

УДК 624.042

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 2. Применение метода предельных состояний к расчету растягиваемых и изгибаемых конструкций

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

Аннотация. Рассматривается методика расчета металлических конструкций, усиливаемых фиброармированными пластиками с помощью метода предельных состояний. Приведены основные положения, которыми следует руководствоваться при проектировании различных схем усиления металлических конструкций. Приведены значения частных коэффициентов надежности для усиливаемой конструкции, материала усиления (фиброармированного пластика) и адгезива. Также приведены значения коэффициентов надежности для разных моделей деформирования металлических элементов конструкций, коэффициент условий работы и коэффициент, учитывающий длительные эффекты. Рассмотрена методика расчета усиливаемых пластиками металлических конструкций, как в поврежденном (например, от коррозии), так и в неповрежденном состоянии. Также рассмотрена задача расчета усиления фиброармированными пластиками изгибаемых металлических элементов. При расчете рассмотрено пять возможных схем разрушения усиливаемой пластиком изгибаемой балки: разрушение от растяжения в усиливаемой балке; разрушение от растяжения фиброармированного пластика; местное выпучивание усиливаемой балки; расслоение фиброармированного пластика; разрушение от сдвига.

При анализе напряженно-деформированного состояния металлических балок, усиленных фиброармированным пластиком, и подвергающихся изгибу используются допущения: имеет место идеальное сцепление металлической балки и усиливающей системы из фиброармированного пластика; сечения, плоские до деформации, остаются плоскими после деформации, но поворачиваются, оставаясь перпендикулярными к срединной линии; толщина усиливающей системы из фиброармированного пластика считается пренебрежимо малой по сравнению с высотой сечения; влияние жесткости адгезивного (клеевого) слоя на жесткость изгибаемого элемента пренебрежимо мало. Рассмотрены особенности выполнения усиления металлических конструкций композитами, требования к мониторингу в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: усиление; композиты; фиброармированные пластики; металлические конструкции; расчет; проектирование; мониторинг.

Идентификационный номер статьи в журнале 20TVN314

1. Введение

В статье [1] рассмотрен ряд нормативных документов и руководств по применению композитов для усиления строительных конструкций. Показано, что в подавляющем большинстве они относятся к усилению бетонных и железобетонных конструкций. Разработок, относящихся к усилению металлических и деревянных конструкций фиброармированными пластиками (ФАП) весьма мало. Причем качественные отечественные исследования, посвященные проблеме усиления металлических строительных конструкций композитными материалами, практически отсутствуют, и потому при разработке проблемы усиления металлических конструкций композитными материалами приходится опираться на зарубежный опыт и теоретические и экспериментальные исследования. Поэтому ниже рассмотрим основы методики проектирования и расчетного анализа усиления металлических строительных конструкций с использованием фиброармированных пластиков.

Основные положения, которыми следует руководствоваться при проектировании различных схем усиления металлических конструкций [2,3,4,5]:

- 1) Основные цели усиления металлических конструкций фиброармированными полимерами (ФАП): увеличение или восстановление прочности на растяжение; увеличение или восстановление изгибной прочности; увеличение усталостной прочности.
Недавно проведенные исследования также свидетельствуют о возможности увеличения или восстановления несущей способности тонкостенных элементов, работающих на сжатие. Однако количество таких исследований недостаточно для того, чтобы разработать достаточно надежную процедуру проектирования.
- 2) Усиление металлических элементов производится с помощью ламинатов, полученных пултрузией, или пропитанных холстов, приклеиваемых к наружной поверхности конструктивных элементов.
- 3) Правильно запроектированное усиление должно обеспечивать появление только растягивающих напряжений в элементах усиления. При этом усиливающие элементы будут полностью включены в работу в дополнение к растянутому усиливаемому элементу. Применение композитного усиления в сжатых зонах не рекомендуется в связи с отсутствием адекватных расчетных схем для анализа возможного эффекта отслоения под действием сжимающих напряжений.
- 4) Состояние металлических конструкций, усиленных композитами, и подвергающихся действию циклических напряжений, включая термические циклы, может с течением времени ухудшаться. Для уменьшения возможности такого разрушения в зоне упрочнения могут устанавливаться дополнительные связи.
- 5) Усиление композитами может применяться для конструктивных элементов с соответствующими характеристиками. Если усиливаемый элемент (подложка) подвергся коррозии, то оксиды (ржавчина) должны быть полностью удалены, а поверхность усиливаемого элемента должна быть очищена.
- 6) Элементы усиления должны быть подобраны с учетом условий эксплуатации (температура, влажность, ультрафиолетовое облучение, и т.д.), которым они будут подвергаться. При этом следует избегать возможности появления гальванических токов.
- 7) В случае усиления композитами элементов, чувствительных к усталости, а также при использовании технологии предварительного напряжения следует

учитывать возможность появления ползучести адгезива (клеящего состава). В определенных случаях может использоваться комбинированное металло - композитное соединение.

- 8) Усиление композитами эксплуатируемых металлических конструкций можно производить только тогда, когда усиливаемая конструкция находится в предельном состоянии при расчетном сочетании нагрузок с учетом коэффициентов надежности для особых случаев нагружения.
- 9) При проектировании усиления необходимо учитывать возможное случайное повреждение или разрушение композитной арматуры в процессе выполнения работ по усилению, а также возможное повреждение защиты.
- 10) При усилении конструктивных элементов сооружений, имеющих историческую ценность, следует учитывать необходимость такого усиления и полную совместимость усиления с усиливаемой конструкцией. Требования восьмого положения в этом случае не применимы.

2. О применении расчета по предельным состояниям или метода частных коэффициентов надежности

Согласно ГОСТ 27751 «Надежность строительных конструкций и оснований» строительные конструкции и основания следует рассчитывать по методу предельных состояний, основные положения которого должны быть направлены на обеспечение безотказной работы конструкций и оснований с учетом изменчивости свойств материалов, грунтов, нагрузок и воздействий, геометрических характеристик конструкций, условий их работы, а также степени ответственности (и народнохозяйственной значимости) проектируемых объектов, определяемой материальным и социальным ущербом при нарушении их работоспособности.

