ASTM STP 1174, C.E. Harris and T.S. Gates, eds., American Society for Testing and Materials (ASTM), pp. 81-94.
80. Bellucci, F. (1991), "Galvanic Corrosion between Nonmetallic Composites and Metals: I. Effect of Metal and of Temperature", Corrosion, National Association of Corrosion Engineers (NACE), 47(10), pp. 808-819.
81. Bellucci, F. (1992), "Galvanic Corrosion between Nonmetallic Composites and Metals: II. Effect of Area Ratio and Environmental Degradation", Corrosion, National Association of Corrosion Engineers (NACE), 48(4), pp. 281-291.
82. Bonk, R.B., Ostendorf, J.F., Ambrosio, A.M., Pettenger, B.L. and Froelich, K.A. (1996), "Evaluation of Adhesives for Adhering Carbon/Epoxy Composites to Various Metallic Substrates", Proceedings of the 41st International SAMPE Symposium and Exhibition, Anaheim, CA, March 24-28, 1996, Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE), pp. 1472-1485.
83. Boyd, J., Chang, G., Webb, W., Speak, S., Gerth, D. and Reck, B. (1991), "Galvanic Corrosion Effects on Carbon Fiber Composites", Proceedings of the 36th International SAMPE Symposium and Exhibition, San Diego, CA, April 15-18, 1991, Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE), pp. 1217-1231.
84. Bourban, P.E., McKnight, S.H., Shulley, S.B., Karbhari, V.M. and Gillespie, J.W. Jr., (1994), "Durability of Steel/Composite Bonds for Rehabilitation of Structural Components," Proceedings of the 1994 ASCE Materials Engineering Conference, San Diego, CA, pp. 295-302.
85. Ceriolo, L., Di Tommaso, A. (2001). Cast Iron Bridge Failure Due to Impact: reduced Vulnerability through FRP Composite Materials Strengthening. In National Conf. on Structure failures and reliability of civil constructions, Istituto Universitario di Architettura di Venezia, 6 – 7 December.
86. Colombi P, Fanesi E, Fava G, Poggi C. Steel elements strengthened by FRP materials: durability under mechanical and environmental loads. In Di Tommaso A, editor. Mechanics of masonry structures strengthened with FRP – materials modelling, testing, design, control, Padova (I): Libreria Cortina; 2004, p. 387-398.
87. Gettings, M. and Kinloch, A.J. (1977), "Surface Analysis of Polysiloxane/Metal Oxide Interfaces", Journal of Materials Science, 12(12), pp. 2511-2518.
88. Karbhari, V. M., and Shulley, S. B. 1995. Use of Composites for Rehabilitation of Steel Structures – Determination of Bond Durability, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 4(7): from 239-245.

89. Moy, S. S. J. 2002. Early Age Curing under Cyclic Loading – an Investigation into Stiffness Development in Carbon Fibre Reinforced Steel Beams. In Proc., ACIC 2002, Southampton University, UK, 15-17April, edited by R. A. Shenoi, S. S. J. Moy, L. C. Hollaway. Thomas Telford.
90. Rajagopalan, G., Immordino, K.I. and Gillespie, J.W. Jr. (1996), “Adhesive Selection Methodology for Rehabilitation of Steel Bridges with Composite Materials”, Proceedings of the American Society for Composites 11th Technical Conference, Atlanta, GA, October 7-9, 1996, Technomic, pp. 222-230.
91. Shulley, S.B., Huang, X., Karbhari, V.M. and Gillespie, J.W. Jr., (1994) “Fundamental Considerations of Design and Durability in Composite Rehabilitation Schemes for Steel Girders With Web Distress,” Proceedings of the 1994 ASCE Materials Engineering Conference, San Diego, CA, pp. 1187-1194.
92. Tavakkolizadeh, M., and Saadatmanesh, H. 2001. Galvanic Corrosion of Carbon and Steel in Aggressive Environment, Journal of Composites for construction, ASCE, 3(5): from 200-210.
93. Tucker, W. C., and Brown, R. 1989. Blister Formation on Graphite/Polymer Composites Galvanically Coupled with Steel in Seawater, Journal of composite Composite Materials, ASCE Technomic, 4(23): from 227-238389-395.
94. Tucker, W.C., Brown, R. and Russell, L. (1990), “Corrosion between a Graphite/Polymer Composite and Metal”, Journal of Composite Materials, Technomic, 24(1), pp. 92-102.
95. Wetzel, E. (1995), “Assessment of Heating Techniques for Metal to Composite Bonding in Infrastructure Rehabilitation”, B.S. Thesis, University of Delaware, Newark, DE.
96. West, T.D. (2001), “Enhancements to the Bond between Advanced Composite Materials and Steel for Bridge Rehabilitation,” M.S. Thesis, University of Delaware (U.S.A.), pp. 16-85.

