

## Усиление строительных конструкций с использованием постнапряженного железобетона

*Магистр ГОУ СПГПУ Е.В. Кишиневская\*;  
д.т.н., профессор ГОУ СПГПУ Н.И. Ватин;  
профессор ГОУ СПГПУ В.Д. Кузнецов*

Основные конструкции современных зданий и сооружений выполняются из бетона, железобетона или кирпича. Преждевременное их разрушение, потеря герметичности, несущей способности и других эксплуатационных качеств приводят к нежелательным последствиям, а часто несут угрозу целостности сооружения и даже жизни людей. Поэтому своевременное проведение работ по усилению и ремонту строительных конструкций имеет весьма важное практическое значение.

К настоящему времени в отечественной и зарубежной практике накоплено множество различных способов и конструктивных приемов усиления. При разработке проектных решений можно использовать как традиционные способы усиления, так и современные, в основе которых применяется технология приклеивания высокопрочных углеродных волокон к несущим строительным конструкциям или усиление с использованием предварительно напряженной арматуры.

Системы предварительного напряжения в основном применяются в монолитном строительстве при возведении объектов гражданского, промышленного, транспортного и специального назначения. При использовании монолитного железобетона часто сталкиваются с проблемой низкой трещиностойкости бетона при его растяжении. Чтобы скомпенсировать возникающее в процессе эксплуатации растяжение, необходимо создать в железобетоне усилие сжатия, при этом знак напряжения в бетоне будет противоположен знаку напряжения от эксплуатационной нагрузки. Требуемое напряжение обеспечивается передачей усилия натяжения арматурных элементов. Растянутый почти до разрыва арматурный элемент железобетонной конструкции будет стремиться вернуться в первоначальное состояние, т.е. сжаться, тем самым создавая усилие обжатия бетона в растянутой зоне.

Создание напряженного состояния в конструкции на этапе изготовления, когда знак напряжения в материале противоположен знаку напряжений от эксплуатационной нагрузки, без сомнения, относится к числу великих изобретений в области инженерии XX века. Ученые, имеющие прямое отношение к разработке этой концепции в нынешнем её понимании, это Эжен Фрейссине (Франция) и Виктор Васильевич Михайлов (Россия). Для развития преднапряженного железобетона многое сделали Мерш, Леонгард, Финстервальдер, Витфохт (Германия), Эванс (Великобритания), Моранди, Леви (Италия), Гийон, Лакруа, Вирложе (Франция), Гервик, Лин (США), Вальтер (Швейцария), Торроха (Испания), Борджес (Португалия) и многие другие. Большую роль в разработке технологии сыграли и отечественные ученые.

Существуют две основные технологии строительства, основанные на натяжении стальных канатов, что придает дополнительную прочность постройкам - это постнапряжение и преднапряжение.

Отличие технологии постнапряжения от преднапряжения, осуществляемого в условиях завода ЖБИ, заключается в том, что напрягаемая арматура натягивается после бетонирования и набора бетоном достаточной передаточной прочности. Для того чтобы обеспечить натяжение арматуры после твердения бетона, арматура должна иметь возможность свободного перемещения в бетоне. Для этого она помещается в пластиковую (для системы без сцепления) или металлическую (для системы со сцеплением) трубку. Передача усилий на бетон осуществляется при помощи устанавливаемых на концы напрягаемых элементов анкерных устройств.

При натяжении на бетон применяются высокопрочная проволока в виде пучков и арматурные канаты [1]. Основным элементом системы является арматурный семипроволочный канат диаметром от 12 до 15,7 мм. Канат в заводских условиях заключается в пластиковую оболочку с прослойкой смазочного состава.

Канатная арматура поставляется, как правило, в бухтах весом 2,5-3 т. Такой канат в оболочке получил в нашей стране и за рубежом наименование «моностренд». В процессе арматурных работ канат размещается в арматурных каркасах и фиксируется по торцам конструкции при помощи анкерных устройств.

Система преднапряжения без сцепления канатной арматуры с бетоном получила широкое распространение в гражданском строительстве, так как имеет небольшие габариты и может быть использована в конструкциях небольших сечений.

В США ежегодный прирост преднапряженного железобетона с натяжением на бетон без сцепления составляет 30%, 41 предприятие сертифицировано на производство арматурных канатов для этих целей. В России в настоящее время систему натяжения на бетон применяют ряд строительных организаций, в т.ч.

«DSI-PSK», ЗАО «СТЭФС», ООО «СТС» и др. В Москве, Екатеринбурге, Воронеже и др. уже построен ряд объектов с применением этих систем для большепролетных перекрытий автостоянок, гаражей и общественных зданий, однако в нашей стране преднапряженный железобетон пока не нашел широкого применения в гражданском строительстве и строительстве автодорог, как это принято в США и других странах.