Сейчас метод предельных состояний утвержден и в ИСО и Еврокодах, при этом используется более корректное название «метод частных коэффициентов надежности», что сразу объясняет структуру метода.

Ниже рассмотрим применение этого метода, как наиболее простого и требующего значительно меньше экспериментальной информации для проведения расчетов металлических конструкций, усиливаемых композитами по сравнению с расчетом по деформационной модели. Хотя определенные некорректности при использовании методики расчета по предельным состояниям, особенно применительно к железобетонным конструкциям имеются [6,7,8,9].

При изложении материала используются результаты работ [3,10-16].

2.1. Частный коэффициент надежности для материала усиливаемой металлической конструкции (подложки) (γ_s)

В общем случае, частный коэффициент надежности для пластичного металла (сталь, «старое» железо) отличается от частного коэффициента надежности для хрупкого металла (чугун). В случае хрупких металлов, с учетом последствий разрушения должны быть приняты более высокие значения частных коэффициентов надежности.

При расчете металлических конструкций их хрупких металлов обычно применяется метод расчета по «допускаемым напряжениям» (то есть рассматривается упругая стадия работы).

*2.2. Частные коэффициенты надежности
для фиброармированного пластика, используемого для усиления (γ_f)*

Частные коэффициенты надежности для ФАП зависят как от метода установки усиления, так и от качества выполнения работ по усилению.

В табл. 1 приведены значения частных коэффициентов для предельного состояния.

Таблица 1

Частные коэффициенты надежности γ_f для предельного состояния

Случай А	Случай В
1,10	1,25

Случай А - усиливаемая система с сертификацией каждого компонента и всей усиливаемой системы. Случай В – усиливаемые системы с сертификацией только каждого компонента. Для предельных состояний по непригодности к эксплуатации величина частного коэффициента надежности γ_f равна 1.

2.3. Частный коэффициент для адгезива (зоны сцепления) (γ_a)

Частный коэффициент надежности для адгезива, используемого для сцепления композита с подложкой (усиливающего элемента с усиливаемым), зависит от метода усиления и качества выполнения работ. При определении величины частного коэффициента надежности особое внимание следует уделять оценке толщины слоя адгезива. Для случая А толщина адгезива должна контролироваться. Для метода предельных состояний в табл. 2 приведены значения частного коэффициента надежности γ_a для случаев А и В.

Таблица 2

Частные коэффициенты γ_a для предельного состояния

Случай А	Случай В
1, 20	1,50

*2.4. Частные коэффициенты надежности
для различных схем (моделей) деформирования (γ_{Rd})*

Для предельного состояния значения частных коэффициентов надежности γ_{Rd} приведены в табл. 3.

Таблица 3

Частные коэффициенты надежности γ_{Rd}

Схемы деформирования	γ_{Rd}
Изгиб или комбинация изгиба с осевым нагружением	1,00
Сдвиг/кручение	1,00
Расслаивание	1,20
Усталость	1,20

2.5. Учет условий эксплуатации и длительных эффектов

Этот учет выполняется с помощью коэффициента приведения $\eta = \eta_a \cdot \eta_1$.

Коэффициент условий работы η_a (учитывающий влияние окружающей среды).

Механические свойства (например, прочность на растяжение, предельная деформация и модуль Юнга) фиброармированных пластиков ухудшаются под влиянием определенных условий эксплуатации, таких как: щелочная среда, влага (вода и солевые растворы), экстремальные температуры, колебания температуры (термальные циклы), циклы замораживания и оттаивания, влияние ультрафиолетового излучения (УФ).

Влияние щелочной среды. Повреждение такого компонента ФАП, как смола, под влиянием щелочной среды, как правило, более опасно, чем повреждение, вызванное действием влаги. Процесс отверждения смолы должен завершиться до начала воздействия щелочной среды.

Влияние влаги. Основные эффекты, вызываемые абсорбцией влаги смолами, сводятся к следующему: пластификация, снижение температуры стеклования, изменение прочности и жесткости (последнее менее значительно). Абсорбция влаги зависит от типа смолы, состава и качества слоистого ФАП (ламината), толщины, условий отверждения смолы, условий взаимодействия волокон со смолой, и условий эксплуатации. Для морской среды, где осмотические эффекты могут вызывать появление воздушных пузырьков в смоле, рекомендуется использовать защитные покрытия.

Влияние экстремальных температур и термических циклов. Основным эффектом воздействия температуры является вязкость и смолы и композита. По мере повышения температуры, модуль Юнга и жесткость смолы понижаются. Если температура превышает температуру стеклования, то эксплуатационные свойства ФАП значительно снижаются. В общем случае тепловые циклы не оказывают вредного воздействия на композиты, однако они могут вызвать появление микротрещин в материалах, в которых используются смолы с высоким модулем упругости. Для значений температур, характерных для промышленных и гражданских инженерных конструкций, нежелательных эффектов можно избежать подбором ФАП, в которых температура стеклования всегда выше, чем максимальная рабочая температура конструкции или усиливаемого элемента.

Влияние циклов замораживания и оттаивания. В общем случае воздействие замораживания и оттаивания не оказывают влияния на эксплуатационные свойства ФАП, несмотря на то, что эксплуатационные свойства смолы снижаются, а также ухудшается сцепление волокон со смолой. При температурах ниже 0°C , эксплуатационные свойства полимерных систем на основе смолы могут улучшиться из-за повышения прочности и жесткости. Эффекты деградации, вызванные попеременным замораживанием и оттаиванием, могут увеличиться при наличии влаги.

Воздействие ультрафиолетового излучения. Ультрафиолетовое излучение редко ухудшают механические эксплуатационные характеристики ФАП, хотя оно может привести к некоторому охрупчиванию и эрозии поверхности некоторых смол. В общем случае, наиболее вредное воздействие, связанное с УФ - облучением сводится к прониканию влаги и других агрессивных веществ через поврежденную поверхность. Для защиты ФАП от таких повреждений в смолу добавляют специальные наполнители или используют соответствующие покрытия.

