

УДК 624.014:624.074.7:624.953

ПРОБЛЕМЫ УСИЛЕНИЯ СТЕНОК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

Дзюба С.В., Стоянов В.В. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

THE PROBLEMS OF WALL STRENGTHENING OF METALLIC CYLINDRICAL VERTICAL RESERVOIRS

Dzyuba S.V., Stoyanov V.V. (Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa)

Рассматриваются особенности существующего в Украине парка металлических вертикальных цилиндрических резервуаров, анализируются причины и характер износа их стенок, а также традиционные методы усиления, предлагается концепция возможного усиления с использованием высокопрочных фибропластиковых материалов

Ключевые слова: металлические цилиндрические вертикальные резервуары, методы усиления стенок резервуаров, фибропластиковые системы

The characteristics of the Ukrainian metallic vertical cylindrical reservoirs are examined, the causes and ways of the wall destructions, and also the traditional methods of wall strengthening, are analyzed, the rehabilitation conception with the use of high-strength fiber reinforced materials is offered

Keywords: metallic cylindrical vertical reservoirs, methods of wall strengthening of reservoirs, fiber reinforced polymer (FRP) systems

Настоящая статья продолжает серию работ [1-13], рассматривающих усиление металлических конструкций фиброармированными пластиками, выполненных на кафедре Металлических, деревянных и пластмассовых конструкций Одесской государственной академии строительства и архитектуры.

Существующий парк резервуаров. Парк вертикальных металлических резервуаров в Украине весьма обширен. Являясь основными сооружениями для хранения нефти и различных нефтепродуктов, цилиндрические резервуары по состоянию на начало 2000-х годов по различным оценкам насчитывали в стране 17...20 тысяч штук с общим

весом конструкций около 1 млн. тонн и вместимостью порядка 15,0...18,0 млн. м³, из которых более 360 штук, с общим весом стали порядка 85 тыс. тонн, характеризовались емкостями 2000...50000 м³ [14]. Сложившаяся отечественная техническая практика предусматривает довольно продолжительные сроки фактической эксплуатации резервуаров: по состоянию на тот же период времени около 75% из их числа находились в работе более 20 лет, что превышает нормативных срок службы, а 40% (общей вместимостью порядка 6 млн. тонн) — более 30 лет. В настоящее же время ситуация только усугубилась.

Длительная эксплуатация листовых конструкций является одной из основных причин, определяющих их физический износ и сопутствующую аварийность. В этой связи показательными являются статистические данные аварий, происходящих с резервуарами, расположенными на территории Российской Федерации [15] (возведенными по аналогичным проектам и отличающимися той же культурой изготовления, монтажа и эксплуатации, что и отечественные), в соответствии с которыми в среднем в течение года с подобными сооружениями происходит 4 серьезных аварии, составляющих 7% общего числа регистрируемого их количества. При этом в период 1980...2000 годов среди данных аварий было насчитано 46 случаев полного или частичного разрушения резервуаров [16].

Характер и причины износа стенок резервуаров. Основной причиной физического износа стенок резервуаров малой и средней вместимости (до 5000 м³) является коррозия [14, 17]. Средняя скорость ее реального проявления в большинстве случаев составляет около 0,015 мм/год (при стандарте 0,0037 мм/год), а в отдельных случаях, например при хранении сероводородсодержащей нефти или легких бензинов плотностью 750 кг/м³ и меньше, может достигать до 0,5 мм/год, имея тенденцию к кратному повышению в локальных зонах.

Даже при относительно небольших средних скоростях коррозии, малые толщины стенок подобных резервуаров, составляющие преимущественно 4...10 мм, способствуют существенной повреждаемости длительно эксплуатируемых конструкций. Результаты статистической оценки [14] свидетельствуют, что общий коррозионный износ стенок отечественных цилиндрических резервуаров в среднем может быть определен в пределах от 4%, для конструкций эксплуатируемых 10...20 лет, до 12%, для сооружений, находящихся в эксплуатации более 40 лет. Кроме того, современные исследования [18, 19] указывают на то, что коррозия тонкостенных листовых элементов кроме уменьшения их толщин ведет и к существенному снижению прочности используемого металла.

Обычно проблема прочностного отказа цилиндрических резервуаров, обусловленного коррозионными воздействиями, актуальна для сооружений вместимостью 1000 м³ и более. Проведенный анализ надежности эксплуатации [14] показывает, что после 20 лет службы их дальнейшее использование сопряжено с повышенными рисками, а после 30 лет — требует понижения проектного уровня наполнения.

Работоспособность стенок металлических резервуаров больших размеров (емкостью более 5000 м³) в значительно меньшей степени определяется коррозией, так как их более значимая толщина приводит к меньшим относительным утратам материала. Однако для таких конструкций гораздо более сложную проблему составляет усталость используемого металла. При среднем количестве заполнений и сливов резервуаров, составляющем 10⁴...10⁵ циклов, проявляются усталостные трещины в местах концентрации напряжений. Одним из таких наиболее критических мест является вертикальный стык рулонированных листов стенки, где при толщинах листов, превышающих 12 мм, вследствие геометрических несовершенств появляются значительные по величине местные изгибающие моменты [20, 21].

Накопленный опыт эксплуатации резервуаров большой вместимости показывает, что заложенные в их проектах предпосылки, определяющие равнопрочность совмещенного в одну линию по всей высоте стенки монтажного стыка с аналогичным заводским, на практике не подтверждаются. Результаты технической диагностики данных монтажных соединений в отечественных резервуарах [21], построенных из рулонированных заготовок с толщиной стали нижних поясов стенки, составляющей 16 мм и более, демонстрируют их низкое качество, обуславливаемое недопустимо большими угловыми деформациями и значительными смещениями кромок, резко снижающими работоспособность сооружений. Уже после 15...20 лет эксплуатации, т.е. 5×10³ ... 10⁴ рабочих циклов, в большей части подобных вертикальных стыков зарождаются усталостные трещины [22]. Интенсивный их рост наблюдается при сочетании угловой деформации сварного соединения с низким качеством сварки и смещением свариваемых кромок. При практически monopольном положении рулонного способа изготовления отечественных резервуаров и длительном отсутствии альтернативы в виде изготовления стенки из отдельных листов, это со временем стало причиной аварийного состояния большого количества сооружений, работающих в режиме интенсивного малоциклового (1...2 цикла налива-слива в сутки) нагружения [23].

Полученные при расследовании аварий резервуаров данные позволяют сделать вывод о том, что потеря устойчивости берегов дефекта

— вертикальной трещины в нижнем поясе резервуаров, при действии гидростатического давления наступает уже при его длине, превышающей 1000 мм [24].

Аварии, связанные с разрушением вертикальных сварных стыков полотнищ стенки резервуаров, особенно опасны, поскольку потенциально способны вести к лавинообразному разрушению сооружений (см. рис. 1), как это имело место на резервуаре №3 Одесской нефтебазы, когда при аналогичных дефектах корпус был вскрыт вдоль стыка по всей высоте и смещен вытекающим потоком более чем на 30 м, а ударная волна жидкости значительно повредила близлежащие объекты [14].