Рецензент: Кочетков Андрей Викторович, председатель Поволжского отделения Российской академии транспорта, академик РАТ, д-р. техн. наук, профессор.

Ilya Ovchinnikov

Yuri Gagarin state technical university of Saratov
Moscow state automobile & road technical university (Sochi branch)
Russia, Saratov, Sochi
E-Mail: bridgeart@mail.ru

Igor Ovchinnikov

Perm national research polytechnic university
Russia, Perm
E-Mail: bridgesar@mail.ru

Georgij Chesnokov

«Scientific Research Institute Grafit» Enterprise of state corporation «Rosatom»
Russia, Moscow
E-Mail: gchesnokov@niigrafit.org

Dauren Tatiyev

Yuri Gagarin state technical university of Saratov
Russia, Saratov
E-Mail: daur_t90@mail.ru

Konstantin Pokulaev

Volga Railway - branch of JSC "Russian Railways"
Russia, Saratov
E-Mail: sam_iskenderov@bk.ru

Strengthening of metal structures with fiber reinforced plastic: Part 1. State of the problem

Annotation. The article is devoted to the analysis of the problem of the use of composite materials to strengthen building structures.

Notes that Russia is currently intensively use of composite materials (fiber reinforced plastics) to strengthen reinforced concrete and prestressed concrete structures.

It is shown that in the experimental and theoretical work devoted to the problem strengthen of concrete structures. There are a number of guidelines, recommendations, standards organizations and national regulations on the use of composites to strengthen of concrete structures.

The article presents data as Russian and foreign regulations and guidelines on the use of composite materials to strengthen building structures. Indicates that almost all of them focused on the issue of use fiber reinforced plastics to strengthen reinforced concrete and reinforced concrete structures.

Overwhelmingly they rely on foreign regulations and foreign experimental and theoretical studies. To calculate them are encouraged to use a technique of limiting states, but any reasonable justification for the applicability of this technique is not given.

The proposed regulations are not always indicated on their recommendation, the documents are not supplied with applications that are justified , those sentences formula, provisions that are laid in these documents. In Russia, there are practically no experimental and theoretical studies of the problem of strengthening metal building constructions with composite materials. Listed in the bibliography of foreign publications can serve as a basis for the development of a preliminary version of a regulation on the use of composites for strengthening steel structures.

Keywords: strengthening; composites; fiber reinforced plastics; carbon fiber; metal structures; regulatory documents; concrete; rebar.