В табл. 4 приведены значения коэффициента условий работы η_a в зависимости от типа связи волокно/смола и условий работы. Эти значения являются консервативной оценкой, зависящей от долговечности различных типов волокон. Величины, представленные в таблице,

могут быть увеличены на 10%, если используются защитные покрытия (однако условие $\eta_a < 1$ всегда должно выполняться). Такие покрытия должны быть сохранены на усиливаемой конструкции в течение всего срока службы, они должны быть экспериментально проверены и обеспечивать эффективную защиту композита от воздействия окружающей среды.

Таблица 4

Коэффициент условий работы η_a для различных условий и видов композита

Условия эксплуатации	Тип системы волокно/смола	η_a
Внутри помещений	Стекло/эпоксидная смола	0,75
	Арамид/эпоксидная смола	0,85
	Углерод/эпоксидная смола	0,95
Снаружи	Стекло/эпоксидная смола	0,65
	Арамид/эпоксидная смола	0,75
	Углерод/эпоксидная смола	0,85
В агрессивной среде	Стекло/эпоксидная смола	0,50
	Арамид/эпоксидная смола	0,70
	Углерод/эпоксидная смола	0,85

Коэффициент, учитывающий длительные эффекты (η_1)

Механические свойства (такие как прочность на растяжение, предельная деформация, модуль упругости) ФАП снижаются под влиянием ползучести, релаксации, усталости.

Влияние ползучести и релаксации. Для фиброармированных пластиков (ФАП), используемых для усиления конструкций, эффекты ползучести и релаксации зависят и от смол и от волокон. Как правило, терморезактивные смолы (ненасыщенные полиэферы, виниловые эфиры, эпоксидные и фенольные смолы) обладают меньшей вязкостью, чем термопластичные смолы (полипропилены, нейлоны, поликарбонаты и т.д.). Поскольку наличие волокон снижает ползучесть смол, то такие эффекты обычно более выражены, когда нагрузка прикладывается поперек волокон или когда содержание волокон в ФАП низкое. Ползучесть может быть уменьшена путем создания низких уровней рабочих напряжений. ФАП на основе углепластика, арамида и стекла являются материалами наименее, умеренно и наиболее склонными к разрушению вследствие ползучести.

Влияние усталости. Сопротивление ФАП усталости также должно быть учтено в расчетах. Эта сопротивляемость зависит от состава матрицы и, в определенной мере, от типа волокна. В ФАП, армированных в одном направлении, волокна, как правило, имеют ряд дефектов; поэтому, они могут эффективно задерживать образование трещин. Распространение трещины также предотвращается взаимодействием с соседними волокнами.

Для того, чтобы предотвратить разрушение конструктивных элементов, усиленных ФАП и постоянно находящихся в напряженном состоянии или под действием циклической нагрузки, в расчетах используется коэффициент η_1 , учитывающий длительные эффекты, значения которого приведено в таблице 5.

Таблица 5

Коэффициент η_1 , учитывающий длительные эффекты для различных типов ФАП

Характер нагружения	Тип системы волокно/смола	η_1
Непрерывный (ползучесть и релаксация)	Стекло/эпоксидная смола	0,30
	Арамид/эпоксидная смола	0,50
	Углерод/эпоксидная смола	0,80
Циклический (усталость)	все	0,5

2.6. Действие ударной и взрывной нагрузок

Поведение ФАП под действием ударной нагрузки или взрывного нагружения еще до конца не изучено и не понято. Имеется предварительная информация о том, что арамидные композиты более устойчивы к воздействию ударной нагрузки и/или стеклопластики более устойчивы, чем углепластики.

2.7. Противодействие актам вандализма

ФАП особенно чувствительны к порезам, разрезам, царапинам, нанесенным режущим инструментом. Для защиты конструкций, усиленных ФАП и предназначенных для эксплуатации в общественных местах, где могут проявляться акты вандализма, должны использоваться специальные системы. Безопасность конструктивных элементов должна быть проверена и для случая возможного повреждения усиливающего элемента. Расчет должен проводиться на различные сочетания временных нагрузок с использованием частных коэффициентов надежности для возможных предельных состояний.

2.8. Работа усиливающего элемента в случае пожара

Фиброармированные пластики (ФАП) особенно чувствительны к высоким температурам, которые могут быть во время пожара. Когда температура в помещении превышает температуру стеклования смолы (или температуру плавления в случае частично кристаллических материалов), прочность и жесткость ФАП, использованных для усиления, уменьшается.

В случае, когда ФАП применяются в качестве внешнего армирования стальных элементов, воздействие высокой температуры приводит к быстрому нарушению связи усиливающей и усиливаемой систем. В результате может произойти снижение эффективности усиления и нарушение сцепления ФАП с усиливаемой конструкцией.

Во время воздействия огня, механические свойства усиленных ФАП элементов могут быть улучшены путем увеличения толщины защитных покрытий. Следует использовать покрытия, способные предотвратить распространение пламени, а также выделение дыма. При этом рекомендуется использовать защитные системы покрытий, подтвержденные официальными сертификатами. Технические условия и особенности применения защитных систем покрытий приведены в соответствующих нормативных документах.

3. Усиление растянутых элементов

Рассмотрим задачу усиления растянутых стальных элементов конструкций фиброармированными пластиками. Такое усиление может использоваться для восстановления несущей способности элементов, частично пораженных коррозией (рис. 1), а также для увеличения разрушающей нагрузки неповрежденных элементов (рис. 2).