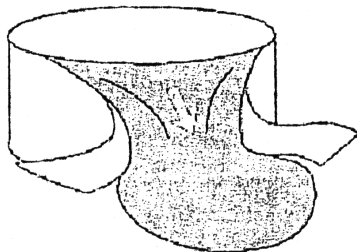


Рис. 1. Разрушение корпуса резервуара по схеме «бурный поток» [14]

Традиционные методы усиления стенок резервуаров. Ремонтные работы, проводимые на стенках стальных цилиндрических резервуаров, кроме устранения отдельных локальных повреждений, обычно преследуют следующие основные цели: обеспечивают герметичность, препятствуют коррозии и восстанавливают утраченную в ее следствии несущую способность, а также исключают развитие наиболее опасных дефектов, связанных с усталостным разрушением стыковых соединений листовых элементов.

Методы, обеспечивающие герметичность стенок резервуаров, традиционно сводятся к использованию сварки или эпоксидных составов [25]. Наиболее эффективным средством борьбы с протечками является сварка. Для ее выполнения обычно резервуары приходится надолго выводить из эксплуатации: сливать, дегазировать, зачищать от скопившейся на дне грязи (составляющей в крупных резервуарах сотни тонн), производить последующую пропарку, а также выполнять жесткие требования по пожарной защите аналогичных близлежащих сооружений. Подобный технологический процесс сопряжен с существенными материальными затратами и надолго выводит резервуары из эксплуатации. Не смотря на то, что в настоящее время уже разработаны способы, позволяющие производить герметизацию швов сваркой без вывода из эксплуатации резервуаров, хранящих некоторые виды нефтепродуктов (например, метод, описанный в [24]), используются они

относительно не часто, во многом ограничиваются правилами производства огневых работ, а также требуют определенного изменения технологии производства, предусматривая последовательные циклы повышения, а затем и понижения верхнего уровня налива резервуаров.

Устранение дефектов герметичности без применения сварки в основном предполагает использование различных эпоксидных составов [25], что в значительной мере упрощает технологию подобных работ и обычно не требует полного вывода сооружений из эксплуатации. В этом случае герметизация дефектных мест осуществляется с наружной стороны конструкции без дегазации резервуаров, но требует понижения уровня хранимого продукта ниже уровня производства работ. В зависимости от размеров дефектов традиционные способы подобной заделки предусматривают нанесение составов, как без армирования, так и с использованием слоев армирующих тканей (стекловолоконных, бязи и др.). При этом достигаемый эффект ограничивается герметизацией, вопрос повышения прочности конструкций обычно не рассматривается.

Проблема борьбы с коррозией стенок резервуара, решаемая широко распространенными лакокрасочными методами защиты [26], сохраняет свою актуальность, во многих случаях ограничивая ресурс работоспособности конструкций. К числу наиболее эффективных современных методов борьбы с этим процессом и способам «пассивного» усиления стенок цилиндрических резервуаров, увеличивающим степень надежности сооружений и в незначительной мере повышающим их комплексную несущую способность, в настоящее время относят системы толсто пленочного (2...3 мм) эпоксидосодержащего покрытия, включающего слои стекловолокна [27, 28]. Такие системы, размещаемые на внутренних поверхностях корпусов резервуаров и обычно называемые «стакан в стакане», позволяют перекрывать пораженные коррозией места нижних поясов наливных сооружений, в том числе и имеющие сквозные отверстия, значительно продлевая срок их службы. Действенно защищая от процесса коррозии, данные системы не являются результативными при силовом усилении.

Коррозия нижних поясов стенок цилиндрических резервуаров, характеризующаяся группами раковин глубиной до 1,5...2,0 мм, переходящая в сплошные полосы и точечные углубления осповидного типа, обычно заставляет применять радикальные методы усиления, сводящиеся к последовательной замене их отдельными участками, имеющими длину до 3000 мм и ширину, превышающую зону дефектов не менее чем на 100 мм [25, 29]: дефектные области вырезаются и затем с наружной стороны резервуара подгоняются нахлесточные полосовые

накладки, свариваемые между собой встык, а со стенкой — внахлестку (рис. 2). К обычным ограничениям технологий производства сварочных работ на стенках резервуаров в этих случаях добавляется необходимость гидравлических испытаний наливом воды до расчетного уровня. Устанавливаемые нахлесточные накладки, являясь потенциальными концентраторами местных напряжений, неспособны значительно продлевать сроки эксплуатации сооружений, находящихся в режимах малоцикловых нагрузений, приводя к процессам усталости металла сварных швов и прилегающих к ним зон стенки. Напряженное состояние соединений и самих накладок осложняется усадкой выполняемых сварных швов и сопутствующими остаточными напряжениями, приводя в отдельных случаях к появлению выпуклостей в нижних, наиболее нагруженных зонах стенки резервуара.

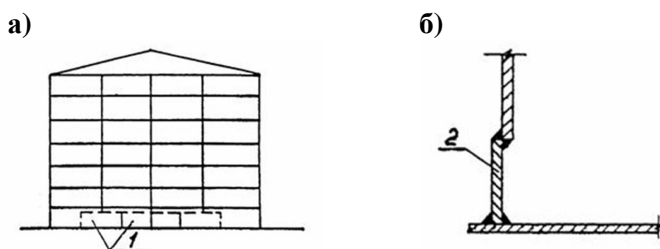


Рис. 3. Замена поврежденных коррозией нижних поясов стенок цилиндрических резервуаров [25, 29]: а — положение дефектных мест, б — варка накладок; 1 — размечаемые границы усиливаемых участков, 2 — листовая накладка

При равномерном коррозионном износе в пределах нижних четырех поясов стенки эксплуатируемых резервуаров, не превышающем 20% от первоначальной толщины ее листов, с целью восстановления несущей способности может производиться бандажирование [25, 29, 30], выполняемое в резервуарах полистовой и рулонной сборки разъемными стальными кольцами, состоящими из 4...6 полос, стянутых резьбовыми соединениями. В зависимости от коррозионного износа металла и геометрических сечений стальных полос на сооружения устанавливаются 10...20 усиливающих колец. Бандажирование отдельными, отстоящими друг от друга кольцами, вызывает появление местных изгибающих моментов, действующих в направлении вертикальной оси резервуара, приводя к комплексу проблем, связанных как с возможной усталостью материала и сопутствующим трещинообразованием в горизонтальных, совмещенных в одну линию сварных швах, так и к воз-

можному появлению признаков потери местной устойчивости прокорродировавших участков стенки. Дальнейшая эксплуатация сооружений, усиленных таким образом и прошедших необходимые гидравлические испытания, также имеет свои особенности [31].

Наиболее опасными дефектами стенок металлических цилиндрических резервуаров являются усталостные трещины вертикальных стыковых соединений листовых элементов. Задача повышения надежности вертикальных стыков рулонированных стенок резервуаров большой вместимости, подверженных усталостному разрушению, является актуальной уже более 35 лет [32]. Первоначально, в качестве меры ее решения, предлагалась система усиления стенок с геометрическими дефектами в виде существенных угловых искривлений, провоцирующих появление местных напряжений и усталость сварных швов, предусматривавшая установку на части длины стыков различных горизонтальных ребер жесткости, зависящих от величин угловых несовершенств и уменьшающих напряженное состояние сварных соединений [33], что отчасти снижало остроту проблемы. Более поздним альтернативным вариантом решения стал дифференцированный подход к количеству циклов нагружения резервуаров, увязывавший величины угловых деформации с допустимым количеством последовательных наливов-сливов этих сооружений [34, 35]. В нормативные документы были введены таблицы, позволявшие определять остаточный ресурс конструкций в виде количества допустимых циклов эксплуатации, зависящих от величин угловых деформаций стыков стенок, толщин листов и марок их стали [36].

