

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 624.012.45

БАДАЛОВА
Екатерина Николаевна

**УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
МНОГОПУСТОТНЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ
ПРИКЛЕИВАНИЕМ АРМАТУРЫ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.23.01 – строительные конструкции,
здания и сооружения

Минск, 2013

Работа выполнена в Учреждении образования «Полоцкий государственный университет»

Научный руководитель

Лазовский Дмитрий Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
ректор Учреждения образования
«Полоцкий государственный
университет», г. Новополоцк

Официальные оппоненты:

Пастушков Геннадий Павлович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Мосты и тоннели»
Белорусского национального технического
университета, г. Минск

Щербач Александр Валерьевич,
кандидат технических наук, заведующий
лабораторией металлических конструкций
и арматурных изделий в конструктивных
системах зданий и сооружений
РУП «Институт БелНИИС», г. Минск

Оппонирующая организация

**Республиканское унитарное
предприятие «Институт жилища –
НИПТИС им. Атаева С.С.», г. Минск**

Защита состоится 23 января 2014 г. в 14⁰⁰ часов на заседании Совета по защите диссертаций Д 02.05.09 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: г. Минск, проспект Независимости, 150, корпус № 15, ауд. 808; e-mail: nrak@bntu.by; тел./факс 8 (017) 265-96-97.

Отзывы в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, следует направлять на имя ученого секретаря совета по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корпус 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 20 декабря 2013 г.

Учёный секретарь
совета по защите диссертаций



Рак Н. А.

© Бадалова Е. Н., 2013
© БНТУ, 2013

ВВЕДЕНИЕ

Одно из важнейших направлений строительной отрасли в настоящее время – ремонт и реконструкция промышленных и гражданских зданий. Проводимые в связи с этим мероприятия зачастую включают работы по усилению несущих конструкций. Поиск эффективных методов усиления конструкций эксплуатируемых строительных сооружений является актуальной проблемой.

Среди несущих конструкций перекрытий и покрытий реконструируемых зданий значительную долю составляют железобетонные многопустотные плиты. Один из эффективных методов усиления железобетонных многопустотных плит перекрытий – увеличение площади поперечного сечения продольной рабочей арматуры путем приклеивания дополнительной арматуры из углеродных волокон в растянутой зоне конструкции.

Арматура из углеродных волокон нашла широкое применение в зарубежной практике строительства. На территории Республики Беларусь она применяется сравнительно недавно и недостаточно изучена. Отсутствует нормативная база, регламентирующая прочностные и деформационные характеристики арматуры из углеродных волокон, а также требования к расчету конструкций, усиленных этой арматурой. В связи с этим актуальным является проведение экспериментально-теоретических исследований железобетонных многопустотных плит перекрытий, усиленных приклеиванием в растянутой зоне дополнительной арматуры из углеродных волокон.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Работа выполнялась в соответствии с программой Министерства образования Республики Беларусь и учреждения образования «Полоцкий государственный университет» ГБ № 3511 «Совершенствование методов расчета несущих строительных конструкций с новыми видами армирования, разработка теоретических основ оценки технического состояния и усиления конструкций эксплуатируемых сооружений», а также в соответствии с Программой технического нормирования и стандартизации Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь на 2006 г., дополнение № 2, п. 3.5.03.29 «Разработка технического кодекса установившейся практики (ТКП) “Конструкции бетонные и железобетонные. Правила проектирования. Реконструкция и усиление зданий и сооружений”».

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы – усовершенствование методики расчета с использованием диаграмм деформирования материалов изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных в растянутой зоне приклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон, с учетом особенностей ее совместной работы с бетоном.

Поставленная цель достигается решением следующих *задач*:

- экспериментальное подтверждение эффективности использования арматуры из углеродных волокон при усилении растянутой зоны железобетонных многопустотных плит перекрытий;

- экспериментальное выявление особенностей совместной работы с бетоном арматуры из углеродных волокон при усилении железобетонных многопустотных плит перекрытий;

- разработка и экспериментально-теоретическое исследование методов увеличения прочности контактного соединения с бетоном арматуры из углеродных волокон при ее приклеивании в растянутой зоне;

- усовершенствование методики расчета прочности контактного соединения с бетоном дополнительной арматуры из углеродных волокон при усилении приклеиванием в растянутой зоне, в том числе при усилении зоны анкеровки дополнительными элементами в виде холста;

- усовершенствование методики расчета прочности по сечению, нормальному к продольной оси, жесткости и трещиностойкости с использованием диаграмм деформирования материалов изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных арматурой из углеродных волокон, с учетом ее совместной работы с бетоном.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются железобетонные многопустотные плиты перекрытий, усиленные в растянутой зоне приклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон. *Предметом исследования* являются прочность, жесткость и трещиностойкость железобетонных многопустотных плит перекрытий, усиленных в растянутой зоне приклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон, особенности совместной работы с бетоном и прочность контактного соединения с бетоном арматуры из углеродных волокон.

Положения, выносимые на защиту

- усовершенствованные методики расчета прочности по сечению, нормальному к продольной оси, жесткости и трещиностойкости с использованием диаграмм деформирования материалов изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных арматурой из углеродных волокон, с учетом ее совместной работы с бетоном, позволяющие учесть влияние дополнительных эле-

ментов в виде холста и расположение арматуры из углеродных волокон в вертикальных пазах;

- метод увеличения прочности контактного соединения с бетоном арматуры из углеродных волокон при ее приклеивании на поверхность бетона дополнительными элементами в виде холста;

- усовершенствованная методика расчета прочности контактного соединения с бетоном дополнительной арматуры из углеродных волокон при усилении приклеиванием в растянутой зоне, позволяющая учесть работу дополнительных элементов в виде холста, угол ориентации их волокон и расположение дополнительной арматуры из углеродных волокон в вертикальных пазах;

- результаты экспериментально-теоретического исследования прочности, жесткости и трещиностойкости многопустотных плит перекрытий, усиленных приклеиванием арматуры из углеродных волокон.

