

Краткое содержание работы

В работе представлены результаты, полученные авторским коллективом с 2014 по 2023 г. при решении одной из важнейших строительных научно-технических задач – создания и широкого внедрения новых систем внешнего армирования и усиления строительных конструкций полимерными композиционными материалами на основе углеродных волокон.

В настоящее время в строительной отрасли эта задача решается путем применения традиционных металлических элементов армирования. Главными недостатками такого подхода являются утяжеление конструкции, высокая стоимость, влияние агрессивных сред и коррозии на армирующие элементы, необходимость привлечения тяжелой строительной техники. По состоянию на 2023 г. по разным оценкам износ промышленных зданий, искусственных сооружений и объектов инфраструктуры, определяемый в значительной степени коррозионным поражением армирующих элементов, составляет от 50 до 80 %. В современных условиях такое положение недопустимо.

Данная проблема решена путем разработки и широкого внедрения в строительной отрасли новых систем армирования конструкций полимерными композиционными материалами на основе углеродных волокон и полимерных связующих холодного отверждения.

В рамках проводимых работ коллективом авторов выполнен цикл экспериментально-теоретических исследований, по результатам которых разработаны:

- теория создания систем армирования для усиления и ремонта строительных конструкций углекомпозитами на основе связующих холодного отверждения с высокой адгезией к бетонным и металлическим поверхностям;

- новое поколение полимерных композиционных материалов, обеспечивающих высокие прочностные свойства, весовую эффективность, устойчивость к агрессивным средам;

- технологии, конструктивные решения и методы расчета строительных конструкций основных видов (железобетонные, металлические, каменные) с внешним композитным армированием, включая задачи усиления и ремонта;

- адаптированная к новым видам материалов армирования теория диагностики, технологии и средства волоконно-оптического мониторинга состояния строительных конструкций с внешним армированием полимерными композиционными материалами.

Разработаны, теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены методы расчета композитных систем внешнего армирования и усиления конструкций, позволяющие учесть особенности материалов усиления в условиях совместной работы с возводимыми и усиливаемыми конструкциями. Разработаны не только методы расчета, но и система локальных коэффициентов надежности и коэффициентов условий работы. Разработаны принципиальные решения по созданию эффективных конструкций внешнего армирования и усиления, включая методы обеспечения совместной работы и узлы анкеровки элементов полимерных композиционных материалов.

Разработанные методы расчета внешнего армирования и усиления несущих конструкций системами внешнего армирования полимерными композиционными материалами верифицированы путем сопоставления результатов расчетов экспериментальных образцов с данными физических экспериментов (рис. 1 – 3).