Изготовление вертикальных стыков рулонированных стенок новых резервуаров, не имеющих серьезных дефектов формы и качества, а также усиление листовыми вставками вертикальных зон уже существующих конструкций, усталостный ресурс которых близок к исчерпанию, требует применения специального оборудования и сложных технологических операций, обеспечивающих правильное геометрическое совмещение элементов по всей высоте резервуаров при их сварке. С этой целью используются особые формообразователи или дорогостоящие системы типа гидравлический пуансон – матрица, придающие элементам стенки у стыка геометрическую форму, близкую к проектной [37]. Однако существующий опыт монтажа показывает, что применение данных технологий далеко не всегда гарантирует получение стабильных результатов, что обуславливается различием толщин листов стенки по поясам и большой податливостью их полотнищ [21].

Учитывая реальную опасность усталостного разрушения вертикальных стыков элементов рулонированных стенок ряда существую-

щих резервуаров и отсутствие по сей день абсолютно надежного решения данной проблемы, в ряде стран, в том числе и в Украине, идет активный поиск приемлемых конструктивных форм соответствующих усиления [38]. Обычно в этом случае упор делается на уход от совмещенного стыка и превращение монтажного соединения в рядовой участок стенки с разбежкой швов по поясам, что выполняется путем сварки по всей высоте сооружения специальных листов-вставок [21, 22, 37]. Сварка таких «гребенчатых» вставок (рис. 3), являясь сложной технологической задачей, требует предварительного придания кромкам выреза стенки, по всей высоте его выполнения, необходимого проектного положения, что осложняется наличием изгибающих моментов, активно стремящихся выгнуть листы конструкции во внутрь резервуара [21]. Также требуется качественная подгонка элементов вставки и надлежащая фиксация их положения. Процесс сварки вставок в стенку сталкивается со сложностями, обуславливаемыми наличием предварительных напряжений вдоль кромок соединений, и требует применения специальных технологий сварки по «жесткому» контуру. Кроме этого он осложняется существенными поперечными усадками выполняемых швов (до 2 мм), стремящимися компенсироваться за счет изменения кривизны прилегающих участков стенки резервуара.



Рис. 3. Усиление специальными листовыми вставками, размещаемыми в зоне прямолинейного монтажного стыка, стенки резервуара вместимостью 20 тыс. м³ [21]

Внешнее усиление стенок цилиндрических резервуаров высокопрочными направленно ориентированными материалами. Описанные выше традиционные методы усиления стенок цилиндрических резервуаров, давая приемлемые результаты, в тоже время сопряжены с целым рядом конструктивных и технологических недостатков, нередко приводящих к тому, что полная замена сооружений рассматривается в качестве более эффективного решения, нежели производство работ по соответствующему усилению. Избежать многих недостатков конст-

рукций усиления, значительно упростить технологию и уменьшить сроки производства работ становится возможным при использовании методов внешнего армирования стенок цилиндрических резервуаров высокопрочными материалами, направленно воспринимающими действующие усилия.

Следует отметить, что внешнее направленное усиление имеет актуальность и большие конструктивные резервы также и при реконструкции существующих резервуаров. Так при модернизации производственных мощностей нередко встает проблема повышения вместимости цилиндрических резервуаров, в том числе и относящихся к крупным [39], решаемая увеличением толщины стенок, в нижних их поясах, способом подрачивания: по периметру сооружений размещаются подъемные гидродомкраты, отрезается нижняя часть стенки, зачищается уторный стык и производится монтаж новых краек с последующим подъемом стенки и монтажом следующего нижнего пояса. Подобная технология сравнительно сложна и требует длительного периода вывода сооружения из эксплуатации. Значительно упростить процесс данной реконструкции становится возможным при внешнем усилении существующих нижних поясов стенок с наращиванием верхних частей сооружений.

Идея непрерывной навивки на сплошные металлические оболочки цилиндрических резервуаров высокопрочных проволок или лент (рис. 4), преимущественно устанавливаемых с предварительным напряжением различной величины, не нова [40, 41]. При ее осуществлении могут использоваться механизмы, подобные тем, что применяются в отношении обматываемых конструкций железобетонных резервуаров. В этом случае работы по усилению стенок металлических резервуаров не требуют полного слива хранимого продукта, дегазации, зачистки внутренних поверхностей и пропарки, также уменьшается и продолжительность производимых работ. В зависимости от конструктивных решений, применяемых усиливающих материалов и монтажных механизмов возможен различный характер предварительного напряжения: его величина может быть относительно небольшой (конструктивной), обеспечивающей простую совместность работы элементов комплексных стенок резервуаров, или весьма существенной, позволяющей в полной мере использовать преимущества высокопрочных усиливающих материалов. В процессе навивки с заданным усилием проволоки или лент на стенки резервуаров, последние получают предварительное сжатие, а усиливающие элементы — растяжение. Под действием внутреннего давления составляющие данной конструкции работают совме-

стно с полным использованием своей несущей способности, что позволяет снизить их материалоемкость.

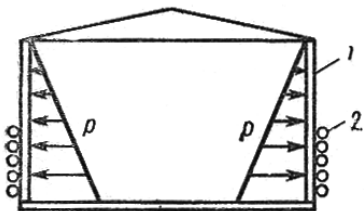


Рис. 4. Усиление вертикальных цилиндрических резервуаров обмоткой высокопрочной проволокой: 1 — оболочка резервуара, 2 — обмотка

Существующие разработки габаритных цилиндрических резервуаров и аппаратов высокого давления, предварительно напряженных обмотками высокопрочной проволоки, свидетельствуют о принципиальной возможности снижения их веса на величину до 35...45% [41]. Полученные в последней четверти прошлого века проектные решения металлических вертикальных цилиндрических резервуаров вместимостью от 30 до 100 тыс. м³ (рис. 5) с предварительно напряженной стен-

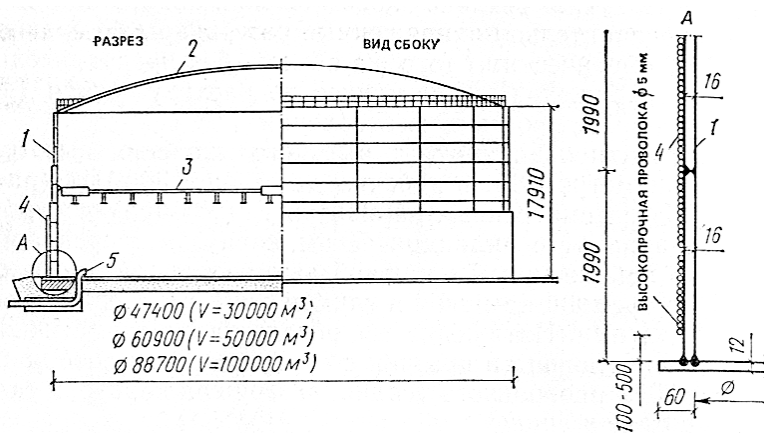


Рис. 5. Проектные решения вертикальных цилиндрических резервуаров с предварительно напряженной стенкой [40, 41]: 1 — стенка, 2 — покрытие, 3 — понтон, 4 — обмотка, 5 — патрубки

кой, предусматривавшей ее постоянную толщину в обматываемой зоне и переменный шаг или диаметр усиливающей проволоки, показали удельное снижение стоимости возведения подобных сооружений, составившее на тот период времени в зависимости от вместимости резервуаров 19...41% (см. [41]).