Личный вклад соискателя

Конкретное личное участие автора в получении научных результатов, представленных в диссертации, заключается в формулировании цели и определении задач исследования, в проведении экспериментов и обработке их результатов, в усовершенствовании методики расчета предельного сдвигающего усилия для контактного соединения арматуры из углеродных волокон с бетоном усиленных железобетонных конструкций и методик расчета прочности, жесткости и трещиностойкости изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных арматурой из углеродных волокон.

Экспериментальные исследования, результаты которых отражены в публикациях [7–9], проведены совместно с соавтором. Конструктивное решение увеличения прочности контактного соединения с бетоном дополнительной арматуры из углеродных волокон, приклеенной к бетонной поверхности усиливаемой конструкции, дополнительными элементами в виде холста [11], заключение по основным научным результатам диссертации [5] разработаны совместно с соавтором.

Апробация результатов диссертации

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

- XV международном научно-методическом семинаре «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь», Новополоцк, 2008 г.;

- XVI международном научно-методическом семинаре «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь», Брест, 2009 г.;

- Junior researchers conference «National and European dimension in research», Novopolotsk, April 28–29, 2010;

- XVII международном научно-методическом семинаре «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров», Гродно, 2010 г.;

- Junior researchers conference «National and European dimension in research», Novopolotsk, April 27–28, 2011;

- третьем международном симпозиуме «Проблемы современного бетона и железобетона», Минск, 2011 г.;

- XVIII международном научно-методическом семинаре «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь», Новополоцк, 2012 г.

Опубликованность результатов диссертации

По теме диссертации опубликовано 11 работ, из них:

- 5 статей в научных изданиях, соответствующих перечню ВАК Республики Беларусь, общим объемом 2,59 авторского листа;

- 5 статей в сборниках научных трудов международных конференций и семинаров;

- 1 патент.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, основной части, представленной 4 главами, заключения, библиографического списка из 119 наименований, приложения.

Общий объем диссертации составляет 141 страницу, в том числе: 72 рисунка – на 59 страницах; 10 таблиц – на 11 страницах; 1 приложение – на 1 странице.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** представлен обзор и анализ существующих методов усиления железобетонных многопустотных плит перекрытий, их преимуществ и недостатков. Рассмотрена возможность применения арматуры из композиционных материалов на основе углеродных волокон для армирования железобетонных конструкций, а также в качестве дополнительной арматуры при усилении. Благодаря ряду положительных свойств, таких как высокая прочность на растяжение при достаточно высоком модуле упругости, коррозионная стойкость, высокая усталостная прочность, небольшой собственный вес, простота монтажа и др., арматура из углеродных волокон является хорошей

альтернативой стальной арматуре и широко используется для усиления железобетонных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений во многих странах Европы и Северной Америки.

Рассмотрены методы расчета прочности, ширины раскрытия трещин и прогиба изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных увеличением поперечного сечения. Разработке методов оценки технического состояния эксплуатируемых железобетонных конструкций и расчета их усиления посвящены труды Г. Г. Абрамяна, В. М. Бондаренко, С. В. Бондаренко, А. П. Жукьяна, В. Г. Казачка, М. И. Кисилиера, В. А. Клевцова, А. А. Кондратчика, Е. Г. Кремневой, Ю. Д. Кузнецова, Д. Н. Лазовского, А. И. Мальганова, Б. Н. Мизернюка, Н. М. Онуфриева, Т. М. Пецольда, В. С. Плевкова, А. И. Полищука, Б. С. Поповича, Е. А. Рабиновича, Р. С. Санжаровского, Г. М. Спрыгина, В. В. Тура, Л. Н. Фомицы, А. И. Хачатряна, Е. Р. Хило, А. Л. Шагина и других ученых.

Приведены требования зарубежных нормативных документов, рекомендаций¹ и расчетные зависимости различных авторов² к расчету изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных приклеиванием пластин из композиционного материала, по прочности сечений, нормальных к продольной оси, по жесткости и трещиностойкости.

Рассмотрены методы расчета прочности контактного соединения дополнительной арматуры из углеродных волокон с бетоном усиленной железобетонной конструкции. Зависимости для расчета предельного сдвигающего усилия, воспринимаемого контактным швом, предложены R. Niedermeier, C. Teng, V. Ferracuti, E. Martinelli, M. Savoia. При расчете прочности контактного соединения нормами и рекомендациями зарубежных стран выдвигаются требования по ограничению продольных деформаций дополнительной арматуры (ACI 440.2R-02, CNR DT 200/2004) или изменению напряжения в дополнительной арматуре между двумя соседними трещинами изгиба (JSCE, Fib Bulletin 14).

При наличии большого числа экспериментально-теоретических исследований и предложений по расчету прочности контактного соединения «бетон – арматура из углеродных волокон» отсутствует методика расчета прочности контакта при усилении зоны анкеровки арматуры из углеродных волокон дополнительными элементами.