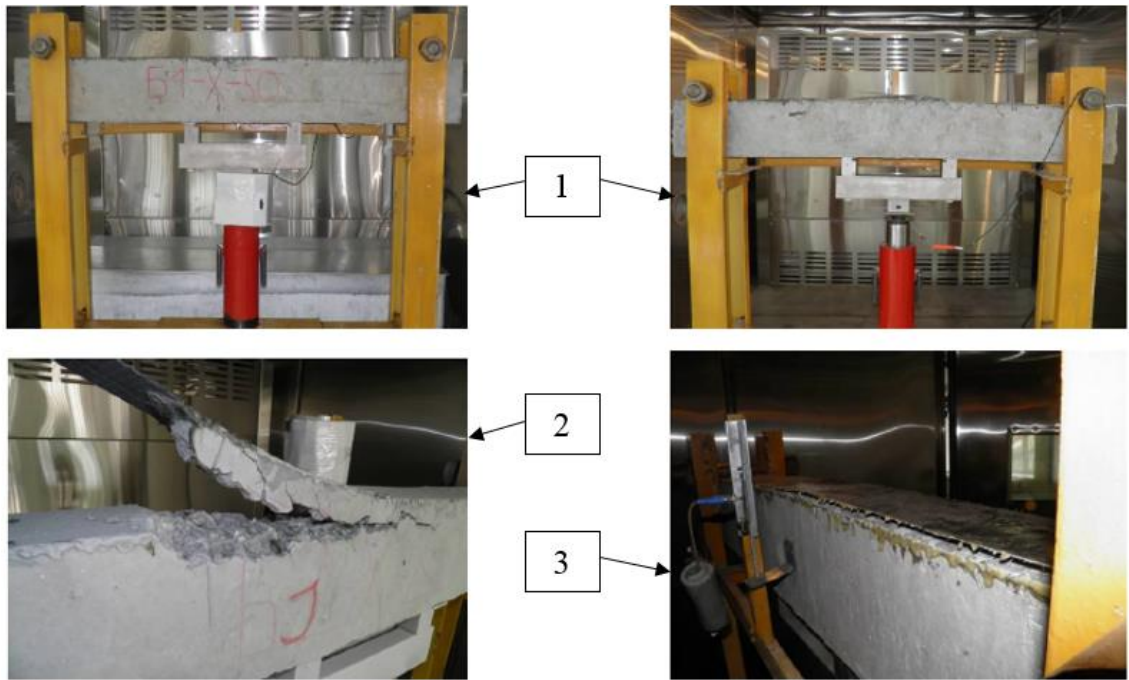


Рисунок 1 – Стойкость системы внешнего армирования к температуре: 1 – до испытаний; 2 – минус 50 °С; 3 – плюс 90 °С

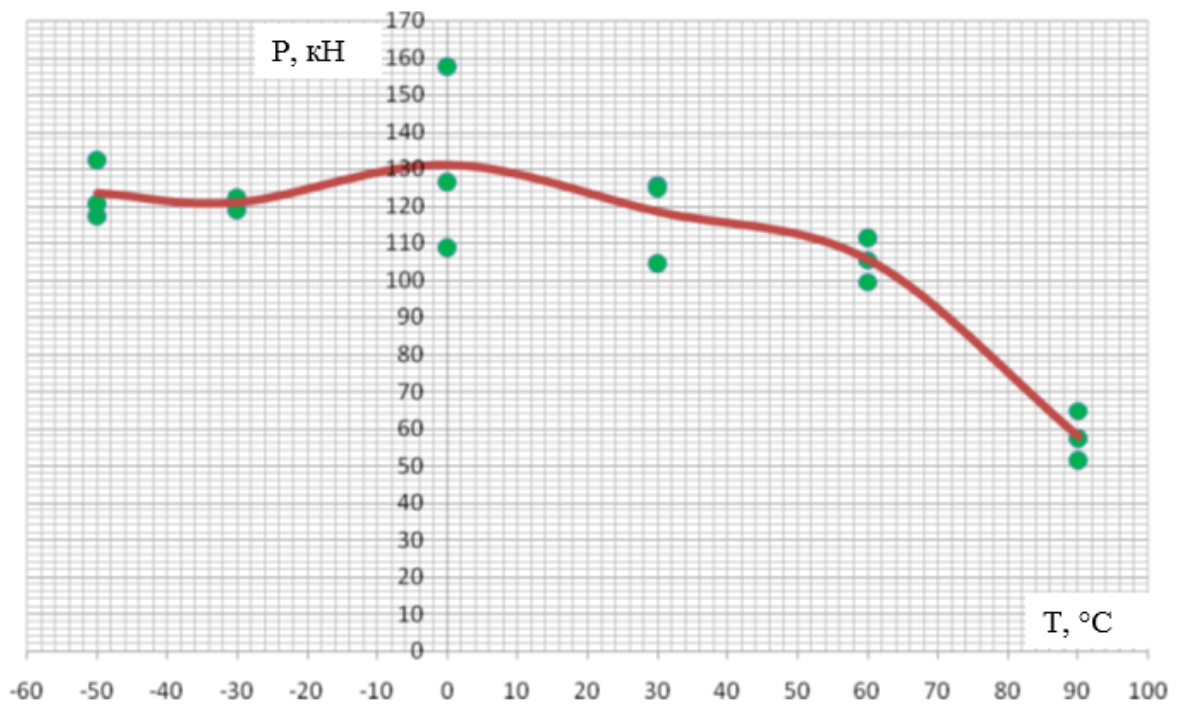


Рисунок 2 – Зависимость величины разрушающей нагрузки от температуры испытаний железобетонных конструкций с композитным усилением

Эксперименты показали (рис. 1 – 2), что применение композитных систем внешнего армирования увеличивает несущую способность образцов от 93 % до 115 %.