Фибропластиковое направленно-ориентированное усиление стенок цилиндрических резервуаров. Эффективность усиления стенок резервуаров направленно ориентированными высокопрочными материалами определяется упругими и прочностными свойствами используемых элементов внешнего армирования. Ряд современных материалов, находящихся возрастающее применение в строительстве, превосходят сталь по соотношению показателей прочности и упругости. К числу наиболее перспективных их образцов относят фиброармированные материалы на основе полимерных матриц (фибропластики): композиты, отличающиеся гетерогенно-анизотропной природой, проявляющие преобладающее линейно-упругое деформирование вплоть до момента разрушения [42-53]. Обладая рядом преимуществ (малый вес, высокие прочностные свойства, устойчивость к коррозии и т.д.) фибропластики с середины 80-х годов прошлого века нашли успешное применение для повышения несущей способности и жесткости железобетонных конструкций. Внедрение данных материалов для усиления металлических конструкций совпало с началом текущего века [42, 54-57].

Таблица 1

Типичные показатели свойств армирующих волокон и матриц фибропластиковых материалов в сравнении со сталью [53]

Материал	Модуль упругости, E , ГПа	Прочность при растяжении, σ , МПа	Относительная деформация при разрыве, ε , %	Коэффициент линейных температурных деформаций, α , $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Плотность, ρ , гр/см ³
1	2	3	4	5	6
Е-стекловолокно	70...80	2000...3500	3,5...4,5	5...5,4	2,5...2,6
S-стекловолокно	85...90	3500...4800	4,5...5,5	1,6...2,9	2,46...2,49
Высокомодульное углеродное волокно	390...760	2400...3400	0,5...0,8	-1,45	1,85...1,9
Высокопрочное (нормально-модульное) углеродное волокно	240...280	4100...5100	1,6...1,73	-0,6...-0,9	1,75

1	2	3	4	5	6
Арамидные волокна	62...180	3600...3800	1,9...5,5	-2	1,44...1,47
Полимерные матрицы	2,7...3,6	40...82	1,4...5,2	30...54	1,10...1,25
Сталь	206	230...400 – предел текучести; 350...600 – предел прочности	20...30	10,4	7,8

Изготавливаются фибропластики из полимерных матриц и армирующих волокон (табл. 1, рис. 6). Из всех видов применяемой армирующей фибры наибольшими величинами прочности и модуля упругости обладают углеродные волокна, являясь с конструкционной точки зрения более эффективными для усиления металлических элементов. Тем не менее, определенные преимущества и недостатки имеют все виды широко используемых армирующих волокон и для усиления стенок резервуаров небольшой вместимости, воспринимающих относительно небольшие внутренние усилия, при наличии предварительного напряжения с успехом могут использоваться значительно более дешевые стекловолоконные и арамидоволоконные пластики.

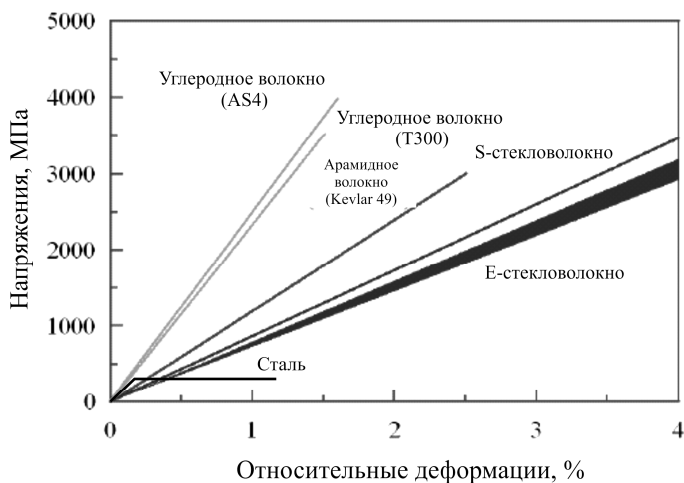


Рис. 6. Характерные зависимости напряжений и относительных деформаций армирующих волокон в сравнении с показателями конструкционных сталей; адаптировано по [53]

В качестве матриц, обеспечивающих передачу усилий от основного материала конструкции к элементам внешнего фибропластикового армирования, теоретически могут использоваться термореактивные смолы (эпоксидные, полиэфирные, винилоэфирные и т.д.) или термопласты [42-53]. Однако в качестве наиболее эффективных и хорошо зарекомендовавших матриц фибропластиков, усиливающих металлические конструкции, в настоящее время наибольшее распространение получили эпоксидосодержащие составы.

При направленной модернизации стенок резервуаров навивкой традиционными высокопрочными материалами (стальными проволоками или лентами), находящие разрешение проблемы ограничиваются только силовым усилением, компенсирующим коррозионные утраты и останавливающим процесс развития усталостных дефектов металла, но не решающими вопрос требуемой герметизации сооружений. Фибропластиковые же материалы, сочетающие в своей природе высокую прочность растягиваемых волокон, а также герметизирующие и коррозионно-защитные свойства традиционно используемых с этой целью эпоксидных составов, представляют комплексное решение усиления стенок подобных сооружений. Дополнительным преимуществом выступает низкий вес данных усиливающих элементов, практически не влияющий на рост внутренних усилий по высоте стенки резервуаров.

Немаловажным также является конструктивная возможность выполнения усиления в зонах локальных повреждений стенок резервуаров направленными фибропластиковыми накладками конечной длины, гарантирующими безопасность эксплуатации конкретных стыковых соединений и при определенных условиях способными консервировать развитие их усталостных дефектов.

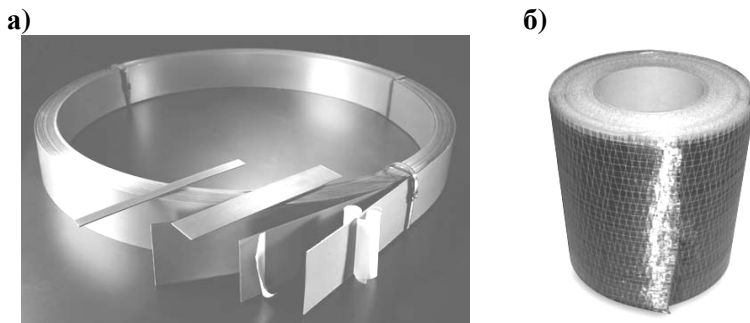


Рис. 7. Элементы внешнего фибропластикового усиления: а — углеволоконные ламинаты заводской готовности [58], б — однонаправленные углеволоконные ткани [59]

Усиление стенок металлических резервуаров направленно ориентированными фибропластиковыми системами внешнего усиления может производиться с использованием как предварительно отвержденных элементов заводской готовности (рис. 7, а), произведенных методами пултрузии или ламинации и приклеиваемых к поверхностям конструкций, так и путем изготовления по месту усиления (с использованием так называемых «мокрых» систем), выполняемых укладкой армирующих «сухих» волокон, лент или тканей (рис. 7, б) в одном или нескольких направлениях с дальнейшей их пропиткой матричными составами непосредственно на поверхности конструкции стенки резервуара [42, 46-48, 51, 53, 54, 57-60]. Указанные технологии, особенно в случаях применения высокомодульных фибропластиковых элементов, устанавливаемых без предварительного напряжения, позволяют в значительной степени упростить процесс производства работ, в отдельных случаях допуская усиление стенок без полного вывода резервуаров из эксплуатации.