Identification number of article 19TVN314

REFERENCES

1. Ovchinnikov I.G., Pochtman M.Ju. Tonkostennye konstrukcii v uslovijah korrozionnogo iznosa. Raschet i optimizacija (monografija). Dnepropetrovsk: Izd-vo DGU, 1995.192 s.
2. Naumova G.A., Ovchinnikov I.G. Raschety na prochnost' slozhnyh sterzhnevnyh i truboprovodnyh konstrukcij s uchetom korrozionnyh povrezhdenij (monografija). SGTU. Saratov.2000. 227 s.
3. Naumova G.A., Ovchinnikov I. G., Snarskij S.V. Raschet truboprovodnyh konstrukcij s jekspluatacionnymi povrezhdenijami. Volgograd. Nauchnoe izdanie. VolgGASU, 2009. 184 s.
4. Chernjavskij V.L., Hajutin Ju.G., Aksel'rod E.Z., Klevcov N.V., Fatkullin N.V. Rukovodstvo po usileniju zhelezobetonnyh konstrukcij kompozitnymi materialami. M. 2006. 60 s.
5. Bokarev S.A., Ivanov A.A., Smerdov D.N., Jashnov A.N., Zhil'cov P.D., Maksimenkov P.E. Innovacionnye metody usilenija konstrukcij mostov. SibGUPS i OOO Glavgrosstroj. Novosibirsk. 2008. 38 s.
6. TU 1916-005-61664530-2011. Uglерodnye odnonapravlennye lenty dlja sistem vneshnego armirovanija (SVA). Tehnicheskie uslovija. ZAO «Prepreg-SKM».M. 2011. 24 s.
7. STO 13613997-001-2011. Standart organizacii. Usilenie zhelezobetonnyh konstrukcij kompozitnymi materialami. OOO «Zika». M. 2011. 55 s.
8. STO 2236-002-2011. Standart organizacii. Sistema vneshnego armirovanija iz polimernyh kompozitov FibARM dlja remonta i usilenija stroitel'nyh konstrukcij. Obshhie trebovanija. Tehnologija ustrojstva. ZAO «Prepreg-SKM».M. 2011. 16 s.
9. Jekspertnoe zakljuchenie na STO 2256-002-2011. «Sistema vneshnego armirovanija iz polimernyh kompozitov FibARM dlja remonta i usilenija stroitel'nyh konstrukcij. Obshhie trebovanija. Tehnologija ustrojstva. ZAO «Prepreg-SKM».M. 2011. 16 s.» Filial OAO CNIIS «NIC Mosty». 2011. 5 s.
10. STO 2256-002-2011. Standart organizacii. Sistema vneshnego armirovanija iz polimernyh kompozitov FibARM R dlja remonta i usilenija stroitel'nyh konstrukcij. ZAO «Prepreg-SKM» pri uchastii NIIZhB.M. 2012. 61 s.
11. Zalesov A.S., Zenin S.A., Pashhanin A.A., Kudinov O.V. Rekomendacii po raschetu usilenija zhelezobetonnyh konstrukcij sistemoj vneshnego armirovanija iz polimernyh kompozitov FibARM. M. NIIZhB. 2012. 29 s.
12. Bokarev S.A., Nerovnyh A.A., Bardaev P.P. Rukovodstvo po usileniju zhelezobetonnyh proletnyh stroenij zhelezodorozhnyh mostov sistemoj vneshnego armirovanija na osnove uglерodnyh volokon. Pervaja redakcija. OAO «Rossijskie zheleznye dorogi». M. 2012.60 c.
13. Svod pravil. Usilenie zhelezobetonnyh konstrukcij kompozicionnymi materialami. Pervaja redakcija. OAO «NIC «Stroitel'stvo»-NIIZhB im.A.A.Gvozdeva, ZAO «Triada-Holding». M. 2012. 61 s.
14. Concrete Engineering Series 23»Recommendation For Design And Construction Of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials, Research

- Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials», Tokyo, 1997. Japan Society of Civil Engineers (JSCE). 325 p.
15. Design Manual «Seismic Retrofitting Design and Construction Guidelines for Existing Reinforced Concrete (RC) Buildings with FRP Materials». Japan Building Disaster Prevention Association (JBDPA). Tokyo, Japan, (1999), 115 p.
 16. FIP Task Group 9.3 - FRP reinforcement in RC structures, 1999. Fib CEB-FIP
 17. ACI 440.3R-04 - Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures. American Concrete Institute (ACI). Farmington Hills, Mich., (2004), 40p.
 18. CNR-DT 203/2006 - Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars, 2006. Consiglio Nazionale Delle Ricerche.
 19. ACI 440R-07 “Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures,” ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., (2007), 100p.
 20. 440.2R-08 - Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. American Concrete Institute (ACI)
 21. Design Manual No. 3, «Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers», Intelligent Sensing for Innovative Structures Canada Corporation, Winnipeg, Manitoba, Canada, (2001), 158 p.
 22. CAN/CSA-S806-02 - Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers. Canadian Standards Association (CSA). Toronto, Ontario, Canada, (2007), 218p.
 23. ACI 440.4R-04 "Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons (Reapproved 2011)," ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., (2004), 35p.
 24. fib Bulletin No. 40, “FRP Reinforcement in RC Structures”, International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland, (2007), 160p.
 25. CNR-DT 203/2006 «Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars». ROME – CNR, 2007. 39 p.
 26. CNR-DT 202/2005 «Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures». Metallic structures. Preliminary study. ROME – CNR, 2007. 57 p.
 27. CNR-DT 200/2004 «Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures». Materials, RC and PC structures, masonry structures. ROME – CNR, 2004. 154 p.
 28. CNR-DT 201/2005 «Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures». Timber structures. Preliminary study. ROME – CNR, 2007. 58 p.
 29. Al-Saidy, A.H, Klaiber, F.W. and Wipf, T.J. (2004), “Repair of Steel Composite Beams with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Plates,” ASCE Journal of Composites for Construction, 8, pp. 163-172.

30. Angus, C.C., Cheng, J.J. and Yam, C.H. "Study of the Tensile Strength of CFRP/Steel Double Lap Joints," Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Calgary, Canada. 2004.
31. de Bruyne, N.A. (1944), "The Strength of Glued Joints", Aircraft Engineering, 16, 115-118, 140.
32. Frauenberger, A., Liu, X., Meyyappan, L., Mata, J., Gupta, T., Silva, P.F., Dagli, C.H., Pottinger, H.J., Nanni, A. and Marianos, W.N. Jr. (2003), "FRP Repair and Health Monitoring of Railroad Steel Bridges", CIES Report 03-44, University of Missouri, Rolla.
33. Gillespie, J. W., Mertz, D. R., Edberg, W. M., Ammar, N., Kasai, K., and Hodgson, I. C. 1996. Rehabilitation of Steel Bridge Girders through Applications of Composite Materials. In Proc., 28th International SAMPE Technical Conference, November 4-7.
34. Hart-Smith, L.J. (2001), "Bolted and Bonded Joints", in Composites, Vol. 21, ASM Handbook, American Society for Materials (ASM) International, 271-289.
35. Hollaway L.C., Cadei J. (2002). Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites. Prog. Struct. Engng. Mater., 4, 131-148.
36. Kennedy, G.D. (1998), "Repair of Cracked Steel Elements Using Composite Fibre Patching," M.S. Thesis, University of Alberta, Canada
37. Lanier, B.K. (2005), "Study in the Improvement in Strength and Stiffness Capacity of Steel Multi-sided Monopole Towers Utilizing Carbon Fiber Reinforced Polymers as a Retrofitting Mechanism," M.S. Thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC
38. Liu, X., Silva, P., Nanni, A. 2001. Rehabilitation of Steel Bridge Members with FRP Composite Material. In Proc., CCC 2001, Composite in Construction, Porto, Portugal, 10-12 October, edited by J. Figueras, L. Juvandes and R. Furia. Eds.
39. Matta, F. (2003), "Bond between Steel and CFRP Laminates for Rehabilitation of Metallic Bridges", Thesis, University of Padova, Padova, Italy, 171 pp.
40. Mertz, D.R., and Gillespie, J.W. Jr (1996), "Rehabilitation of Steel Bridge Girders through the Application of Advanced Composite Materials," IDEA Project Final Report, Contract NCHRP-93-ID011, Transportation Research Board, 30 pp.
41. Mertz, D.R., Gillespie, J.W. Jr. and Edberg, W. (1996), "Rehabilitation of Steel Bridges with Composite Materials", Recent Advances in Bridge Engineering, Evaluation, Management and Repair, J.R. Casas, F.W. Klaiber and A.R. Marí, eds., CIMNE, Barcelona, Spain, 556-569.
42. Mertz, D. M., Gillespie, J. W., and Edberg, W. 1996. Rehabilitation of Steel Bridges with Composite Materials. In Proc., Recent Advances in Bridge Engineering, Barcelona.
43. Mosallam, A. S., Chakrabarti, P. R., and Spencer, E. 1998. Experimental Investigation on the Use of Advanced Composites & High-Strength Adhesives in Repair of Steel Structures. In 43rd International SAMPE Symposium May 31- June 4.
44. Moy, S. S. J., Nikoukar, F. 2002. Flexural Behaviour of Steel Beams Reinforced with Carbon Fibre Reinforced Polymer Composite. In Proc., ACIC 2002, Southampton University, UK, 15-17 April, edited by R. A. Sheno, S. S. J. Moy, L. C. Hollaway. Thomas Telford.