Вторая глава посвящена экспериментально-теоретическому исследованию прочности контактного соединения арматуры из углеродных волокон с бетоном конструкции. Опытными образцами являлись фрагменты железобетонных балок длиной 500 мм с размерами поперечного сечения 140(b)×250(h) мм

¹ ACI-440R-02, ACI440.2R-02, SIA 166, CNR DT 200/ 2004, Fib Bulletin 14.

² Шилин А. А., Gamino A. L., Bittencourt T. N., Holzenkämpfer P.

с приклеенной в нижней зоне дополнительной арматурой. В качестве дополнительной арматуры использовали пластины шириной 50 и толщиной 1,2 мм из углеродных волокон. Производителем используемой арматуры из углеродных волокон является фирма Sika (Швейцария).

Испытание опытных образцов производили путем сдвига железобетонного элемента относительно арматуры из углеродных волокон, неподвижно закрепленной на испытательном стенде, моделирующем сдвиг при изгибе в реальной конструкции.

Варьируемые параметры опытных образцов: длина приклеивания пластины из углеродных волокон (от 25 до 500 мм); прочность бетона опытных образцов (средняя прочность бетона на сжатие (f_{cm} , МПа): 23.6, 30.4, 40.1); способ обеспечения совместной работы пластин из углеродных волокон с бетоном (приклеивание пластин к наружной поверхности бетона; приклеивание пластин к наружной поверхности бетона с усилением зоны приклейки дополнительными элементами в виде холста из углеродных волокон; вклеивание пластин в предварительно выполненные вертикальные пазы); угол ориентации волокон дополнительного усиливающего элемента в виде холста относительно продольной оси образца (от 0 до 90°).

С увеличением прочности бетона возрастала прочность контактного соединения арматуры из углеродных волокон с бетоном [9]. Рост прочности контактного соединения наблюдали также при увеличении длины приклейки арматуры из углеродных волокон к бетону от 25 до 200 мм для образцов с приклеенной к наружной поверхности бетона пластиной и вклеенной в вертикальный паз пластиной шириной 25 мм. При дальнейшем увеличении длины приклейки прочность контакта не увеличивалась. Для опытных образцов с пластиной из углеродных волокон шириной 50 мм, вклеенной в вертикальный паз, наблюдался рост сдвигающего усилия на длине от 80 до 500 мм [5, 7, 8].

Испытание образцов с усиленной зоной приклейки показало, что значение сдвигающего усилия, при котором происходит разрушение контактного соединения, зависит от угла расположения волокон холста α по отношению к продольной оси опытного образца. Максимальное увеличение значения разрушающего сдвигающего усилия (на 18...40 %) достигнуто при ориентации волокон холста под острым углом ($\alpha = 15...45^\circ$) [2, 11].

В результате исследований усовершенствованы и экспериментально обоснованы зависимости для вычисления сдвигающего усилия (T_{sh} , Н), при котором происходит разрушение контактного соединения арматуры из углеродных волокон с бетоном при различных способах обеспечения совместной работы [5]:

- приклеиванием арматуры из углеродных волокон к наружной поверхности бетона

$$T_{sh} = b_{s,ad} \sqrt{2 \cdot E_{s,ad} \cdot t_{s,ad} \cdot k_f \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{cm}}}; \quad (1)$$

- вклеиванием арматуры из углеродных волокон в вертикальные пазы

$$T_{sh} = 2 \cdot b_{s,ad} \sqrt{E_{s,ad} \cdot t_{s,ad} \cdot k_f \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}}}; \quad (2)$$

- приклеиванием арматуры из углеродных волокон к наружной поверхности бетона с усилением зоны приклеивания дополнительными элементами в виде холста

$$T_{sh} = b_{s,ad} \sqrt{2 \cdot E_{s,ad} \cdot t_{s,ad} \cdot k_\alpha \cdot k_f \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}}}, \quad (3)$$

где $b_{s,ad}$, $t_{s,ad}$ и $E_{s,ad}$ – соответственно ширина, толщина (мм) и модуль упругости (МПа) арматуры (пластины) из углеродных волокон;

f_{ck} – нормативное сопротивление бетона осевому сжатию, МПа;

f_{ctm} – прочность бетона на осевое растяжение, МПа;

$k_f = 0.077 \dots 0.596$ – коэффициент, значение которого определяется путем обработки экспериментальных данных;

$k_b = \sqrt{\frac{2 - b_f / b_c}{1 + b_f / 400}}$ – коэффициент, учитывающий распределение касательных напряжений на ширине, большей ширины арматуры из углеродных волокон (b_f , b_c , мм);

k_α – коэффициент, учитывающий влияние угла ориентации волокон холста на прочность контакта, предлагается определять по формуле

$$k_\alpha = 1 + 3.375 \cdot \alpha \cdot e^{-4\alpha}, \quad (4)$$

где α – угол ориентации волокон холста по отношению к продольной оси элемента, рад.

В третьей главе представлены результаты и анализ экспериментальных исследований железобетонных многпустотных плит перекрытий, усиленных в растянутой зоне арматурой (пластинами) из углеродных волокон [1, 3, 6, 10]. Опытными образцами являлись: плита П-1 – испытана как эталонная без усиления; плиты П-2, П-3, П-4 – усилены приклеиванием к наружной поверхности бетона пластин из углеродных волокон (отличались подготовкой поверхности бетона перед приклеиванием и типом пластин из углеродных волокон: для П-2 – пластины шириной 50, толщиной 1.4 мм; для П-3 и П-4 – пластины шириной 50, толщиной 1.2 мм); плита П-5 – усилена приклеиванием к наружной поверхности бетона пластин из углеродных волокон шириной 50,

толщиной 1.2 мм с усилением зоны анкеровки холстом из углеродных волокон; плита П-6 – усилена вклеиванием в вертикальные пазы пластин из углеродных волокон шириной 25, толщиной 1.2 мм.