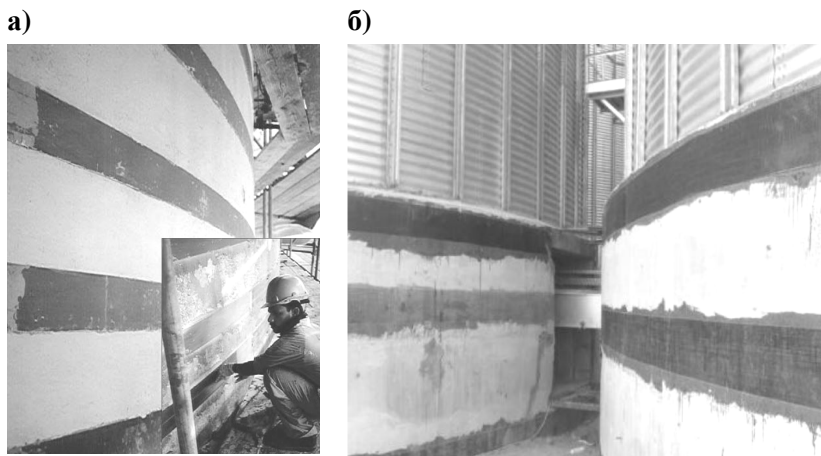


Рис. 8. Усиление железобетонных конструкций цилиндрической формы внешним углеволоконным фибропластиковым армированием: а — элементов башни *Qafco Prill Tower*, Катар [59], б — опор силосов, Российская федерация [61]

Работоспособность усиления конструкций замкнутой геометрической формы, осуществленных внешним армированием высокопрочными фибропластиковыми материалами, оценена в инженерной практике уже относительно давно. Одними из первых получаемыми преимуществами воспользовались военные, активно использовавшие

фибропластики для снижения веса переносных ствольных установок. Так, например, с конца 70-х годов прошлого века в Великобритании массово производили недорогие переносные ракетные установки *LAW 80*, при производстве стволов которых до трех четвертей металла цилиндрической оболочки, работающей на внутреннее давление, заменялось поперечной навивкой арамидных волокон [62]. В строительстве широкое применение фиброармированных пластиков для внешнего поперечного усиления железобетонных колонн, существенно ограничивающего поперечные деформации бетона и значительно повышающего несущую способность таких элементов, ведется с конца 80-х годов и в настоящее время подкрепляется соответствующей экспериментально-теоретической базой [46, 53, 60, 63-70]. Наконец, в начале 2000-х годов появились первые крупномасштабные воплощения усиления различных железобетонных цилиндрических конструкций (рис. 8), и в частности резервуаров (рис. 9), внешним фибропластиковым армированием.

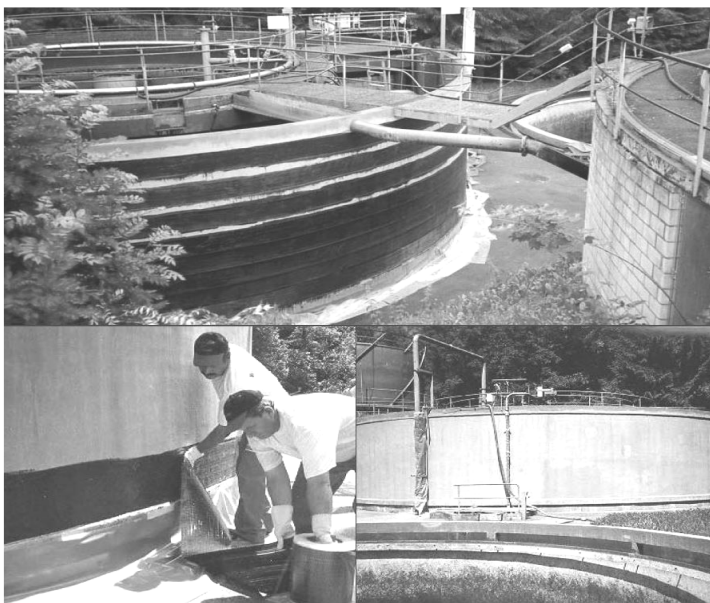
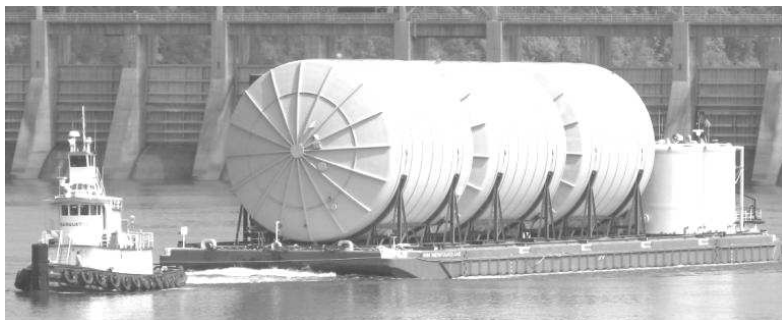


Рис. 9. Усиление железобетонных вертикальных цилиндрических резервуаров внешним углеволоконным фибропластиковым армированием на заводе по очистке сточных вод в городе Цумикон, Швейцария [59]

В настоящее время самостоятельное использование фибропластиков как материалов для цилиндрических оболочек, работающих в сложных и агрессивных условиях эксплуатации, приобретает нарастающие масштабы. Из них выполняют ответственные элементы труб большого диаметра (рис. 10, б), изготавливают резервуары (рис. 10, а) и проектируют сосуды для хранения под высоким давлением сжиженных газов (рис. 10, в). Однако использование фибропластиков в сочетании с металлическими элементами, в силу сравнительно непродолжительного применения подобных решений, сталкивается с рядом трудностей.

а)



б)



в)

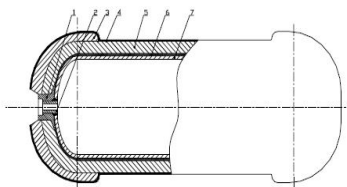


Рис. 10. Современные фибропластиковые цилиндрические оболочки: а — транспортировка вертикальных фибропластиковых резервуаров диаметром 14 м и высотой 17 м [71], б — стекловолоконные трубы диаметра 1200 мм и рабочего давления 10 атм. на Нововоронежской АЭС-2 [72], в — мобильный фибропластиковый резервуар, армированный углеволокном, предназначенный для хранения под высоким давлением сжиженного водорода [73]

Сложившаяся нормативная база усиления железобетонных конструкций фибропластиковыми достаточно обширна, существуют национальные и межгосударственные документы, достаточно полно охватывающие данный вопрос. На постсоветском пространстве лидером в разработке подобной документации является Российская федерация, где официально приняты серии отраслевых стандартов по расчету систем усиления железобетонных конструкций [74-79] и подготовлен проект свода соответствующих строительных правил [80], основой которых явились опробованные европейские и американские нормативные документы расчета и проектирования соответствующих конструкций.