45. Nozaka, K., Shield, C.K. and Hajjar, J.F. (2005), "Effective Bond Length of Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Strips Bonded to Fatigued Steel Bridge I-Girders," *ASCE Journal of Composites for Construction*, 10[2], pp. 195-205.
46. Ono, K., Sugiura, K., Sasaki, A., Wakahara, N. and Komaki, H. (2001), "Bond Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Plastics to Structural Steels" *Proc. Int. Conf. on High Performance Materials in Bridges*, Kona, Hawaii, ASCE, Reston, VA, 34-43.
47. Photiou, N., Hollaway, L.C., Chryssanthopoulos, M.K. (2004). Strengthening of an artificially degraded steel beam utilising a carbon/glass composite system. In L.C. Hollaway, M.K. Chryssanthopoulos and S.S.J. Moy (eds), *Proc. Int. Conf., Advanced Polymer Composites for structural applications in construction ACIC 2004*, 20-22 April 2004, Guilford UK. Cambridge, England: Woohead Publishing Limited.
48. Schnerch D., Stanford K., Sumner E.A., Rizkalla S. (2004). Strengthening steel structures and bridges with high modulus carbon fiber reinforced polymers: resin selection and scaled monopole behaviour. *TRB 2004 Annual Meeting*, CD-ROM.
49. Sebastian, W.M. (2003), "Nonlinear Influence of Contraflexure Migration on Near-curtailment Stresses in Hyperstatic FRP-Laminated Steel Members," *Computers and Structures*, 81[16], pp. 1619-1632.
50. Sen, R. and Liby L. (1994), "Repair of Steel Composite Bridge Sections using CFRP Laminates", Final Report submitted to the Florida Department of Transportation (FDOT), University of South Florida, Tampa, FL.
51. Sen, R., Liby, L., Mullins, G. 2001. Strengthening Steel Bridge Sections Using CFRP Laminates, *Composites: Part B*, 32: from 309-322.
52. Tavakkolizadeh A., Saadatmanesh H. (2003a). Repair of damaged steel-concrete composite girders using carbon fiber-reinforced polymer sheets. *Journal of Composites for Construction*, 7(4), November 1, 311-322.
53. Tavakkolizadeh, M., Saadatmanesh, H. 2001. Repair of Cracked Steel Girder Using CFRP Sheets. In *Proc., ISEC-01, Creative Systems in Structural and Construction Engineering*, Hawaii, January 24-27.
54. Tavakkolizadeh, M., Saadatmanesh, H. 2002. Repair of Steel Bridges with CFRP Plates. In *Proc., ACIC 2002*, Southampton University, UK, 15-17 April, edited by R. A. Sheno, S. S. J. Moy, L. C. Hollaway. Thomas Telford.- Tavakkolizadeh, M. and Saadatmanesh, H. (2003), "Strengthening of Steel-Concrete Composite Girders Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Sheets," *ASCE Journal of Structural Engineering*, 129, pp. 30-40.
55. Vatovec, M., Kelley, P.L., Brainerd, M.L. and Kivela, J.B. (2002), "Post Strengthening of Steel Members with CFRP", *Proceedings of the 47th International SAMPE Symposium and Exhibition*, Long Beach, CA, May 12-16, 2002, Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE), pp. 941-954.
56. Albrecht, P. (1987), "Fatigue Strength of Adhesively Bonded Cover Plates," *ASCE Journal of Structural Engineering*, 113, pp. 1236-1250.
57. Bassetti, A., Nussbaumer, A., Hirt, M. 2000. Crack Repair and Fatigue Life Extension of Riveted Bridge Members using Composite Materials. In *Proc., Bridge Engineering Conference, ESE-IABSE-FIB*, 26-30 March 2000, Sharm El Sheik (Egypt).