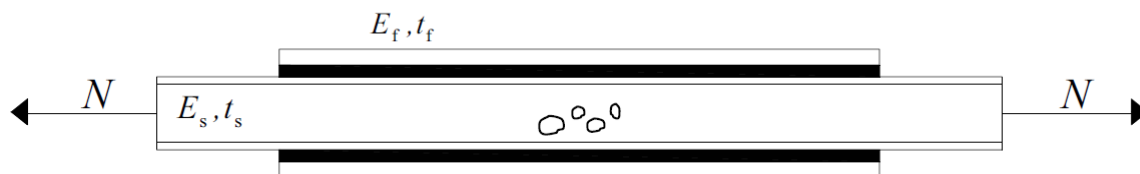


Рис. 1. Растягиваемый стальной частично проржавевший элемент с симметричным внешним армированием

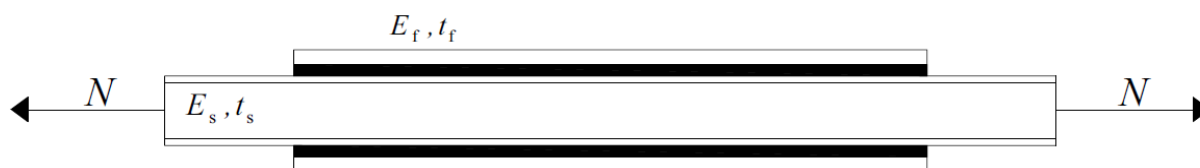


Рис. 2. Неповрежденный растягиваемый элемент с симметричным внешним армированием

В дальнейшем рассматриваем усиление симметричным внешним армированием, так как в этом случае не возникают дополнительные изгибающие моменты. Разрушение растянутых элементов, усиленных ФАП, возможно по следующим схемам:

- разрушение металлической подложки (металлического усиливаемого элемента);
- разрушение внешней фиброармированной арматуры (усиливающих элементов);
- разрушение путем расслаивания ФАП.

Оценка несущей способности усиленного сечения производится на основе следующих гипотез:

- поперечное сечение усиленного элемента, плоское до деформации, остается плоским после деформации;
- обеспечивается идеальное сцепление усиливаемого элемента с арматурой усиления;
- считается, что материал усиливаемого элемента и материал усиления деформируются упруго (материал усиливаемого элемента считается изотропным, а материал усиления – композит, считается ортотропным).

3.1. Восстановление несущей способности повреждённых элементов

С консервативной точки зрения, восстановление несущей способности поврежденных элементов, не подвергающихся усталостным воздействиям, выполняется в предположении, что напряжения через поврежденный участок передаются с помощью усиливающих элементов.

Усиление рассчитывается по формуле:

$$2 \cdot A_f \cdot \frac{f_{fk}}{\gamma_f} \cdot \eta \geq A_s \cdot f_{sk,sup} \quad (1)$$

где: A_f - площадь поперечного сечения усиливающего элемента из ФАП;

f_{fk} - нижнее значение прочности ФАП на растяжение;

γ_f - частный коэффициент надежности армирующего материала (ФАП);

η - коэффициент приведения;

A_s - площадь поперечного сечения усиливаемого металлического элемента;

$f_{sk,sup}$ - верхнее значение предела текучести (f_y) для пластичного материала или предела прочности (f_u) для хрупкого материала.

Заметим, что в (1) частный коэффициент надежности модели γ_{Rd} отсутствует, так как предполагается, что он равен 1. Если более точная информация отсутствует, то верхнее значение предела текучести или предела прочности может быть получено путем умножения номинального значения на 1,35.

3.2. Усиление неповрежденных элементов

Нормальное напряжение σ_s в металлическом усиливаемом элементе с учетом различия в коэффициентах температурного расширения материалов усиливаемого и усиливающего элементов определяется по формуле:

$$\sigma_s = \frac{[N_{Sd} + 2 \cdot E_f \cdot A_f \cdot (\alpha_f - \alpha_s) \cdot \Delta T] \cdot E_s}{2 \cdot E_f \cdot A_f + E_s \cdot A_s} \quad (2)$$

Нормальное напряжение σ_f в усиливающей арматуре будет:

$$\sigma_f = \frac{[N_{Sd} + E_s \cdot A_s \cdot (\alpha_s - \alpha_f) \cdot \Delta T] \cdot E_f}{2 \cdot E_f \cdot A_f + E_s \cdot A_s} \quad (3)$$

где: N_{Sd} - расчетная нагрузка;

E_f и A_f - модуль упругости и площадь поперечного сечения усиливающего элемента;

α_f - коэффициент температурного расширения материала усиления (композита);

α_s - коэффициент температурного расширения материала усиливаемого элемента;

ΔT - изменение температуры после усиления конструкции;

E_s и A_s - модуль упругости и площадь поперечного сечения усиливаемого металлического элемента;

Для усиливаемого элемента требуется выполнение условий:

$$\sigma_s \leq \frac{f_{sk}}{\gamma_s \cdot \gamma_{Rd}} \cdot \eta, \quad (4)$$
$$\sigma_f \leq \frac{f_{fk}}{\gamma_f \cdot \gamma_{Rd}} \cdot \eta$$

где величины f_{fk} , f_{sk} , γ_s , γ_{Rd} , η определены ранее.

4. Усиление изгибаемых элементов

В изгибаемых элементах (балках) могут иметь место следующие схемы разрушения:

- разрушение от растягивающих усилий либо металлической балки (разрушение или достижение предела текучести в зависимости от типа материала) либо ФАП (рис. 3(a) и 3(b));
- разрушение от сжатия металлической балки (наступление текучести или местное выпучивание) (рис. 3(c));
- отслоение ФАП от металлической балки, расслоение внутри ФАП, или расслоение внутри металлической балки;
- разрушение от сдвига путем местного выпучивания в опорных зонах балки;
- общая потеря устойчивости балки (либо вдоль оси, либо поперек с закручиванием).

В любом случае учитываться должна работа ФАП только в растянутой зоне.