В отношении металлических конструкций, усиление которых фибропластиковыми началось практически на 20 лет позже, определяющие нормативные документы отсутствуют. Существующие же в мире рекомендации по расчету и проектированию строительных конструкций, сочетающих металл и фибропластиковые материалы, имеют весьма ограниченное число и охватывает далеко не все случаи возможной их работы [42, 54-57, 81-86]. Проблему осложняют принципиальные отличия в характере работы и разрушений усиленных металлических конструкций от, например, железобетонных (в первом случае разрушение обычно происходит по адгезионному шву, во втором — по бетону вокруг него), а также невозможность применения в чистом виде решений, опробованных в авиастроении и космонавтике, что объясняется существенными отличиями в размерах сечений несущих элементов, характере действующих внутренних усилий, величинах и продолжительности прикладываемых нагрузок, невозможности эмпирического подхода с проведением множественных серий экспериментальных исследований полномасштабных элементов строительных конструкций и особенностями применения более дешевых армирующих и, что особенно важно, матрично-адгезионных материалов.

Серьезной сложностью при проектировании усиленных металлических конструкций и при стыковке фибропластиковых элементов конечной длины является крайняя форма анизотропии продольно армированных пластиков, прочностные свойства которых фактически обеспечиваются только в одном направлении и только при работе на растяжение, что провоцирует появление значительных концентраций напряжений по концам клеевых соединений, часто делающих бессмысленным продольное наращивание подобных сопряжений, и практически определяющих несущую способность усиленных конструкций. Относительно низкая для металлических конструкций адгезионная несущая способность широко используемых клеевых соединений яв-

ляется доминирующим фактором при определении эффективности реализуемых усиления стенок резервуаров фибропластиковыми элементами конечной длины.

Рассмотрение существующей теоретической базы усиления металлоконструкций фиброармированными пластиками ставит ряд задач при рассмотрении стенок цилиндрических резервуаров. В настоящее время остро требуется соответствующая систематизация и адаптация существующей мировой практики усиления фибропластиками металлоконструкций (при фактически полном отсутствии отечественной практики), применительно к работе цилиндрических оболочек резервуаров. Необходима разработка методик усиления стенок металлических резервуаров в условиях отсутствия рабочих нагрузок, а также при предварительном напряжении усиливающих элементов, устанавливаемых на конструкции в процессе непрерывной эксплуатации сооружений. Требуется определение степени влияния температурных напряжений на работу цилиндрических оболочек резервуаров, составленных из слоев, материалы которых имеют значительные отличия в величинах коэффициентов линейных температурных деформаций (например, выполненных из стали, усиленной углеволокнами фибропластиком).

До сих пор остаются неопределенными показатели рациональности усиления стенок вертикальных цилиндрических резервуаров фибропластиком с учетом отличий в геометрии сооружений, толщинах металлических листовых элементов и величинах действующих в них нагрузок, а также физико-механических свойствах используемой фибры. Отсутствуют ясные параметры рациональности использования фибропластиков, изготовленных на основе армирующих волокон различных видов с использованием «сухих» и «мокрых» технологий производства работ, при усилении ненагруженных конструкций и при использовании предварительного напряжения, а также в процессе производства работ на непрерывно эксплуатируемых сооружениях различной вместимости.

Нерешенными также остаются вопросы ограничения несущей способности фибропластиковых усиления стенок металлических цилиндрических оболочек резервуаров условиями передачи усилий в стыковых соединениях их элементов. Требуемыми необходимой доработки и экспериментального обоснования в отношении рассматриваемых конструкций являются существующие методы расчета усиления усталостных трещин в стальных элементах с использованием углеволокнистых накладок конечной длины, а также определения влияния пред-

варительного напряжения данных накладок на процесс консервации трещин.

Вывод. Модернизация стенок металлических цилиндрических резервуаров высокопрочными направленно ориентированными фиброармированными пластиками по высоте наиболее нагруженных поясов стенок или в пределах их локальных зон позволяет осуществлять комплексное усиление, решающее проблему восполнения материала, утраченного в процессе коррозии, и консервирующего дефекты, обусловленные процессами усталостного разрушения соединений листовых элементов, а также сочетающего герметизирующую и антикоррозионную функции. Осуществление данных усилений в настоящее время сопряжено с рядом нерешенных теоретических проблем.

Литература

1. Стоянов В.В. Новые подходы в управлении несущей способностью конструкций // Современные строительные конструкции из металла и древесины / Сб. науч. тр. ОГАСА. – Одесса: ОГАСА, 2001. – С. 164-167.

2. Стоянов В.В. Проблемы совершенствования комбинированных строительных конструкций с целью повышения их несущей способности // Современные строительные конструкции из металла и древесины / Сб. науч. тр. ОГАСА. – Одесса: ОГАСА, 2003. – С. 4-11.

3. Стоянов В.В. Новые подходы обеспечения несущей способности строительных металлических конструкций в полном объеме срока эксплуатации // Сб. XII Украинского НТК «Металлические конструкции». –К.: Сталь, 2004. – С. 280-292.

4. Стоянов В.В. Металлические резервуары — некоторые проблемы проектирования и реконструкции // Сб. науч. тр. УАМК. – Донецк: УАМК, 2007. – С. 45-49.

5. Стоянов В.В. «Консервация» трещин как способ продления срока работоспособности // Промислове будівництво, інженерні споруди, 2009, №4.

6. Стоянов В.В., Мазин Ж. Алаид. Испытания на выносливость растянутых металлических образцов с нормальной искусственной трещиной // Современные строительные конструкции из металла и древесины / Сб. науч. тр. ОГАСА. – Одесса: ОГАСА, 2009. – С. 51-58.

7. Стоянов В.В. Прогнозирование динамической усталости элементов металлических конструкций при циклическом нагружении // Современные строительные конструкции из металла и древесины / Сб. науч. тр. ОГАСА. – Одесса: ОГАСА, 2010. – С. 1-11.

8. Стоянов В.В., Мазин Ж. Алаид. Долговечность металлических составных подкрановых балок при местном усилении углепластиком // Современные строительные конструкции из металла и древесины / Сб. науч. тр. ОГАСА. – Одесса: ОГАСА, 2010. – С. 258-263.

9. Стоянов В.В., Алаид М.Ж. Элементы металлических конструкций, усиленных углепластиком, при статическом и циклическом нагружении // Эффективные строительные конструкции / Сб. науч. тр. ЛГТУ. – Липецк: ЛГТУ, 2009. – С. 105-111.

10. Стоянов В.В. Восстановление прочности и деформативности составных двутавровых балок ослабленных трещинами на поясах // Вісник ОДАБА, вип. 34 / 36. наук. праць. – Одеса: ОДАБА, 2009. – С. 50-53.

11. Мазин Алаид Жержос. Несущая способность составных металлических балок усиленных углепластиком при циклическом нагружении / Диссертация на соискание степени канд. тех. наук. – Одесса: ОГАСА, 2010. – 132 с.