58. Bassetti, A. 2001. *Lamelles Précontraintes en Fibres de Carbone pour le Renforcement de Ponts Rievetés Endammaées Endommagés par Fatigue*. Ph.D. Thesis no. 2440, Swiss Federal Institute of Technology, (EPFL), Lausanne, Switzerland.
59. Jones, S.C. and Civjan, S.A. (2003), “Application of Fiber Reinforced Polymer Overlays to Extend to Steel Fatigue Life,” *ASCE Journal of Composites for Construction*, 7, pp. 331-338.
60. Matta, F., Karbhari, V.M., Tinazzi, D., Vitaliani, R. Static and fatigue behaviour of steel/CFRP adhesive bonds for the rehabilitation of metallic bridges. In Di Tommaso A, editor. *Mechanics of masonry structures strengthened with FRP – materials modelling, testing, design, control*, Padova (I): Libreria Cortina; 2004, p. 411-420.
61. Miller, T.C. (2000), “The Rehabilitation of Steel Bridge Girders Using Advanced Composite Materials”, M.S. Thesis, University of Delaware, Newark, DE, 58-79.
62. Nussbaumer, A., Bassetti, A., Colombi, P. Elements en acier sous charges de fatigue renforcés par des lamelles precontraintes en materiau composite. *Construction Metallique* 2004; 3:3-13.
63. Tavakkolizadeh, M., and Saadatmanesh, H. 2003. Fatigue Strength of Steel Girders Strengthened With Carbon Fiber Reinforced Polymer Patch, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2(129): from 186-196.
64. Buyukozturk, O., Gunes, O. and Karaca, E. (2004), “Progress on Understanding Debonding Problems in Reinforced Concrete and Steel Members Strengthened Using FRP Composites”, *Construction and Building Materials*, Vol. 18[1], 9-19.
65. Buyukozturk, O., Gunes, O., Karaca, E. (2003). Progress on Understanding Debonding Problems in reinforced Concrete and Steel Members Strengthened using FRP Composite. In Proc., 10th International Conference and Exhibition London, UK, 1-3 July.
66. Colombi, P., Panzeri, N., Poggi, C. Experimental characterization of steel elements reinforced by adhesively bonded CFRP plates. In: Chryssanthopoulos M, Hollaway LC, editors. *Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction*, Abington (UK): Woodhead Publishing Limited; 2004, p. 245-257.
67. Colombi, P., Bassetti, A. and Nussbaumer, A. (2003), “Analysis of Cracked Steel Members Reinforced by Pre-Stress Composite Patch”, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 26(1), 59-66.
68. Colombi, P., Bassetti, A., Nussbaumer, A. (2003). Delamination Effects on Cracked Steel Members Reinforced by Prestressed Composite Patch, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Elsevier, 39: from 61-71.
69. Deng J., Lee M.M.K., Moy S.S.J. (2004). Stress analysis of steel beams reinforced with a bonded CFRP plate. *Composite Structures*, Vol. 65, 205-215.
70. Lenwari, A., Thepchatri, T. and Watanabe, E. (2002), “Prediction of Premature Separation of Bonded CFRP Plates from Strengthened Steel Beams Using a Fracture Criterion”, *Structural Engineering and Mechanics*, 14(5), pp. 565-574.
71. McKnight, S. H., Bourban, P. E., Karbhari, V. M., and Gillespie, J. W. 1994. Surface Preparation of Steel for Adhesive Bonding in Rehabilitation Applications. In Proc. Of the Third Materials Engineering Conference, Infrastructure: New Materials and Methods of Repair, edited by Basham KD. San Diego, CA: ASCE.