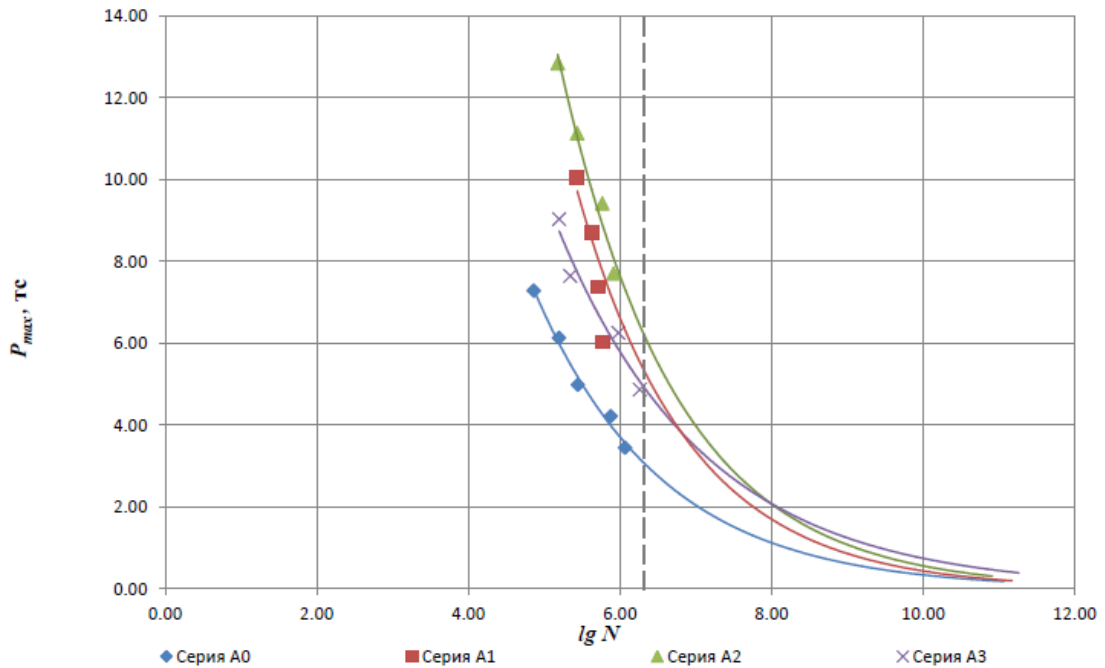


Рисунок 3 – Оценка выносливости композитных систем внешнего армирования железобетонных образцов при различных схемах армирования

Результаты экспериментальных исследований демонстрируют (рис. 3), что усталостный ресурс конструкции с внешним углекомпозитным армированием повышается от 3 до 14 раз. Полученные результаты актуальны для конструкций, эксплуатируемых в различных климатических зонах.

Создано новое поколение полимерных композиционных материалов и организовано производство систем внешнего армирования на основе углеродных волокон и эпоксидных связующих для усиления и ремонта строительных конструкций (рис. 4).



Рисунок 4 – Созданные производства: а) участок производства связующих;
б) участок производства армирующих наполнителей

Разработана система технического регулирования применения технологий внешнего армирования, усиления и ремонта основных видов строительных конструкций полимерными композиционными материалами (стандарты, регламенты, руководства, альбомы технических решений).

Верификация результатов экспериментально-теоретических исследований выполнена в рамках мониторинга состояния строительных конструкций на эксплуатируемом объекте – железнодорожный мост через реку Любовша, расположенный на пути участок Орел-Елец Московской железной дороги (рисунок

5). Для получения объективных и корректных данных выполнена адаптация к исследуемым конструкциям и материалам методов и средств волоконно-оптического мониторинга.

