

# УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН И ПОСТНАПРЯГАЕМЫХ СТЕНДОВ

Часто требуется обеспечить надежную эксплуатацию уникальных, дорогих, исторически значимых конструкций, демонтаж и замена которых значительно дороже ремонта или невозможна вообще. Усиление строительных конструкций углепластиками является на сегодняшний день самым «бережливым» методом восстановления и повышения их эксплуатационных характеристик.

Выбор типа композиционного материала для усиления определяется условиями эксплуатации и назначением усиливаемой конструкции. Важным качеством композиционных материалов, имеющим существенное значение при выборе системы усиления железобетонной конструкции, является их упругое деформирование, вплоть до разрушения: они не обладают пластическими свойствами, и их разрушение носит хрупкий характер. В силу этого при проектировании усиления железобетонных элементов композиционными материалами необходимо накладывать ограничения на величину упругих деформаций бетона и стали, работающих совместно с композиционным материалом. Также необходимо иметь в виду, что упругий характер деформирования композиционного материала не способствует перераспределению напряжений в усиливаемой конструкции.

В последнее время углеродные волокна находят все большее применение при создании композиционных материалов, используемых при ремонте и усилении строительных конструкций.

В некоторых случаях для изгибаемых железобетонных конструкций возможно использование предварительно напряженных композиционных материалов. Применение предварительно напряженных полос композиционного материала имеет ряд преимуществ перед ненапрягаемыми: увеличивается момент сопро-

тивления усиливаемой конструкции, замедляется процесс трещинообразования, требуется меньшая площадь сечения материала усиления, увеличивается допустимая нагрузка на железобетонную конструкцию. Но к значительным недостаткам можно отнести увеличение стоимости и трудоемкости из-за усложнения технологии работ и применения дополнительного оборудования, увеличение продолжительности работ.

Предварительное напряжение композиционных материалов может быть выполнено путем напряжения конструкции с использованием постнапрягаемых стенов. Системы предварительного напряжения могут применяться в качестве внешнего армирования при усилении существующих конструкций зданий и сооружений. Наибольшее распространение в зарубежных странах получили шпренгельные системы на основе канатной арматуры повышенной коррозионной стойкости. Железобетонные конструкции (плиты) могут быть эффективно усилены путем размещения в надколонных зонах внешних пучков канатной арматуры, закрываемых впоследствии цементно-песчаной стяжкой.

Метод предварительного напряжения заключается в том, что на стадии изготовления в конструкции создается напряженное состояние. Требуемое напряжение создается за счет передачи усилия натяжения арматурных элементов при помощи анкерных устройств, состоящих из анкерной плиты и зажима.

При обеспечении совместной работы дополнительной арматуры с усиливаемой конструкцией только закреплением по концам с помощью анкерных устройств, без сцепления ее в пролете с бетоном конструкции, дополнительная арматура размещается снаружи конструкции и выполняет роль затяжки. В зависимости от места закрепления концов дополнительной арматуры может быть горизонтальная и шпренгельная затяжки, а также их сочетание.