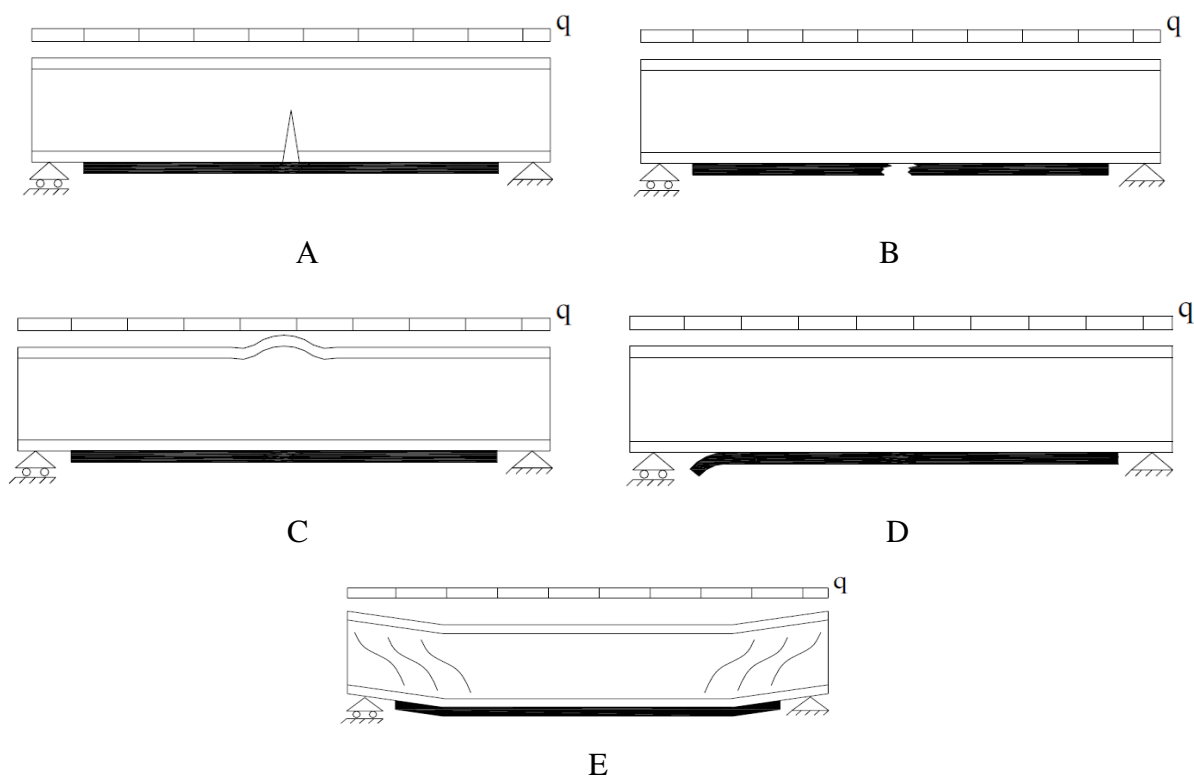


Рис. 3. Схемы разрушения изгибаемой металлической балки, усиленной ФАП. А) разрушение от растяжения в усиливаемой балке; В) разрушение от растяжения ФАП; С) местное выпучивание усиливаемой балки; D) отслоение ФАП; E) разрушение от сдвига

Рассмотрим возможные виды разрушений, а также расчет при разрушении от растяжения, сжатия или отслаивания.

1) Разрушение при растяжении или металлической балки или фиброармированного пластика (ФАП)

Некоторые металлические конструктивные элементы, изготавливаются из чугуна, который является материалом, хрупко разрушающимся при растяжении. В таком случае расчет обычно выполняется на меньшие нормальные напряжения, вызываемые действием постоянных и временных нагрузок с целью повышения сопротивления разрушению на растянутой стороне металлического элемента.

В этом заключается основное отличие от случая упрочнения железобетонных балок, где обычно допускается появление трещин на растягиваемой стороне.

Для случая чугунных балок использование предварительного напряжения ФАП может оказаться полезным, если даже не обязательным решением, так как в этом случае уменьшаются растягивающие напряжения в усиливаемом элементе (подложке) без предварительного уменьшения напряжений, вызываемых действием временной нагрузки.

В случае металлических балок из материала, обладающего пластичностью (кованое железо, сталь) усиление ФАП приводит к уменьшению напряжений в металлической балке от действия эксплуатационных нагрузок (повышает сопротивление усталости), а также увеличивает несущую способность балки, усиленной ФАП, по сравнению с не усиленной (не армированной) балкой, вследствие развития деформационного упрочнения металлической балки благодаря высокой прочности на растяжение ФАП. Фактически, если разрушение ФАП от растягивающих напряжений является хрупким, развитие неупругих деформаций в металлической балке приводит к пластическому деформированию системы усиления до тех пор, пока не произойдет отслоение усиливающего элемента из ФАП.

2) Разрушение от сжатия металлической балки.

Разрушение от сжатия металлической балки может происходить по - разному, в зависимости от материала и формы поперечного сечения. Некоторые металлы, такие как чугун, характеризуются сильной нелинейностью при растяжении, со значительным снижением жесткости при деформировании. В то же время кованое железо и сталь являются чисто пластичными. Если вид зависимости напряжение – деформация известен, то характер разрушения будет определяться формой поперечного сечения.

В самом деле, в зависимости от местной гибкости и соотношения между модулем Юнга и пределом упругости, местная потеря устойчивости может произойти или до или после некоторого неупругого деформирования. Для случая стальных балок в существующих нормативных документах приводятся методики определения характера разрушения при сжатии.

Для литого и кованого железа для установления формы разрушения при сжатии требуются дополнительные исследования. Однако приближенная оценка напряжений, при которых происходит выпучивание, может быть выполнена с использованием классической формулы для металлических балок, с использованием инерционных характеристик однородной балки, эквивалентных характеристикам усиленной балки.

3) Расслаивание

При анализе составного сечения, состоящего из металлической балки и фиброармированного пластика (ФАП) принимается, что между балкой и ФАП имеет место идеальная связь. Понятно, что в реальности все не так, и сцепление ФАП с металлической балкой осуществляется через достаточно тонкий, но конечной толщины деформируемый слой адгезива. На границе между металлической балкой и ФАП, в местах, где нарушается непрерывность связи, возникает сильная концентрация напряжений и деформаций, такая

концентрация имеет место там, где заканчивается слой ФАП или же там, где возникают трещины в металлической балке. Такая концентрация напряжений провоцирует начало разрушения путем отслаивания, что будет более детально рассмотрено далее.