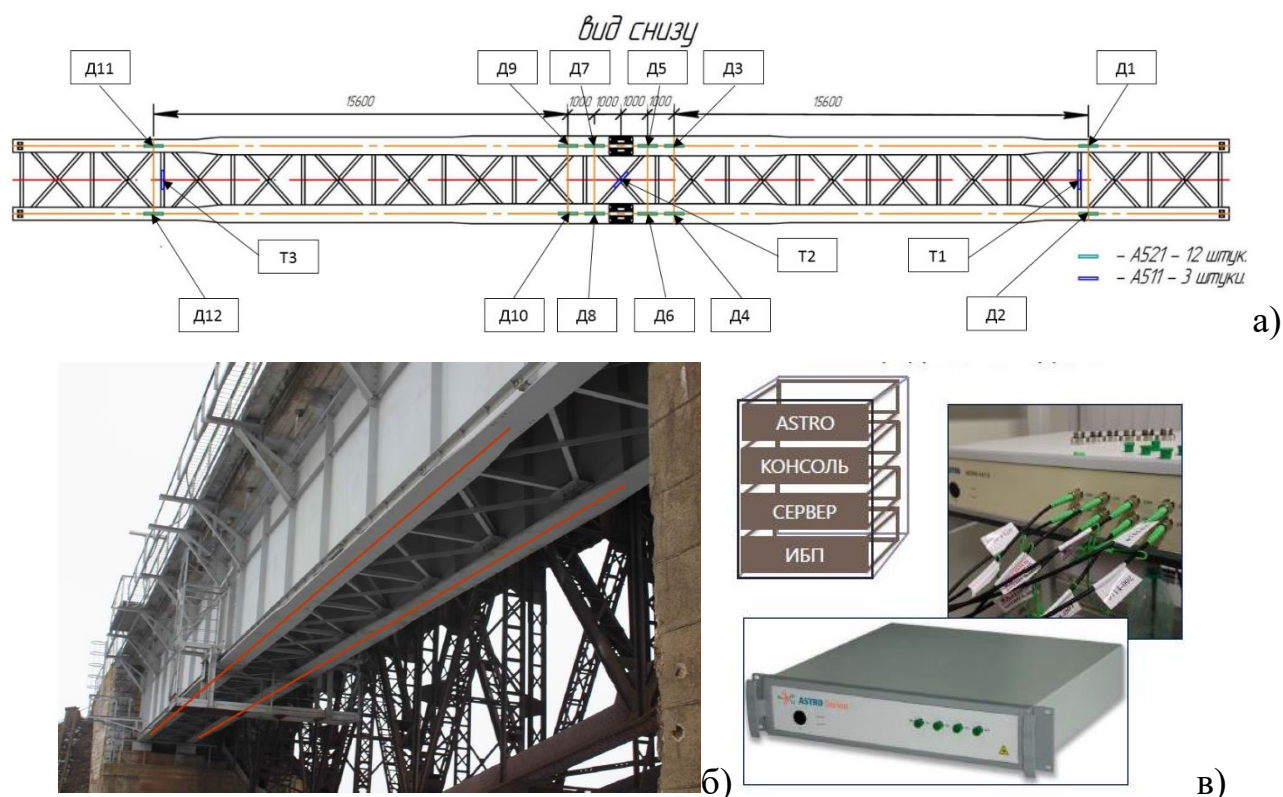


Рисунок 5 – Объект мониторинга: а) топология волоконно-оптических датчиков (ВОД) на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР); б) нижний пояс пролетного строения моста с установленными ВОД; в) устройство опроса ВОД

По результатам обследования, расчетов и данных от волоконно-оптической системы мониторинга установлено, что исходная несущая способность существующих главных балок пролетного строения моста недостаточна и, как следствие, требуется установка системы усиления. После установки композитной системы внешнего армирования был проведен повторный мониторинг. По результатам анализа данных мониторинга установлено, что до усиления значения прогиба несущей балки пролетного строения моста были близки к критическому значению (71 мм), после усиления значение прогиба уменьшилось до 32 мм, что соответствует значениям, необходимым для дальнейшей безопасной эксплуатации.

Экспериментально подтверждено, что установка композитных систем внешнего армирования может эффективно применяться для восстановления несущей способности несущих конструкций сооружений, при этом адаптированная

методика и волоконно-оптическая система мониторинга являются эффективным инструментом оценки фактического технического состояния строительных конструкций и может успешно применяться для отслеживания и предотвращения возникновения критических ситуаций.

Новые полимерные композиционные материалы, технологии, конструктивные решения и методы расчета строительных конструкций основных видов (железобетонные, металлические, каменные) с внешним композитным армированием, а также адаптированные к новым видам материалов армирования технологии и средства волоконно-оптического мониторинга состояния строительных конструкций нашли применение для оценки состояния, усиления и ремонта более 300 эксплуатируемых строительных конструкций (рис. 6, 7).