Разрушение опытных плит П-2, П-3, П-4, П-5 происходило по сечению, нормальному к продольной оси, со сдвигом дополнительной арматуры из углеродных волокон в результате среза контактного слоя бетона усиленной конструкции. У плиты П-2 первоначально произошел сдвиг одной пластины относительно бетона, а при дальнейшем нагружении – разрыв второй пластины. Во всех случаях разрушение имело хрупкий характер. Разрушение плиты П-6 произошло по сечению, нормальному к продольной оси, в зоне действия максимального изгибающего момента в результате разрыва одной пластины из углеродных волокон.

Усилением многопустотных плит перекрытия приклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон увеличена прочность конструкции по сравнению с неусиленной плитой П-1: в 1.73 раза для плиты П-2; 1.45 – для П-3; 1.68 – для П-4; 2.13 – для П-5 и 1.81 раза – для П-6.

Усиление приклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон в растянутой зоне оказало влияние на деформации, образование и раскрытие трещин в многопустотных плитах. Установлено, что для усиленных плит значение изгибающего момента, при котором прогиб конструкции достигает предельной величины ($l_{eff}/197 = 29.6$ мм), увеличивается в 1.29...1.51 раза по сравнению с неусиленной плитой (рисунок 1).

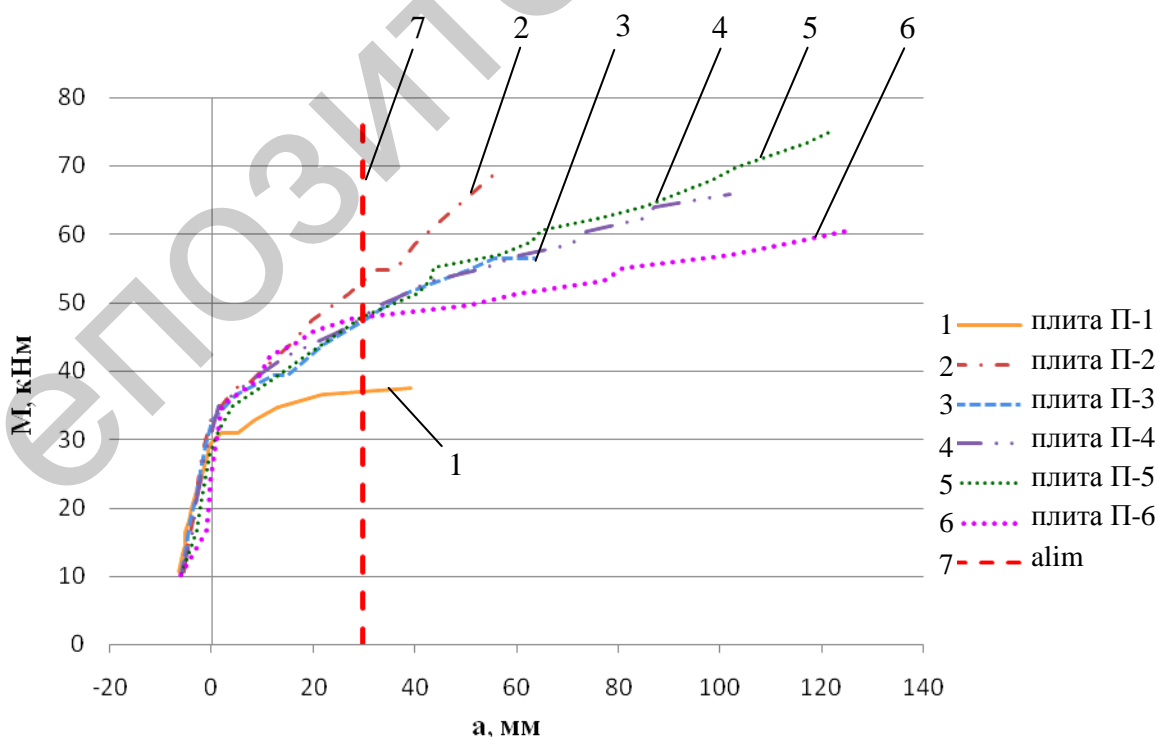


Рисунок 1 – Изменение прогиба плиты с уровнем нагружения

Момент трещинообразования M_{cr} для усиленных плит по сравнению с неусиленной плитой увеличился на 13...24 %. В 1.27...1.53 раза возросло значение изгибающего момента, при котором ширина раскрытия трещин, измеренная на уровне центра тяжести предварительно напряженной арматуры плиты, достигла предельного значения 0.2 мм.

Положительное влияние, которое арматура из углеродных волокон оказала на величину прогибов и ширину раскрытия трещин, объясняется выявленными особенностями трещинообразования усиленных плит. При исследовании трещинообразования установили увеличение длины зоны образования трещин, нормальных к продольной оси, для усиленных плит по сравнению с неусиленной плитой. Отношение длины участка с трещинами для усиленных и неусиленной плит изменялось в процессе нагружения и в предельном состоянии составило 1.58...1.84.

В четвертой главе представлены методики расчета прочности, жесткости и трещиностойкости изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных арматурой из углеродных волокон [3, 4, 5]. Расчет прочности по сечению, нормальному к продольной оси изгибаемой конструкции, усиленной в растянутой зоне арматурой из углеродных волокон, предлагается производить на основе деформационной расчетной модели (рисунок 2).