Система предварительного натяжения на бетон без сцепления для усиления плит перекрытий является новым способом усиления и еще не освоена для массового применения. Поэтому основной задачей в этом направлении является разработка практических рекомендаций по расчету и использованию данного метода усиления для последующего внедрения в проекты реконструкции несущих конструкций зданий.

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 [2]. Железобетонные конструкции (плиты) могут быть эффективно усилены путем размещения в надколонных зонах внешних пучков канатной арматуры, закрываемых впоследствии цементно-песчаной стяжкой.

Применение системы предварительного натяжения на бетон без сцепления для усиления плит перекрытий является новым способом усиления и еще не освоено для массового применения. Поэтому основной задачей в этом направлении является разработка практических рекомендаций по расчету и использованию данного метода усиления для последующего внедрения в проекты реконструкции несущих конструкций зданий.

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 играет роль затяжки.

В зависимости от места закрепления концов дополнительной арматуры может быть горизонтальная и шпренгельная затяжки, а также их сочетание.

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

Анализ имеющихся статей и публикаций по этой теме показывает [3, 4, 5], что результатов по исследованию методов усиления с использованием предварительно напряженной арматуры недостаточно. При этом отсутствуют расчеты данных задач при использовании ПК с применением метода конечных элементов.

Изучение предложенного в [5] метода моделирования предварительного напряжения в конструкции позволяет оценить влияние силы натяжения стренда на конструкцию. Показано, что в отсутствии нагрузки величина выпора перекрытия линейно зависит от усилия в стренде, моделируемом температурной нагрузкой. Из этой зависимости можно предположить влияние силы натяжения при усилении конструкции перекрытия.

Таким образом, научная проблема заключается в отсутствии методики моделирования системы усиления перекрытий с использованием предварительно напряженной арматуры, исследования и анализа их работы.

Рассмотрим возможность применения способа усиления с помощью предварительно напряженной арматуры в случае ослабления надпорных зон плиты перекрытия и наличия трещин. Исследуем железобетонную плиту (пролет – 7,2 м) в реконструируемом здании общественного назначения. В качестве примера взят реальный объект. Необходимость усиления была вызвана потерей несущей способности

вследствие воздействия пожара во время проведения строительно-монтажных работ (отстрел защитного слоя бетона, недопустимые деформации).

Расчет системы усиления с использованием предварительно напряженной арматуры может производиться при помощи традиционных программных средств путем приложения к расчетной схеме внешней нагрузки.

Прочность преднапряженных железобетонных конструкций не зависит от величин предварительного напряжения арматуры. Вот почему расчет на прочность любых предварительно напряженных конструкций ничем не отличается от расчета на прочность железобетонных конструкций без предварительного напряжения (расчет по I предельному состоянию). А при проверке трещиностойкости (расчет по II предельному состоянию) силы обжатия являются внешними силами наряду с внешней полезной нагрузкой [6, 7].

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.

Усиление предварительно напряженными канатами скрытых капителей безбалочного перекрытия осуществляется с помощью арматурных канатов, соответствующих требованиям Евронорм prEN10138 [8], диаметром 15,7мм (условный предел упругости  $\sigma_{0,1}=1520\text{Н/мм}^2$ ;  $\sigma_{0,2}=1570\text{Н/мм}^2$ ; временное сопротивление  $\sigma_b=1770\text{Н/мм}^2$ ). Стренд моделируется как стержень при следующих характеристиках каната: модуль упругости –  $2,1 \cdot 10^7 \text{ Т/м}^2$ .

Усилие предварительного напряжения принято  $N=16 \text{ т}$ . Сила натяжения стренда моделируется воздействием отрицательной температуры на стержень, равной  $T=-620^\circ\text{С}$ . Стренды устанавливаются сверху на перекрытии, в районе скрытых капителей, для снятия части пролетного момента.

Представлена разработка расчетной модели усиления конструкций (рис. 1, 2). Расчет был произведен в ПК SCAD.

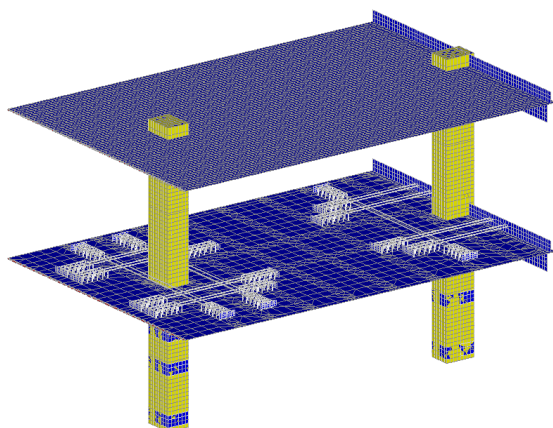


Рисунок 1. Расчетная модель усиливаемого перекрытия

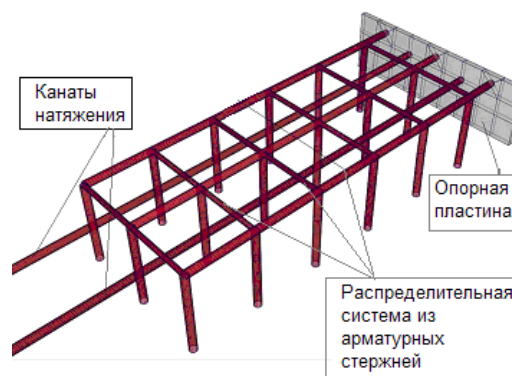


Рисунок 2. Общий вид верхнего узла усиления из расчетной схемы

Исходные расчетные данные:

- толщина монолитной железобетонной плиты перекрытия – 250мм (проектная толщина – 300мм);
- класс бетона по прочности на сжатие – В15 (класс бетона по проекту – В35);
- набор конечных элементов, моделирующих расчетную схему:
  - объемный конечный элемент – 36 тип КЭ – несущие железобетонные колонны;
  - оболочечный конечный элемент – 44 тип КЭ – железобетонная плита перекрытия;
  - пространственный стержень – 5 тип КЭ, моделирующий элементы усиления (стальные стержни);
  - специальные элементы (связи конечной жесткости) – тип 51-имитирует подвижность узлов анкера в пространстве.

В основу расчета положен метод конечных элементов с использованием в качестве основных неизвестных перемещения и поворотов узлов расчетной схемы [9]. В связи с этим идеализация конструкции выполнена в форме, приспособленной к использованию этого метода, а именно: система представлена в виде

набора тел стандартного типа (стержней, оболочек и связей конечной жесткости), называемых конечными элементами и присоединенных к узлам.

В ПК SCAD были созданы две модели.

Первая модель отражает напряженно-деформированное состояние перекрытия без нижнего защитного слоя и нижнего слоя арматуры. Вторая — напряженно-деформированное состояние перекрытия без нижнего защитного слоя и нижнего слоя арматуры при усилении перекрытия предварительным напряжением канатов.

Результаты, полученные при линейном расчете: прогиб для первой модели — 12,22 мм; для второй — 9,3 мм.

Метод усиления с помощью напрягаемых стрендов позволяет уменьшить значения прогибов, воспринимать постоянные и ограниченные временные нагрузки.

Использование предварительного напряжения позволяет не только усилить конструкцию, но и ликвидировать уже имеющиеся прогибы и трещины.

В ходе работы была разработана методика конечно-элементного моделирования и расчета системы усиления конструкции предварительно напряженными канатами. Разработана оригинальная конечно-элементная модель усиливаемого перекрытия, адекватно отражающая физическую сущность процессов работы конструкции и позволяющая получить более точные закономерности поведения конструкции в функции напряженного состояния.

Моделирование и расчет усиливаемых конструкций позволяет увидеть и оценить картину напряженно-деформированного состояния до усиления и после. Методика моделирования может быть также применена для разработки и проектирования усиления конструкций с использованием предварительно напряженной арматуры; проектными и строительными организациями для обоснования надежности и эффективности усиливаемых монолитных конструкций методом постнапряжения.

Данный способ расчета был практически внедрен при разработке проекта усиления перекрытия реконструируемого здания, поврежденного при пожаре.

## Литература

1. Мадатян С.А. Новые технологии и материалы для арматурных работ в монолитном железобетоне // Технологии бетонов. — № 3, 2006. С. 52-54.
2. П 1-98 к СНиП 2.03.01-84\* Пособие к строительным нормам республики Беларусь «Усиление железобетонных конструкций». Минстройархитектуры Республики Беларусь, 1998
3. Черныгов Е.А. Исследование эффективности применения технологии натяжения арматуры на бетон без сцепления // Молодые ученые в транспортной науке // Научные труды ОАО ЦНИИС, М.: 2005, с. 87-95.
4. Рекомендации по проектированию усиления железобетонных конструкций зданий и сооружений реконструируемых предприятий. Надземные конструкции и сооружения. Москва Стройиздат 1992
5. И.С. Дзюба, Н.И. Ватин, В.Д. Кузнецов Монолитное большепролетное ребристое перекрытие с постнапряжением. Технология и конструкции // С-Пб.: 2008
6. Бондаренко В.М. Примеры расчета железобетонных и каменных конструкций: Учебное пособие – М: Высш. шк., 2006.
7. СП 52-102-2004 «Предварительно напряженные железобетонные конструкции».
8. EC019009 prEN 10138-3 - Prestressing steels - Part 3: Strand.
9. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А.. Вычислительный комплекс SCAD. М.: Издательство АСВ, 2007. – 592с.
10. СНиП 2.03.01-84\* «Бетонные и железобетонные конструкции».

*\*Евгения Викторовна Кишиневская,*

*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

*Тел. моб. +7(904)332-97-05;*

*Эл. почта janeva2004@mail.ru*