72. Photiou, N., Hollaway, L.C., Chryssanthopoulos, M.K. (2003). Characterization of adhesively bonded plates for upgrading structural steelwork. In M.C. Forde (ed.), Proc. Int. Conf., Structural Faults and Repair, London. Edinburgh: Engineering Technics Press.
73. Carolin, A. 2003. Carbon Fiber Reinforced Polymers for Strengthening of Structural Elements. Doctoral Thesis no. 2003:18, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
74. Cecchi A., Zerbo V. 2004. Analisi di stabilità di travi metalliche rinforzate con FRP-materials. In 2nd Nat. Symp. Mechanics of Masonry Structures strengthened with FRP-materials: modeling, testing, design, control“, Venezia, 6-8 Dicembre, edited by Ceriolo L., Zerbo V. Libreria internazionale Cortina:Padova.
75. Hill P. S. 2000. Use of High Modulus Carbon Fibers for Reinforcement of Cast Iron Compression Struts within London Underground – Project Details.
76. Liu, X., Nanni, A., Silva, P. 2003. Rehabilitation of Steel Bridge Columns with Composite Materials. In Proc., 10th International Conference and Exhibition London, UK, 1-3 July 2003.
77. Shaat, A. and Fam, A. (2004), “Strengthening of Short HSS Steel Columns Using FRP Sheets,” Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Calgary, Canada.
78. Teng J.G., Hu Y.M. 2004. Suppression of local buckling in steel tubes by FRP jacketing in FRP Composites in civil Engineering, CICE 2004, Seracino ed., Taylor & Francis Group, London 2005.
79. Aylor, D.M. (1993), “The Effect of a Seawater Environment on the Galvanic Corrosion Behaviour of Graphite/Epoxy Composites Coupled to Metals”, High Temperature and Environmental Effects on Polymeric Composites, ASTM STP 1174, C.E. Harris and T.S. Gates, eds., American Society for Testing and Materials (ASTM), pp. 81-94.
80. Bellucci, F. (1991), “Galvanic Corrosion between Nonmetallic Composites and Metals: I. Effect of Metal and of Temperature”, Corrosion, National Association of Corrosion Engineers (NACE), 47(10), pp. 808-819.
81. Bellucci, F. (1992), “Galvanic Corrosion between Nonmetallic Composites and Metals: II. Effect of Area Ratio and Environmental Degradation”, Corrosion, National Association of Corrosion Engineers (NACE), 48(4), pp. 281-291.
82. Bonk, R.B., Ostendorf, J.F., Ambrosio, A.M., Pettenger, B.L. and Froelich, K.A. (1996), “Evaluation of Adhesives for Adhering Carbon/Epoxy Composites to Various Metallic Substrates”, Proceedings of the 41st International SAMPE Symposium and Exhibition, Anaheim, CA, March 24-28, 1996, Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE), pp. 1472-1485.
83. Boyd, J., Chang, G., Webb, W., Speak, S., Gerth, D. and Reck, B. (1991), “Galvanic Corrosion Effects on Carbon Fiber Composites”, Proceedings of the 36th International SAMPE Symposium and Exhibition, San Diego, CA, April 15-18, 1991, Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE), pp. 1217-1231.
84. Bourban, P.E., McKnight, S.H., Shulley, S.B., Karbhari, V.M. and Gillespie, J.W. Jr., (1994), “Durability of Steel/Composite Bonds for Rehabilitation of Structural