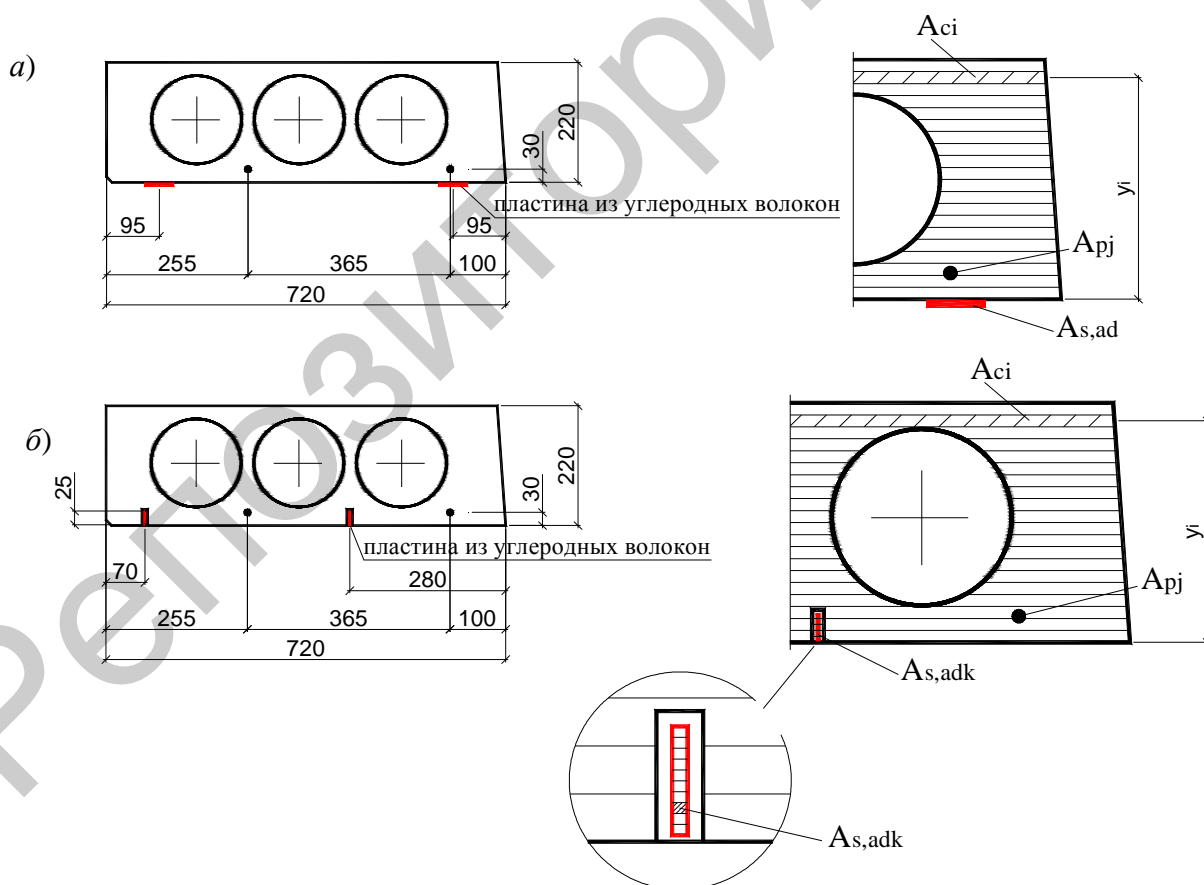


Рисунок 2 – Расчетная модель нормального к продольной оси сечения многопустотной плиты, усиленной арматурой из углеродных волокон приклеиванием к наружной поверхности бетона (а), вклеиванием в пазы (б)

Поперечное сечение многопустотной плиты, усиленной в растянутой зоне дополнительной арматурой из углеродных волокон, согласно деформационной модели представляли совокупностью элементарных площадок. При этом дополнительную арматуру при горизонтальном ее размещении в растянутой зоне моделировали одной элементарной площадкой, а при вертикальном размещении разбивали по высоте на ряд элементарных площадок, что позволяло учесть работу на изгиб арматуры из углеродных волокон, расположенной вертикально.

Рассматривали три стадии работы изгибаемой конструкции: первая – отпуск предварительно напряженной арматуры основного сечения; вторая – эксплуатация, предшествующая усилению конструкции; третья – эксплуатация усиленной конструкции под воздействием внешней нагрузки.

Параметры напряженно-деформированного состояния усиленной конструкции на третьей стадии определяли из решения системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} \cdot A_{ci} \cdot (y_{0,ad} - y_i) + \sum_{j=1}^m \sigma_{pj} \cdot A_{pj} \cdot (y_{0,ad} - y_j) + \sum_{k=1}^t \sigma_{s,adk} \cdot A_{s,adk} \cdot (y_{0,ad} - y_k) - M = 0, \\ \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} \cdot A_{ci} + \sum_{j=1}^m \sigma_{pj} \cdot A_{pj} + \sum_{k=1}^t \sigma_{s,adk} \cdot A_{s,adk} = 0, \\ \varepsilon_{ci} = \frac{1}{r_{ad}} (y_{0,ad} - y_i) + \varepsilon_{0ci} + \varepsilon_{1ci}, \\ \varepsilon_{pj} = \frac{1}{r_{ad}} (y_{0,ad} - y_j) + \varepsilon_{0pj} + \varepsilon_{1pj}, \\ \varepsilon_{s,adk} = \frac{1}{r_{ad}} (y_{0,ad} - y_k), \\ \sigma_{ci} = f(\varepsilon_{ci}), \sigma_{pj} = f(\varepsilon_{pj}), \sigma_{s,adk} = f(\varepsilon_{s,adk}), \end{array} \right. \quad (5)$$