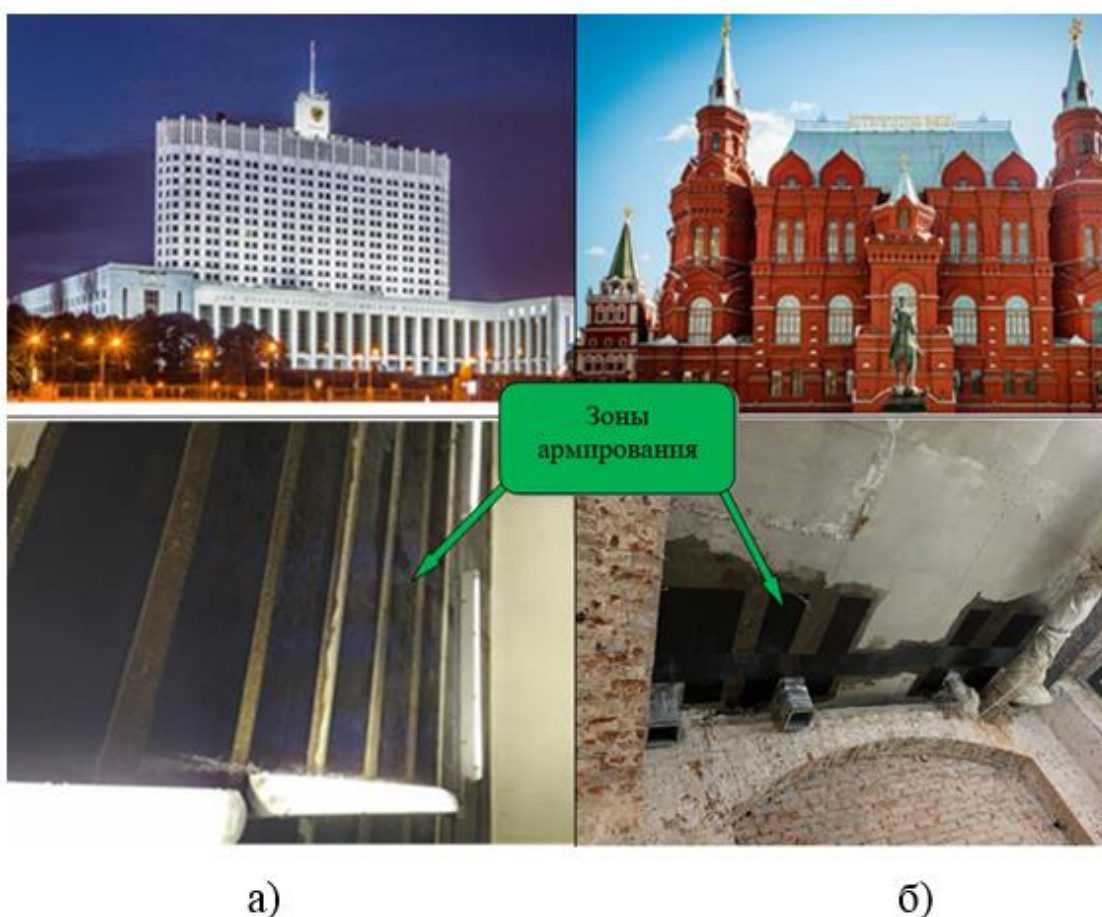


Рисунок 6 – Усиление железобетонных плит перекрытий Дома Правительства РФ (а) и Государственного исторического музея (б)



Рисунок 7 – Усиление несущих конструкций Международного центра бокса и самбо Лужниках (а); путепровода в г. Кировске (б) и в г. Череповец (в)

Основная научно-техническая идея

Создание новых композитных систем внешнего армирования, усиления, ремонта и непрерывной диагностики состояния строительных конструкций на основе новой теории и методов расчета строительных конструкций, выполненных с использованием полимерных композиционных материалов, адаптированных методов и средств волоконно-оптического мониторинга.

Значение результатов для практики

Применение новых систем композитных систем внешнего армирования и диагностики строительных конструкций позволило снизить стоимость ремонта на 15 – 30 %, трудоемкость работ по усилению и ремонту на 20 – 30 %, обеспечить контролируемую надежность эксплуатации не менее 25 лет.

Достигнутый экономический эффект от внедрения

Разработанные технические решения внедрены на более 300 строительных объектах в Вологодской, Калининградской, Калужской, Кемеровской, Кировской, Ленинградской, Магаданской, Московской, Мурманской, Новгородской, Новосибирской, Омской, Рязанской, Самарской, Сахалинской, Свердловской, Тверской, Томской, Тюменской, Ульяновской, Челябинской областях, Алтайском, Краснодарском, Красноярском, Приморском, Пермском, Ставропольском краях, Республиках Татарстан, Крым, Удмуртии, Бурятии, Башкортостане, Северной Осетии, Ханты-Мансийском автономном округе.

Суммарный экономический эффект от внедрения разработанных технических решений составил 5 млрд рублей.

Перспективы широкого использования

С учетом существующего износа строительных конструкций и объектов инфраструктуры потенциальный объем рынка услуг по усилению, ремонту и диагностике строительных конструкций под ключ с целью продления ресурса эксплуатации составляет не менее 850 млрд. рублей.