- Components,” Proceedings of the 1994 ASCE Materials Engineering Conference, San Diego, CA, pp. 295-302.
85. Ceriolo, L., Di Tommaso, A. (2001). Cast Iron Bridge Failure Due to Impact: reduced Vulnerability through FRP Composite Materials Strengthening. In National Conf. on Structure failures and reliability of civil constructions, Istituto Universitario di Architettura di Venezia, 6 – 7 December.
 86. Colombi P, Fanesi E, Fava G, Poggi C. Steel elements strengthened by FRP materials: durability under mechanical and environmental loads. In Di Tommaso A, editor. Mechanics of masonry structures strengthened with FRP – materials modelling, testing, design, control, Padova (I): Libreria Cortina; 2004, p. 387-398.
 87. Gettings, M. and Kinloch, A.J. (1977), “Surface Analysis of Polysiloxane/Metal Oxide Interfaces”, Journal of Materials Science, 12(12), pp. 2511-2518.
 88. Karbhari, V. M., and Shulley, S. B. 1995. Use of Composites for Rehabilitation of Steel Structures – Determination of Bond Durability, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 4(7): from 239-245.
 89. Moy, S. S. J. 2002. Early Age Curing under Cyclic Loading – an Investigation into Stiffness Development in Carbon Fibre Reinforced Steel Beams. In Proc., ACIC 2002, Southampton University, UK, 15-17April, edited by R. A. Shenoi, S. S. J. Moy, L. C. Hollaway. Thomas Telford.
 90. Rajagopalan, G., Immordino, K.I. and Gillespie, J.W. Jr. (1996), “Adhesive Selection Methodology for Rehabilitation of Steel Bridges with Composite Materials”, Proceedings of the American Society for Composites 11th Technical Conference, Atlanta, GA, October 7-9, 1996, Technomic, pp. 222-230.
 91. Shulley, S.B., Huang, X., Karbhari, V.M. and Gillespie, J.W. Jr., (1994) “Fundamental Considerations of Design and Durability in Composite Rehabilitation Schemes for Steel Girders With Web Distress,” Proceedings of the 1994 ASCE Materials Engineering Conference, San Diego, CA, pp. 1187-1194.
 92. Tavakkolizadeh, M., and Saadatmanesh, H. 2001. Galvanic Corrosion of Carbon and Steel in Aggressive Environment, Journal of Composites for construction, ASCE, 3(5): from 200-210.
 93. Tucker, W. C., and Brown, R. 1989. Blister Formation on Graphite/Polymer Composites Galvanically Coupled with Steel in Seawater, Journal of composite Composite Materials, ASCE Technomic, 4(23): from 227-238389-395.
 94. Tucker, W.C., Brown, R. and Russell, L. (1990), “Corrosion between a Graphite/Polymer Composite and Metal”, Journal of Composite Materials, Technomic, 24(1), pp. 92-102.
 95. Wetzel, E. (1995), “Assessment of Heating Techniques for Metal to Composite Bonding in Infrastructure Rehabilitation”, B.S. Thesis, University of Delaware, Newark, DE.
 96. West, T.D. (2001), “Enhancements to the Bond between Advanced Composite Materials and Steel for Bridge Rehabilitation,” M.S. Thesis, University of Delaware (U.S.A.), pp. 16-85.