где σ_{ci} , σ_{pj} , $\sigma_{s,adk}$ – нормальные напряжения в элементарной площадке с координатой y_i , y_j , y_k бетона, арматуры основного сечения, дополнительной арматуры из углеродных волокон соответственно;

$y_{0,ad}$ – расстояние от выбранной оси до центра тяжести сечения усиленного элемента;

y_i , y_j , y_k – расстояние от выбранной оси до центра тяжести элементарной площадки бетона, арматуры основного сечения, дополнительной арматуры из углеродных волокон соответственно;

A_{ci} , A_{pj} , $A_{s,adk}$ – площадь поперечного сечения элементарной площадки бетона, арматуры основного сечения, дополнительной арматуры из углеродных волокон соответственно;

M – изгибающий момент от внешней нагрузки;

ε_{ci} , ε_{0ci} , ε_{1ci} – продольные относительные деформации элементарной площадки с координатой y_i бетона основной части сечения соответственно после усиления, в момент обжатия, перед усилением;

ε_{pj} , ε_{0pj} , ε_{1pj} – продольные относительные деформации элементарной площадки с координатой y_j предварительно напряженной арматуры основного сечения соответственно после усиления, в момент обжатия, перед усилением;

$\varepsilon_{s,adk}$ – продольные относительные деформации элементарной площадки с координатой y_k дополнительной арматуры из углеродных волокон после усиления;

$1/r_{ad}$ – кривизна продольной оси сечения усиленной конструкции от нагрузки, приложенной после усиления.

Относительные деформации ε_{0ci} , ε_{1ci} , ε_{0pj} , ε_{1pj} вычисляли при рассмотрении напряженно-деформированного состояния конструкции на первых двух стадиях. Параметры напряженно-деформированного состояния конструкции определяли в программе «Бета 4.2», усовершенствованной с учетом предложенной методики (рисунок 3).

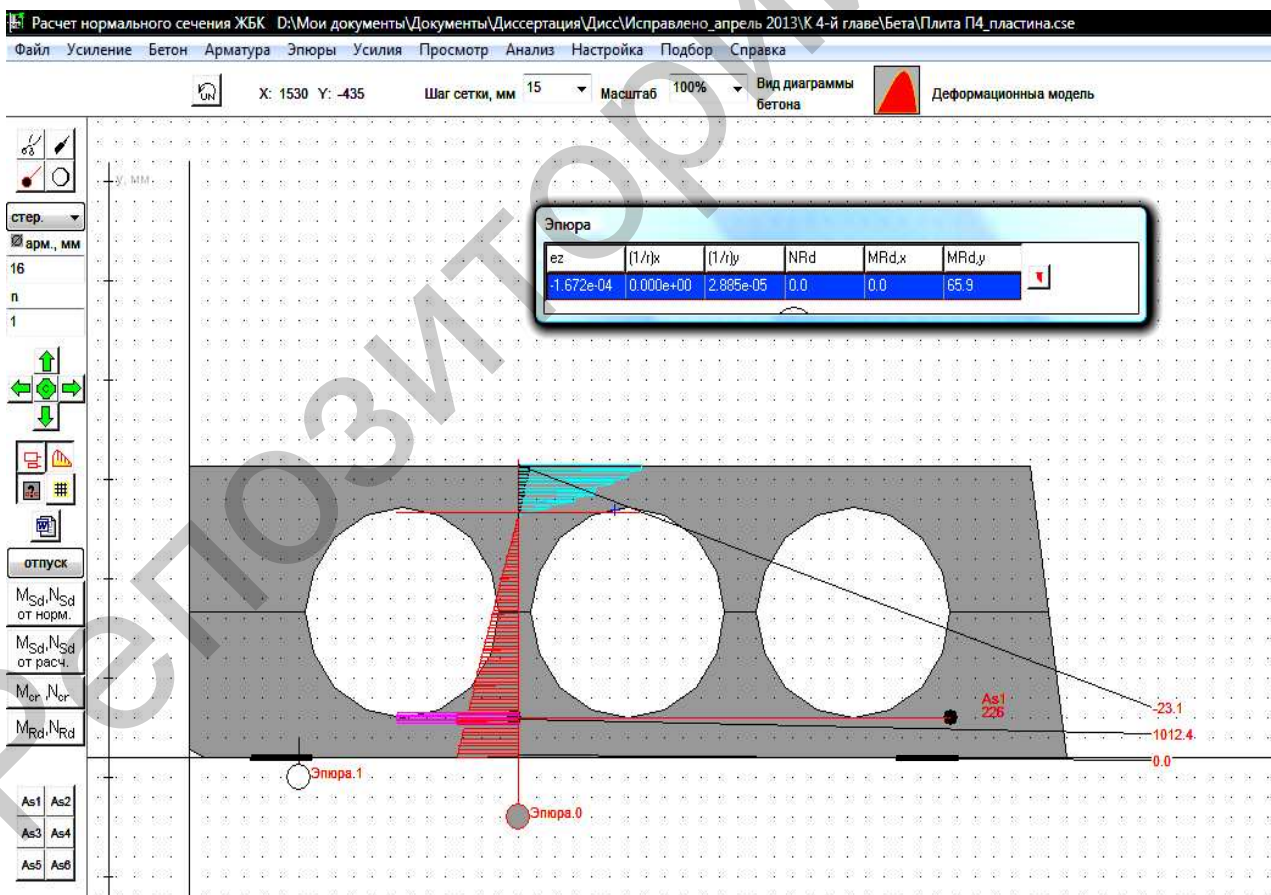


Рисунок 3 – Окно программы «Бета 4.2» при расчете параметров напряженно-деформированного состояния плит, усиленных арматурой из углеродных волокон