4) Разрушение от сдвига.

Так как усиление изгибаемого элемента предполагает увеличение действующих вертикальных нагрузок, необходимо проверить балку на действие напряжений сдвига и возможность местной потери устойчивости в зоне опирания.

5) Общая потеря устойчивости балки

Составная металло - фиброармированная балка имеет лучшие, по сравнению с чисто металлической балкой, инерционные характеристики. Это позволяет улучшить сопротивляемость усиленной балки общей потери устойчивости.

Расчет металлической балки упрочненной ФАП должен учитывать эффекты усталости. Усталость может наступить не только в металлической балке, но также и в усиливающей конструкции из ФАП и даже в слое адгезива.

5. Основы проектирования

Анализ напряженно-деформированного состояния в поперечном сечении металлической балки, усиленной ФАП, должен выполняться с учетом начального напряженно-деформированного состояния перед усилением. Если конструкция деформируется упруго, то напряжения и деформации в металлической балке находятся суперпозицией напряжений и деформаций, вызываемых нагрузками, действующими до усиления, и возникающих в усиленной ФАП металлической балке от действия нагрузок, приложенных после усиления.

Для проверки предельного состояния начальные напряжения должны суммироваться с напряжениями, возникающими в усиленной ФАП металлической балке после усиления ее с помощью ФАП. В предельном состоянии начальные деформации могут суммироваться с теми, которые возникают в усиленной ФАП металлической балке после наложения усиливающей системы из ФАП.

В случае усиления существующих балочных конструкций, имеющих коррозионные повреждения или повреждения другой природы, геометрические размеры, используемые в расчетах, должны быть определены путем измерения на месте.

Анализ напряженно-деформированного состояния металлических балок, усиленных ФАП, и подвергающихся изгибу проводится с использованием следующих основных допущений:

- имеет место идеальное сцепление (без проскальзывания) металлической балки и усиливающей системы из ФАП;
- сечения, плоские до деформации, остаются плоскими после деформации, но поворачиваются, оставаясь перпендикулярными к срединной линии;
- толщина усиливающей системы из ФАП считается пренебрежимо малой по сравнению с высотой сечения;
- влияние жесткости адгезивного (клеявого) слоя на жесткость изгибаемого элемента пренебрежимо мало.

Первые два допущения давно известны и их смысл понятен. Третье допущение позволяет считать, что толщина слоя ФАП может не учитываться и усиливающая система находится на том же уровне, что и поверхность металлической балки, к которой слой ФАП приклеен. Последнее допущение оправдывается весьма малой величиной модуля упругости адгезива (клея, смолы) по отношению к модулю упругости металла (около 1/100) и малой толщиной адгезионного слоя.

6. Выполнение усиления, мониторинг и эксплуатация

Усиленные фиброармированными пластиками металлические конструкции нуждаются в регулярном контроле и мониторинге, как во время, так и после установки системы усиления, в процессе эксплуатации. В случае конструкций, усиленных с использованием ФАП, такой мониторинг особенно важен, так как надежная информация о долговременном поведении конструкций, усиленных композитными материалами практически отсутствует.

Правильное выполнение работ по усилению конструкций с использованием ФАП зависит от нескольких факторов, среди которых:

- хранение материалов;
- подготовка подложки (поверхности усиливаемого элемента);
- подготовка усиливающих материалов;
- внешние условия (температура, влажность);
- организация работы на месте производства работ (чистота, техника безопасности, меры против наступления несчастных случаев).

Материалы для усиления (фибры, смола, композиты) должны храниться в условиях, требуемых их поставщиками.

Подготовка усиливающих (армирующих) систем должна производиться в строгом соответствии с требованиями поставщика. Например, смола для адгезива часто получается смешиванием двух компонентов, количественное соотношение должно быть в точности таким, как это записано в требованиях поставщика.

Качество сцепления металлических элементов с ФАП может определяться температурно-влажностными условиями. В частности, температура и конструкции и окружающей среды влияет на время, требуемое для достижения заданного уровня прочности адгезионного соединения. Поставщики предоставляют информацию о температурных интервалах, обеспечивающих протекание химических реакций, необходимых для достижения требуемой прочности адгезионного соединения и эти условия должны соблюдаться. Повышенная влажность может неблагоприятно повлиять на конечную прочность адгезионного соединения и его долговечность. Поэтому адгезионный слой должен быть хорошо защищен от попадания в него воды в течение всего времени, необходимого для набора прочности.

Правильная организация работ на рабочем месте также важна для обеспечения хорошего качества системы усиления. В частности, большое внимание должно быть уделено очистке поверхности усиливаемых элементов (подложки), чтобы исключить попадания частиц, которые могут отрицательно повлиять на качество сцепления усиливающего и усиливаемого элементов.

Подготовка поверхности подложки (усиливаемого элемента)

Качественная подготовка поверхности является фундаментальным требованием для обеспечения хорошего сцепления усиливающего композита (ФАП) и металлического усиливаемого элемента (подложки). Подготовка включает обработку поверхности подложки, включающую следующие шаги:

- Удаление имеющегося покрытия (то есть старой краски), шлака и других продуктов коррозии. Эта операция может быть выполнена с использованием проволочных щеток или терок для механического удаления шлака и окалины. Особая осторожность нужна при очистке хрупких элементов (чугуна), следует избегать использования перфораторов и других подобных инструментов.
- Обезжиривание растворителем. Для этого используются специально подобранные подходящие растворители, которые позволяют удалить жир и избежать распространения загрязнения по склеиваемой поверхности.
- Абразивная очистка. Для этого должна применяться сухая или влажная пескоструйная очистка, чтобы поверхность усиливаемого элемента была химически активна перед склеиванием. Весь мусор после очистки должен быть удален с помощью только воды.
- Сушка поверхности. Если поверхность влажная после абразивной очистки и смыва мусора, она должна быть просушена немедленно, чтобы исключить быстрое образование оксидных слоев на очищенной поверхности.
- Химическое травление. В случае формирования оксидных слоев, на оцинкованной или нержавеющей стали, требуется кислотное травление с последующей нейтрализацией продуктов травления. Эта операция не требуется в случае стали и чугуна.
- Нанесение праймера (грунтовки). Первый слой адгезионной смолы должен быть нанесен так быстро, как только возможно сразу же после очистки поверхности подложки, не позднее двух часов после очистки. В некоторых случаях применение праймера требуется для того, чтобы обеспечить совместимость существующей металлической поверхности с наносимым впоследствии композитным материалом (ФАП).
- Заполнение неровностей. Небольшие неровности на поверхности металла могут быть заполнены с использованием праймера и последующего слоя смолы. Значительные неровности, как например, в случае сильно проржавевших участков или сильно искривленных металлических элементов могут быть заполнены с использованием специального слоя смолы.

7. Контроль качества в процессе усиления

Контроль качества в процессе усиления с помощью ФАП может включать частично разрушающие или неразрушающие испытания.

Если используется предварительно отвержденный ФАП, то необходимые испытания композитных материалов должны быть произведены поставщиком. В случае если отверждение ФАП происходит на рабочем месте, то требуются лабораторные испытания. В обоих случаях должны быть подготовлены образцы для оценки прочности против расслаивания.

Для проведения частично разрушающих испытаний должны быть подготовлены дополнительные специальные испытательные зоны (свидетели), усиленные с помощью ФАП. Общая площадь образцов -свидетелей должна быть не менее 0,5% от фактической площади усиления и в любом случае не менее 0,1 м². Зоны, являющиеся образцами свидетелями, разделяются на прямоугольные области размером 500 мм x 200 мм. Система усиления ФАП в этих специальных испытательных зонах должна быть такой же и из тех же материалов, что и фактически работающих зонах усиления. Кроме того, зоны – «свидетели» должны подвергаться таким же воздействиям окружающей среды, что и фактически работающие системы усиления. Если требуется более, чем одна прямоугольная специальная «испытательная» зона, то эти зоны должны быть равномерно распределены по усиливаемой конструкции. В любом случае, зоны – «свидетели» должны быть выбраны таким образом, что последующее проведение полу-разрушающих испытаний не повлияло на поведение усиливаемого элемента.

Частично разрушающие испытания

Частично разрушающие испытания проводятся на образцах – свидетелях, расположенных, по возможности, в некритических зонах усиления, в количестве одного испытания на каждые 5 м² усиленной площади, и, в любом случае, не менее чем 2 испытаний для каждого типа испытаний.

Испытания на растяжение предназначено для оценки правильности подготовки поверхности подложки и для проверки совместимости выбранной адгезионной смолы с металлической подложкой. Испытание проводится с использованием круглой стальной пластины толщиной 20 мм и диаметром не менее 40 мм. Фиброармированный пластик разрезается с помощью колонкового бура, вращающегося со скоростью не менее 2500 оборотов в минуту и особой осторожностью, чтобы избежать нагрева системы усиления из ФАП.

Испытание на сдвиг используется для проверки качества сцепления между ФАП и подложкой. Оно может быть осуществлено только тогда, когда можно извлечь часть ФАП, расположенную близко к краю подложки.

Испытание на кручение проводится с помощью специального устройства, которое может создавать крутящий момент.

Неразрушающие испытания

Существуют различные типы неразрушающих испытаний с целью идентификации различных типов дефектов и повреждений. В частности, неразрушающие испытания используются для идентификации присутствия пустот в адгезионном слое. Однако, к сожалению, нет неразрушающих испытаний, которые позволили бы определить ослабление сцепления ФАП с подложкой из-за наличия коррозионного поражения или жировых пятен на

металлической поверхности. Неразрушающие испытания могут использоваться для оценки однородности прилегания ФАП к двухмерной усиливаемой поверхности с различным пространственным разрешением в зависимости от площади усиления

Композиционные материалы не требуют специальных мер по содержанию. Если слой смолы на поверхности теряется вследствие износа или ухудшения состояния окружающей среды, то его можно заменить с использованием совместимого материала. Существующие металлические конструкции должны подвергаться обычной инспекции и содержанию. В частности, рекомендуется возобновлять краску до потери ею защитных свойств, чтобы избежать в дальнейшем пескоструйной обработки конструкции, что может потребовать соответствующей защиты усиливающих элементов из фиброармированного пластика.

Выводы:

1. Качественные отечественные исследования, посвященные проблеме усиления металлических строительных конструкций композитными материалами, практически отсутствуют, и потому при разработке проблемы усиления металлических конструкций композитными материалами приходится опираться на зарубежный опыт и теоретические и экспериментальные исследования.
2. Основными целями усиления металлических конструкций фиброармированными полимерами являются: увеличение или восстановление прочности на растяжение; увеличение или восстановление изгибной прочности; увеличение усталостной прочности.
3. Отмечается, что применение методики расчета по предельным состояниям в случае усиления металлических конструкций композитными материалами более обоснованно, чем при расчете усиливаемых железобетонных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Чесноков Г.В., Покулаев К.В., Татиев Д.А. О разработке нормативных документов по усилению металлических строительных конструкций композитными материалами// Материалы Международной научно-практической конференции «Инновации и исследования в транспортном комплексе». Курган. 2014.
2. CNR-DT 203/2006 «Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars». ROME – CNR, 2007. 39 p.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Овчинников И.Г., Межнякова А.В. Проблемы, возникающие при расчете железобетонных конструкций транспортных сооружений по методу предельных состояний// Мир дорог. Июль 2008, №35, с. 45-46.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Hollaway L.C., Cadei J. Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites. Prog. Struct. Engng. Mater., 2002, №4, pp.131-148.
11. Deng J., Lee M.M.K., Moy S.S.J. Stress analysis of steel beams reinforced with a bonded CFRP plate. Composite Structures, 2004, Vol. 65, pp. 205-215.
12. Al-Saidy, A.H, Klaiber, F.W. and Wipf, T.J. “Repair of Steel Composite Beams with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Plates,” ASCE Journal of Composites for Construction, 2004, № 8, pp. 163-172.