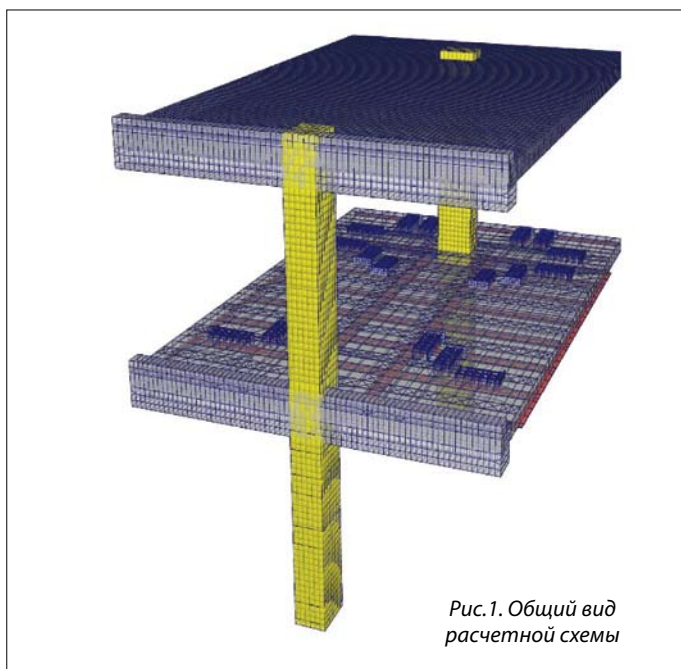


Рис. 1. Общий вид расчетной схемы

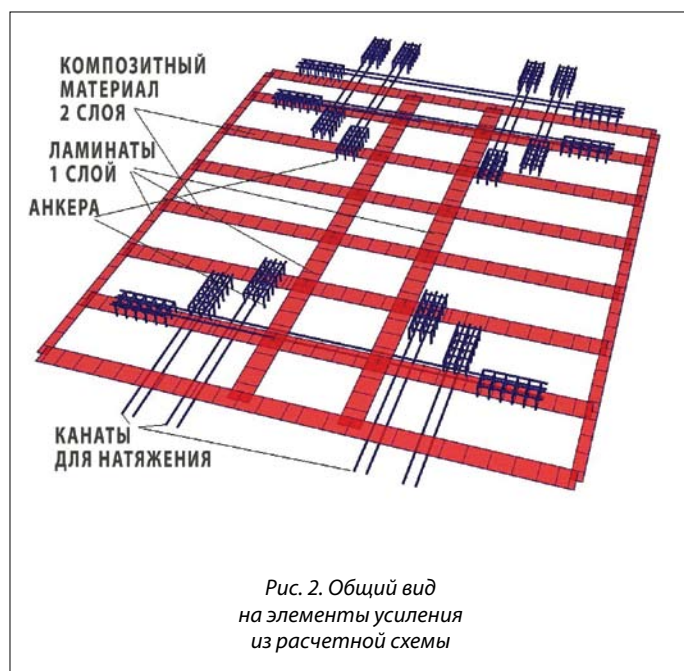


Рис. 2. Общий вид на элементы усиления из расчетной схемы

Для включения дополнительной арматуры в виде затяжек в работу предусматривается ее предварительное напряжение с обязательным контролем величины этого натяжения.

Роль затяжки выполняют специальные канаты заводского изготовления (арматурный семипроволочный канат диаметром от 12 до 15,7 мм) в пластиковой трубке, заполненной антикоррозийным составом, который способствует уменьшению сил трения при натяжении каната. Натяжение каната производят механическим способом при помощи гидравлического домкрата. Пластиковая трубка позволяет производить натяжение арматурных канатов после бетонирования и набора бетоном проектной прочности.

Предварительно напряженные арматурные элементы обычно натягиваются с одного конца. Предварительное напряжение можно регулировать (увеличивать или уменьшать) в любое время до завершения заливки арматуры путем перестановки домкрата. Это позволяет также выполнять частичное натяжение арматуры. Во время и после натяжения осуществляется контроль эффективной нагрузки натяжения.

Далее в статье рассмотрен метод расчета усиления железобетонных плит углеродными композиционными материалами на основе конечно-элементной модели в ПК SCADOffice с применением преднатяжения конструкции, реализуемой через режим «монтаж».

Режим «монтаж» предназначен для моделирования поведения конструкции (определения ее напряженно-деформированного состояния) в процессе возведения. Процесс возведения сооружения и, соответственно, расчет разбиваются на несколько этапов (стадий монтажа). Расчет каждого следующего этапа выполняется с учетом напряженно-деформированного состояния конструкции, определенного по результатам расчета предыдущих этапов. При переходе от одной стадии к другой в программе предусмотрена возможность включения и исключения из модели элементов конструкции, учет различного типа статических и динамических нагрузок, изменение модуля упругости материала, условий опирания и примыкания. По результатам расчета могут быть получены расчетные сочетания усилий, комбинации загружений, выполнен подбор арматуры в элементах железобетонных конструкций. Расчетная схема может быть подготовлена заранее в виде стандартного проекта или сформирована непосредственно в режиме «монтаж».

Основные расчетные положения:

- при проектировании усиления железобетонных конструкций тканью использовался метод расчета по предельным состояниям;
- система усиления спроектирована на восприятие растягивающих усилий с учетом совместной деформации внешней арматуры и бетона конструкции;
- в предельном состоянии изгибаемого элемента усилия в сжатой зоне воспринимаются бетоном и сжатой стержневой арматурой, а в растянутой — стержневой арматурой и внешней композитной арматурой;
- учитывается, что несущая способность конструкции достаточна для восприятия постоянной и ограниченной временной нагрузкой в случае повреждения системы усиления по каким-либо причинам.