12. Stojanov V.V., Alaid M.J. Tests of endurance of stretched metal samples with normal artificial cracks / International conference UACEG Science & Practice “We build the infrastructure of Bulgaria”, Sofia, October, 2009. – P. 52.

13. Хоменская А.В. Прочность и деформативность элементов металлических конструкций, усиленных углепластиком, при статических и циклических нагружениях / Диссертация на соискание степени канд. тех. наук. – Одесса: ОГАСА, 2012. – 196 с.

14. Стан та залишковий ресурс фонду будівельних металевих конструкцій в Україні / А.В. Перельмутер, В.М. Гордеев, Є.В. Горохов та ін.; За ред. д.т.н. Перельмутера А.В. – К.: Сталь, 2002. – 166 с.

15. Добромислов А.Н. Анализ аварий промышленных зданий и инженерных сооружений // Промышленное строительство, 1990, №9. – С. 9-10.

16. Шадунц К.Ш., Ещенко О.Ю. Проблемы строительства резервуаров на слабых грунтах в сейсмических районах // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 2001, №4. – С. 19-23.

17. Егоров Е.А., Анализ надежности стальных резервуаров для хранения товарных нефтепродуктов // Современные строительные

конструкции из металла и древесины / Сб. науч. тр. ОГАСА. – Одесса: ОГАСА, 1999. – С. 61-65.

18. Егоров Е.А. Исследования и методы расчетной оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса стальных резервуаров, находящихся в эксплуатации / Сб. науч. тр. – Днепропетровск: ПГАСА, 1996. – 99 с.

19. Егоров Е.А. Некоторые результаты и проблемы технического диагностирования стальных резервуаров для хранения нефтепродуктов // Зб. наук. праць Придніпровської ДАБА та Варшавського технічного ун-ту. – Дніпропетровськ: ПДАБА, 1999. – С. 77-82.

20. Почтовик П.Г., Шаршунов Г.К. Повышение надежности резервуаров нефтеперекачивающих станций путем проведения промежуточных обследований // Металлические конструкции. / Сб. тр. МИСИ им. Куйбышева. – М.: МИСИ, 1984. – С. 127-132.

21. Барвинко Ю.П., Голинько В.М., Барвинко А.Ю., Перельмутер А.В., Кулеба Г.В. Повышение работоспособности вертикальных монтажных сварных соединений стенки стальных цилиндрических резервуаров, построенных из рулонных заготовок // Автоматическая сварка, 2001, №7(589). – С. 27-32.

22. Барвинко Ю.П., Голинько В.М., Барвинко А.Ю. О работоспособности вертикальных монтажных стыков стенки цилиндрических резервуаров большой емкости, построенных из рулонных заготовок // Нові рішення в проектуванні та будівництві металевих резервуарів / Зб. тез міжнародного колоквиуму. – К., Одеса: ІАСС, 2000. – С. 11-12.

23. Билецкий С.М., Голинько В.М., Барвинко Ю.П. Пути повышения эксплуатационной надежности сварных цилиндрических резервуаров, изготавливаемых из рулонизируемых заготовок // Автоматическая сварка, 1990, №3. – С. 50-52.

24. Розенштейн И.М. Ремонт стенок вертикального стального резервуара без вывода его из эксплуатации // Нові рішення в проектуванні та будівництві металевих резервуарів / Зб. тез міжнародного колоквиуму. – К., Одеса: ІАСС, 2000. – С. 24-25.

25. Правила технической эксплуатации резервуаров и инструкции по их ремонту. – М.: «Недра», 1988. – 182 с.

26. Сборник инструкций по защите резервуаров от коррозии. – М.: «Недра», 1982.

27. Поповский Б.В. Резервуаростроение начала XXI века // Нові рішення в проектуванні та будівництві металевих резервуарів / Зб. тез міжнародного колоквиуму. – К., Одеса: ІАСС, 2000. – С. 28-29.

28. Ушанов С.М., Масютин Е.У. Об антикоррозийной защите нефтерезервуаров // Нові рішення в проектуванні та будівництві металевих резервуарів / Зб. тез міжнародного колоквиуму. – К., Одеса: ІАСС, 2000. – С. 28-29.

29. Рекомендации по усилению и ремонту строительных конструкций инженерных сооружений. – М.: ЦНИИПромзданий, 1990.

30. Рекомендации по восстановлению несущей способности цилиндрических резервуаров способом усиления стенки стальными кольцевыми бандажами. – Астрахань: ЦНИЛ, 1984.

31. Рекомендации по эксплуатации резервуаров, усиленных методом постановки кольцевых бандажей. – Астрахань: ЦНИЛ, 1984.

32. Поповский Б.В., Джур Ю.Ф. Этапы решения задачи сборки вертикальных стыков стенок резервуаров // Монтажные и специальные работы в строительстве, 2000, №10. – С. 4-7.

33. РД 39-30-1331-85. Инструкция по усилению вертикальных монтажных стыков стенок резервуаров РВС-20000. — Введ. с 01.01.86 по 01.01.91. – М., 1985. – 6 с.

34. О допусках на угловые деформации вертикальных сварных стыков в резервуарах вместимостью 10...50 тыс. м³ для хранения нефти и нефтепродуктов / Ю.П. Барвинко, С.М. Билецкий, В.М. Голинько, В.В. Якубовский // Автоматическая сварка, 1991, №4. – С. 20-23.

35. О допусках на угловые деформации вертикальных стыков стенок нефтерезервуаров / Б.В. Поповский, Г.А. Ритчик, Ю.П. Барвинко, С.М. Билецкий, В.М. Голинько // Монтажные и специальные работы в строительстве, 1991, №5. – С. 11-12.

36. ВСН 311-89. Монтаж вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов вместимостью от 100 до 50000 м³. – М.: Минмонтажспецстрой СССР, 1990. – 60 с.

37. Лялин К.В. Некоторые аспекты совершенствования конструкций и технологии сборки и сварки цилиндрических резервуаров // Монтажные и специальные работы в строительстве, 1997, №7. – С. 10-13.

38. О работоспособности вертикальных цилиндрических резервуаров вместимостью 50 тыс. м³ из стали 16Г2АФ / А.Ю. Барвинко, Ю.П. Барвинко, В.М. Голинько, В.Г. Тулин // Трубопровод. трансп. нефти, 1999, №9. – С. 24-27.

39. Белолев М., Костадинов Й., Георгиев Д. Способ увеличения вместимости резервуаров путем подрачивания стенки // Нові рішення в

проекуванні та будівництві металевих резервуарів / Зб. тез міжнародного колоквіуму. – К., Одеса: ІАСС, 2000. – С. 12-13.

40. Беленя Е.И., Астряб С.М., Рамазанов Э.Б. Предварительно напряженные металлические листовые конструкции. – М.: Сиройиздат, 1979. – 192 с.

41. Металлические конструкции: Спец. курс / Е.И. Беленя, Н.Н. Стрелецкий, Г.С. Веденников и др.; Под ред. Е.И. Беленя. – М.: Стройиздат, 1991. – 687 с.

42. Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites. Edited by L.C. Hollaway and J.G. Teng. – Woodhead Publishing Limited and Maney Publishing Limited on behalf of The Institute of Materials, Minerals & Mining, 2008. – 398 p.