Предельное состояние усиленной конструкции для случая разрушения по растянутой зоне может наступать при достижении продольных относительных деформаций основной или дополнительной арматуры из углеродных волокон предельной величины соответственно ε_{su} или $\varepsilon_{su,ad}$. Для случая разрушения по сжатой зоне – при достижении бетоном сжатой зоны предельной относительной деформации ε_{cu} .

Предельные относительные деформации дополнительной арматуры из углеродных волокон $\varepsilon_{su,ad}$ (рисунок 4) определяли по расчетным зависимостям:

- при усилении плит приклеиванием к поверхности бетона дополнительной арматуры из углеродных волокон

$$\varepsilon_{su,ad} = k_c \cdot k_{cr} \sqrt{\frac{2 \cdot k_f \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}}}{E_{s,ad} \cdot t_{s,ad} / 1 \text{ мм}}}; \quad (6)$$

- при усилении плит вклеиванием в вертикальные пазы дополнительной арматуры из углеродных волокон

$$\varepsilon_{su,ad} = k_{cr} \sqrt{\frac{4 \cdot k_f \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}}}{E_{s,ad} \cdot t_{s,ad} / 1 \text{ мм}}}; \quad (7)$$

- при усилении плит приклеиванием к поверхности бетона дополнительной арматуры из углеродных волокон с усиленной зоной анкеровки холстом из углеродных волокон

$$\varepsilon_{su,ad} = k_c \cdot k_{cr} \sqrt{\frac{2 \cdot k_\alpha \cdot k_f \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}}}{E_{s,ad} \cdot t_{s,ad} / 1 \text{ мм}}}, \quad (8)$$

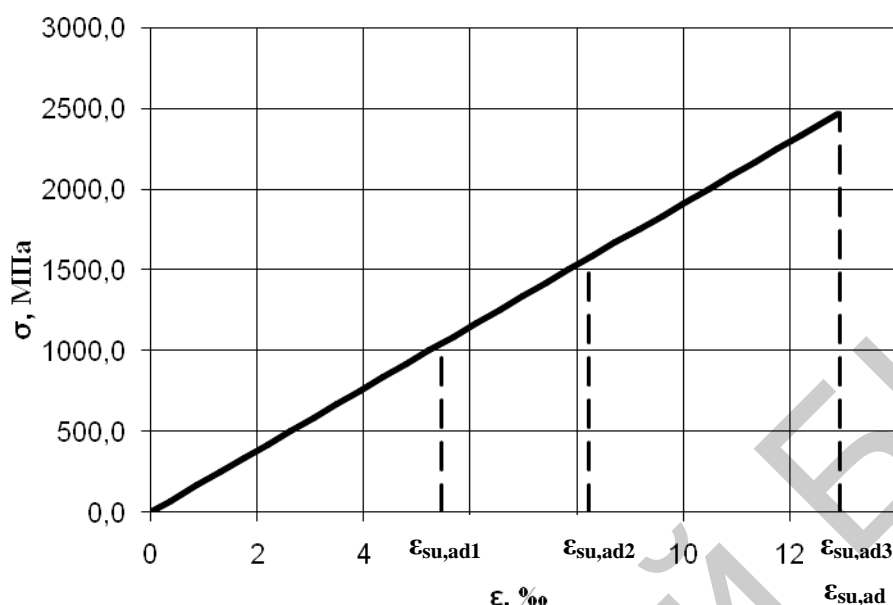
где k_c – коэффициент, учитывающий качество подготовленной поверхности: при отсутствии шлифования поверхности бетона перед приклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон $k_c = 0.75$, при подготовке поверхности бетона, включая шлифование $k_c = 1$;

$k_f = 0.107 \dots 0.443$ – коэффициент, установленный в результате обработки экспериментальных данных при различных способах обеспечения совместной работы арматуры из углеродных волокон с бетоном конструкции;

k_{cr} – коэффициент, учитывающий работу контактного соединения дополнительной арматуры из углеродных волокон с бетоном в зоне изгиба на участках между трещинами: $k_{cr} = 1.67$ – при усилении плит приклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон к наружной поверхности бе-

тона; $k_{cr} = 1.56$ – при усилении плит вклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон в вертикальные пазы;

$f_{ck}, f_{ctm}, E_{s,ad}, \text{МПа}; t_{s,ad}, \text{мм}.$



Предельные значения продольных относительных деформаций арматуры из углеродных волокон при усилении плит: $\epsilon_{su,ad1}$ – приклеиванием к поверхности бетона; $\epsilon_{su,ad2}$ – приклеиванием к поверхности бетона с усилением зоны анкеровки холстом из углеродных волокон; $\epsilon_{su,ad3}$ – вклеиванием в вертикальные пазы; $\epsilon_{su,ad}$ – предельная относительная деформация при разрыве

Рисунок 4 – Диаграмма деформирования арматуры из углеродных волокон при расчете прочности сечений железобетонных конструкций, усиленных арматурой из углеродных волокон

Прогиб железобетонной многпустотной плиты, усиленной приклеиванием арматуры из углеродных волокон, от действия внешней нагрузки предлагается определять по следующей зависимости:

$$a = k_r \cdot \int_0^l \bar{M}(x) \cdot \frac{1}{r(x)} \cdot dx, \quad (9)$$

где k_r – коэффициент, учитывающий особенность работы усиленных конструкций, проявляющаяся в увеличении длины участка с трещинами;

$\bar{M}(x)$ – изгибающий момент в сечении с координатой x по длине пролета от действия единичной силы, приложенной по направлению искомого перемещения;

$\frac{1}{r(x)}$ – кривизна усиленной плиты в сечении x , определяемая от действия усилия предварительного напряжения и внешней нагрузки.