Принципиальная схема усиления такова: наклейка на нижнюю поверхность накладок композитной арматуры (углепластика) производится с направлением волокон вдоль оси конструкции и поверх них поперечных накладок с направлением волокон перпендикулярно продольным накладкам. Обеспечение включения в работу усиления конструкции внешним армированием из углепластика в эксплуатационном состоянии происходит за счет применения системы предварительного напряжения на приопорных участках верхней поверхности плиты. Эта система позволяет прогнуть плиту вверх (напрячь), затем приклеить внешнюю арматуру, которая в последствии воспримет на себя растягивающие усилия и обеспечит несущую способность усиливаемой плиты (рис. 1, 2) Каждый этап усиления конструкции моделируется в режиме «монтаж».

Система усиления из композитных материалов представляет собой ткани из углеродных волокон Sika Wrap530C (VP): толщина — 0,293 мм, ширина — 300 мм, вес — 530 г/кв. м, модуль упругости — 231 000 Н/кв. мм, прочность на растяжение — 3 800 Н/кв. мм, деформация при разрыве — 1,64%, плотность — 1,8 г/кв. см); и эпоксидный клей Sikadur-330: прочность на сжатие — 65 Н/кв. мм, прочность на срез — 6 Н/кв. мм, адгезия к бетону — 4 Н/кв. мм, деформация при разрыве — 1,64%; модуль «Юнга» — 3 800 Н/кв. мм.

С учетом свойств отдельных компонентов усиления пролетной части плиты в программу задаются свойства не отдельно ткани и клея, а свойства ткани, пропитанной клеем, при толщине слоя 1 мм, согласно данным производителя.

Усиление предварительно напряженными канатами скрытых капителей безбалочного перекрытия выполняется с помощью арматурных канатов, соответствующих требованиям евро норм prEN10138, диаметром 15,7 мм (условный предел упругости  $\sigma_{0,1} = 1 520$  Н/кв. мм;  $\sigma_{0,2} = 1 570$  Н/кв. мм; временное сопротивление  $\sigma_b = 1 770$  Н/кв. мм). Стренд моделируется как стержень при следующих характеристиках каната: модуль упругости — 2,1·10<sup>7</sup> т/кв. м.

Усилие предварительного напряжения принято  $N = 12$  т. Сила натяжения стренда моделируется воздействием отрицательной температуры на стержень, равной  $T = -500$  °С.

Набор конечных элементов, моделирующих расчетную схему, в SCADOffice:

- объемный конечный элемент — 3 тип КЭ — несущие железобетонные колонны;
- оболочечный конечный элемент — 44 тип КЭ — железобетонная плита перекрытия и внешние холсты из углепластика;
- специальный конечный элемент — 55 тип КЭ, моделирующий упругую связь между узлами и учитывающий податливость материала между смежными узлами;
- пространственный стержень — 5 тип КЭ, моделирующий элементы усиления (стальные стержни);
- специальные элементы (связи конечной жесткости) — тип 51 — имитирует подвижность узлов анкера в пространстве.

Упругая связь моделирует совместную работу бетона и клея. При этом оболочечные элементы, моделирующие холст, задаются на расстоянии половины высоты сечения железобетонной плиты перекрытия от оболочечных элементов, моделирующих эту плиту.

Путем задания жесткостных характеристик упругой связи выполняется подбор композиционного материала и достигается необходимая площадь его поперечного сечения. Так как прочность клея мала по сравнению с прочностью холста, то в расчете учитывается только их площадь поперечного сечения.

Результаты расчета двух моделей без усиления и с системой усиления из композиционных материалов и постнатягаемых стрендов показывают уменьшение вертикальных деформаций и растягивающих напряжений в бетоне во второй модели, не превышающих требований нормативных документов. Усиление с использованием предварительно напряженной арматуры позволяет уменьшить моменты в приопорных зонах и воспринять усилия в сжатой зоне.

Разрабатываемый расчетный метод усиливаемых железобетонных конструкций (плит) позволяет получать более точную картину напряженно-деформируемого состояния конструкции до усиления и после усиления, также в нем нет допущений, которые вводятся в традиционный ручной расчет. Показано, что применение методики расчета позволяет повысить качество проектирования усиления железобетонных плит, сократить затраты на проведение опытно-конструкторских работ и натуральных испытаний в области исследования.

**Н. И. ВАТИН, д. т. н., профессор, зав. кафедрой ТОЭС ИСФ;  
А. А. ДЬЯЧКОВА, инженер, Е. В. КИШИНЕВСКАЯ, инженер,  
В. Д. КУЗНЕЦОВ, профессор, ГОУ СПб ГПУ**