43. Композиционные материалы: справочник. Под. ред. В.В. Васильева, Ю.М.Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

44. Handbook of Composites. Edited by Peters, S.T. Second edition. – London: Chapman & Hall, 1998. – 1118 p.

45. Bryan Harris. Engineering Composite Materials. – London: The Institute of Materials, 1999. – 194 p.

46. FRP Design Guide, S&P Clever Reinforcement Company, Brunnen, Switzerland, June 2000. – 70 p.

47. Cripps, A., Harris, B. and Ibell, T. Fibre-reinforced polymer composites in construction, C564. – London: CIRIA, 2002.

48. Shcnoi, R.A., Moy, S.S.J., Hollaway, L.C. Advanced polymer composites for structural application. – Thomas Telford, 2002.

49. Mortensen A. Concise Encyclopedia of Composite Materials. – Pergamon, 2007. – 958 p.

50. High-Performance Construction Material. Edited by Caijun Shi and Y.L. Mo. –World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2008. – 431 p.

51. Fibrous and composite materials for civil engineering applications. Edited by R. Figueiro. – Woodhead Publishing Limited, 2011. – 401 p.

52. Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications. Edited by Jiping Bai. – Woodhead Publishing Limited, 2013. – 906 p.

53. 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, July 13th, 2004. – 144 p.

54. 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, June, 2007. – 57 p.
55. Moy, S.S.J. FRP Composite: Life Extension and Strengthening of Metallic Structures: ICE Design and practice guide. – London: Thomas Telford, 2001.
56. Cadei, J.M.C., Stratford, T.J., Holloway, L.C., and Duckett, W.G. Strengthening Metallic Structures Using Externally Bonded Fiber-Reinforced Composites, C595. – London: CIRIA, 2004.
57. Xiao-Ling Zhao. FRP-Strengthened Metallic Structures. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. – 247 p.
58. MBrace™ Composite Strengthening System. Carbon, Aramid and Glass Composite Reinforcement to Extend the Life of Concrete and Masonry Structures. – BASF The Chemical Company. – 12 p.
59. SST Carbon Reinforcing Systems. FRP Sheets Laminate. Prestressed Laminate Epoxies. C-FRP-2013/14 APACME. – Simpson Strong-Tie Asia Ltd. – 24 p.
60. ACI 440.2R-08. Guide for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. – American Concrete Institute. – 2008.
61. ЗАО «Холдинговая компания «Композит»». Системы внешнего армирования FibARM // Composites without borders. I International Conference, Moscow, 31 October – 2 November, 2013 / Презентация. – М.: Холдинговая компания «Композит». – 26 с.
62. Hinton, M.J., Cook, J., Groves, A., Hayman, R. and Howard, A. Overwrapped Structures: A Modern Approach? // Repairing Structures using Composite Wraps / – London: Kogan Page Limited, 2003. – P. 105-129.
63. Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. – Seismic Design of Bridge Piers – Research Report 84-2, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand, 1984. – 442 p.
64. M.J.N. Priestley, F. Seible and E. Fyfe: - Column Seismic Retrofit Using Fiberglass/Epoxy Jackets – Proceedings 1st International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, 1992. – P. 287-298.
65. American Concrete Institute – Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95) – Detroit, Michigan, 1995.

66. Seismic Design and Retrofit of Bridges, M.J.N. Priestley, F.Seible and G.M. Calvi, 1996.

67. Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. – Theoretical stress-strain model for confined concrete – Journal of Structural Division, ASCE, vol 107, No. ST11, 1998. – P. 2227-2244.

68. Wang Yung-Chih – Retrofit of Reinforced Concrete Members Using Advanced Composite Materials – Research Report 2000-3, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, February 2000.

69. Kohzo Kimura, Hideo Katsumata. Applications of Retrofit and Repair using Carbon Fibers // Repairing Structures using Composite Wraps / – London: Kogan Page Limited, 2003. – P. 61-71.

70. CNR-DT 204/2006 Guidelines for the Design and Construction of Fiber-Reinforced Concrete Structures. ROME – CNR, November, 2007. – 57 p.

71. Guy Schneider. DERAКANE™ Epoxy Vinyl Ester. DERAКANE™ Based Solutions for Metal Processing Industries Communications // Composites without borders. II International Conference, Moscow, October 14-16, 2014 / Презентация. – ASHLAND®. – 22 с.

72. Завод по производству стеклопластиковых труб ООО «Амитек» // Composites without borders. II International Conference, Moscow, October 14-16, 2014 / Презентация. – М.: ООО «Амитек». – 29 с.

73. Fangming Kai, Zhongqiang Liu, Qiang Fu, Jinyang Zheng, Changpin Chen. State-of-the-art of fiber-reinforced high-pressure tanks // Journal of Pressurized Equipment and Systems, 2 (2004). – P. 59-63.

74. СТО-01-2011. Усиление пролетных строений мостов материалами на основе однонаправленных высокопрочных углеродных волокон. – Волгоград: Управление автомобильных дорог, 2011. – 55 с.

75. СТО 13613997-001-2011. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. – М.: Зика Россия, 2011. – 55 с.

76. СТО 70386662-101-2012. Применение системы внешнего армирования MBrace для усиления главных балок железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов. – М.: Общество с ограниченной ответственностью «БАСФ Строительные системы», 2012. – 16 с.

77. СТО 2256-002-2011. Системы внешнего армирования из полимерных композитов FibARM для ремонта и усиления строительных конструкций. – М.: ЗАО «Препрег-СКМ», 2012. – 54 с.

78. Рекомендации по расчету усиления железобетонных конструкций системой внешнего армирования из полимерных композитов FibARM. – М.: НИИЖБ, 2012. – 29 с.

79. СТО НОСТРОЙ 126-2013. Повышение сейсмостойкости существующих многоэтажных зданий. – М.: Национальное объединение строителей, 2013. – 64 с.

80. ПРОЕКТ. Строительные нормы и правила. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами (первая редакция). – М.: ОАО «НИЦ «Строительство» – НИИЖБ им. А.А.Гвоздева, ЗАО «Триада-Холдинг», ЗАО «ХК Композит», 2012. – 61 с.

81. Sen, R., and Liby, L. Repair of steel composite bridge sections using CFRP laminates. Final report. Florida and U.S. Department of Transportation. Springfield, VA: National Technical Information Service, 1994, August.

82. Oehlers, D.J., and Seracino, R. Design of FRP and steel plated RC structures: Retrofitting beams and slabs for strength, stiffness and ductility. – Oxford: Elsevier, 2004.

83. Moy, S.S.J., Clark, J. and Clarke H. The Strengthening of Wrought Iron Using Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites. ACIC-2004. – Guildford, 2004.

84. Dawood, M., Rizkalla, S., Schnrchr, D. Design guidelines for the use of HM strips – strengthening of steel-concrete composite bridges with high modulus carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strips, 2005.

85. Schnrchr, D., Dawood, M., Rizkalla, S. Design guidelines for the use of HM strips: strengthening of steel-concrete composite bridges with high modulus carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strips, Technical Report IS-06-02, Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, North Carolina State University, 2006.

86. JSCE 2012. Advanced technology of repair and strengthening of steel structures using externally-bonded FRP composites (in Japanese). Hybrid Structure Reports 05. – Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2012.