13. 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.
14. Lenwari, A., Thepchatri, T., Albrecht, P. Flexural Response of Steel Beams Strengthened with Partial-Length CFRP Plates. ASCE J. Comp. Constr. 2005,9(4), 296-303.
15. Accord, N.B. and Earls, C.J. Use of Fiber Reinforced Polymer Composite Elements to Enhance Structural Steel Member Ductility, ASCE J. Comp. Constr.2006/10(4), 337-344.
16. Gopal Rai and Yogesh Indolia. Fiber reinforced polymer composites, a novel way for strengthening structures// National Conference on Repair and Rehabilitation of Concrete Structures Noida, UP, India May 6-7, 2011, pp.2-19.

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 2. Using the method of limit states to calculate bending
and rupture structures**

Annotation. The methodology of calculation of metal structures strengthening fibrealliance plastics using the method of limit states are considered. The basic provisions that should guide the design of various schemes to strengthen steel structures are given. Given values of the partial safety factors for strengthening constructions, material of strengthening (fiber reinforced plastic) and adhesive. Also shows the values of reliability coefficients for different models of deformation of metallic structural elements, service factor and factor taking into account long-term effects. The method of calculating the strengthen metal structures using plastics, both in damage (under corrosion) and intact. Also the problem of the calculation of the bending metal elements strengthen fiber reinforced plastics are considered.

Failure modes occurring in beams are listed: tension failure of either the metallic beam (fracture or yielding depending upon the type of base material) or fiber reinforced plastics, compression failure of the metallic beam (yielding or local buckling), delamination ((i) at the interface between the composite reinforcement and the metallic beam, (ii) inside the composite reinforcement, (iii) inside the metallic beam); shear failure by local buckling at the beam supports; global buckling (either axial or lateral-torsional) of the metallic beam.

Analysis of the stress-strain state of a fiber reinforced plastics strengthened metallic beam and subject to bending moments is carried out on the basis of the following main assumptions: perfect bond (i.e. no slip) between the metallic beam and the fiber reinforced plastics strengthening system; plane sections remain plane after deformation; negligible thickness of the strengthening system with reference to the section depth; negligible contribution of the adhesive layer to the stiffness of the member. The features of the strengthening metal structures using plastics are considered and the requirements to monitoring during operation.

Keywords: strengthening; composites; fiber reinforced plastics; metal structures; analysis; design; monitoring.

Identification number of article 20TVN314

REFERENCES

1. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Chesnokov G.V., Pokulaev K.V., Tatiev D.A. O razrabotke normativnyh dokumentov po usileniju metallicheskih stroitel'nyh konstrukcij kompozitnymi materialami// Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Innovacii i issledovanija v transportnom komplekse». Kurgan. 2014.
2. CNR-DT 203/2006 «Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars». ROME – CNR, 2007. 39 p.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Ovchinnikov I.G., Mezhnjakova A.V. Problemy, vznikajushhie pri raschete zhelezobetonnyh konstrukcij transportnyh sooruzhenij po metodu predel'nyh sostojanij// Mir dorog. Ijul' 2008, №35, s. 45-46.
7. Ovchinnikov I.G., Valiev Sh.N., Ovchinnikov I.I., Zinov'ev V.S., Umirov A.D. Analiz problem usilenija zhelezobetonnyh konstrukcij kompozitnymi materialami//Razvitie transporta v regionah Rossii: problemy i perspektivy. Materialy II Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Kirov. 2012. s. 49-52.
8. Ovchinnikov I.G., Valiev Sh.N., Ovchinnikov I.I., Zinov'ev V.S., Umirov A.D. Voprosy usilenija zhelezobetonnyh konstrukcij kompozitami: 1. Jeksperimental'nye issledovanija osobennostej usilenija kompozitami izgibaemyh zhelezobetonnyh konstrukcij// Internet-zhurnal «Naukovedenie» 2012, № 4, <http://naukovedenie.ru/PDF/13tvn412.pdf>. -M. s. 1- 22.
9. Ovchinnikov I.G., Valiev Sh.N., Ovchinnikov I.I., Zinov'ev V.S., Umirov A.D. Voprosy usilenija zhelezobetonnyh konstrukcij kompozitami: 2. Naturnye issledovanija usilenija zhelezobetonnyh konstrukcij kompozitami, vznikajushhie problemy i puti ih reshenija// Internet-zhurnal «Naukovedenie» 2012, № 4, <http://naukovedenie.ru/PDF/14tvn412.pdf>. -M. s. 1- 37.
10. Hollaway L.C., Cadei J. Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites. Prog. Struct. Engng. Mater., 2002, №4, pp.131-148.
11. Deng J., Lee M.M.K., Moy S.S.J. Stress analysis of steel beams reinforced with a bonded CFRP plate. Composite Structures, 2004, Vol. 65, pp. 205-215.
12. Al-Saidy, A.H, Klaiber, F.W. and Wipf, T.J. “Repair of Steel Composite Beams with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Plates,” ASCE Journal of Composites for Construction, 2004, № 8, pp. 163-172.
13. 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.
14. Lenwari, A., Thepchatrri, T., Albrecht, P. Flexural Response of Steel Beams Strengthened with Partial-Length CFRP Plates. ASCE J. Comp. Constr. 2005,**9**(4), 296-303.
 15. Accord, N.B. and Earls, C.J. Use of Fiber Reinforced Polymer Composite Elements to Enhance Structural Steel Member Ductility, ASCE J. Comp. Constr.2006/10(4), 337-344.
 16. Gopal Rai and Yogesh Indolia.Fiber reinforced polymer composites, a novel way for strengthening structures// National Conference on Repair and Rehabilitation of Concrete Structures Noida, UP, India May 6-7, 2011, pp.2-19.