Ширину раскрытия трещин, нормальных к продольной оси изгибаемого элемента, усиленного дополнительной арматурой из углеродных волокон, предлагается определять согласно требованиям действующих нормативных документов (СНБ 5.03.01-02) с учетом особенностей трещинообразования, выявленных в результате экспериментальных исследований:

$$w = k_r \cdot s_{rm} \cdot \varepsilon_{sm}, \quad (10)$$

где s_{rm} – среднее расстояние между трещинами;

ε_{sm} – средние относительные деформации стержневой арматуры, определенные с учетом работы дополнительной арматуры из углеродных волокон и работы бетона на растяжение.

Сравнительный анализ результатов расчета с экспериментальными данными показал, что предложенная методика позволяет с достоверной точностью определять значение изгибающего момента, соответствующего прочности усиленных плит, прогиба и ширины раскрытия трещин при действии вертикальной нагрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили эффективность способа усиления железобетонных многопустотных плит перекрытия приклеиванием в растянутой зоне дополнительной арматуры из углеродных волокон с целью повышения их прочности, жесткости и трещиностойкости [1, 2, 6, 10].

2. В результате проведенных экспериментальных исследований установлены возможные схемы разрушения контактного соединения бетона с арматурой из углеродных волокон, приклеенной к наружной поверхности бетона конструкции и вклеенной в предварительно выполненные вертикальные пазы, заключающиеся в сдвиге пластины относительно бетона с разрушением бетона при срезе [2, 5, 9].

3. Разработан способ увеличения прочности контактного соединения с бетоном дополнительной арматуры из углеродных волокон, приклеенной к бетонной поверхности усиливаемой конструкции, заключающийся в применении дополнительных усиливающих элементов в виде холста при ориентации его волокон относительно продольной оси конструкции под острым углом ($\approx 15^\circ$) [2, 7, 8, 11].

4. Усовершенствована и экспериментально обоснована методика расчета предельного сдвигающего усилия для контактного соединения арматуры из углеродных волокон с бетоном железобетонных конструкций, усиленных приклеиванием к поверхности бетона в растянутой зоне конструкции дополнительной арматуры из углеродных волокон, учитывающая наличие дополнительных усиливающих элементов в виде холста в зоне контакта, а также при размещении дополнительной арматуры из углеродных волокон в вертикальных пазах [5, 10].

5. Усовершенствована методика расчета прочности по нормальному к продольной оси сечению изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных арматурой из углеродных волокон, на основе деформационной модели, учитывающая предельную относительную деформацию дополнительной арматуры из углеродных волокон при различных способах обеспечения ее совместной работы с бетоном [3, 5, 10].

6. Усовершенствована методика расчета прогиба и ширины раскрытия трещин, нормальных к продольной оси изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных арматурой из углеродных волокон, учитывающая увеличение длины зоны образования трещин [4, 5].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Результаты диссертационной работы использованы при разработке проекта технического кодекса установившейся практики (ТКП) «Бетонные и железобетонные конструкции. Часть 20. Усиление конструкций. Правила проектирования» (раздел 5, п.п. 5.3.3.19 – 5.3.3.22).

2. Результаты диссертационной работы могут использоваться в научно-исследовательских и проектных организациях при проектировании железобетонных изгибаемых конструкций, усиленных арматурой из углеродных волокон.

3. Применение разработанного способа увеличения прочности контактного соединения с бетоном дополнительной арматуры из углеродных волокон, приклеенной к бетонной поверхности усиливаемой конструкции, заключающегося в применении дополнительных усиливающих элементов в виде холста при ориентации его волокон относительно продольной оси конструкции под острым углом ($\approx 15^\circ$) [11], позволит повысить эффективность использования арматуры из углеродных волокон для усиления железобетонных конструкций.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные издания, включенные в перечень ВАК Республики Беларусь

1. Бадалова, Е. Н. Усиление изгибаемых железобетонных конструкций углепластиковой арматурой / Е. Н. Бадалова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2007. – № 6. – С. 54–59.
2. Бадалова, Е. Н. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных приклеиванием углепластиковых пластин / Е. Н. Бадалова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2009. – № 12. – С. 45–50.
3. Бадалова, Е. Н. Прочность по нормальному сечению железобетонных многопустотных плит перекрытий, усиленных арматурой из углеродных волокон / Е. Н. Бадалова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2011. – № 16. – С. 60–66.
4. Бадалова, Е. Н. Жесткость и трещиностойкость железобетонных многопустотных плит перекрытий, усиленных арматурой из углеродных волокон / Е. Н. Бадалова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2012. – № 8. – С. 46–50.
5. Лазовский, Д. Н. Усиление изгибаемых железобетонных конструкций арматурой из углеродных волокон / Д. Н. Лазовский, Е. Н. Бадалова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2013. – № 8. – С. 25–36.

Материалы конференций

6. Бадалова, Е. Н. Исследование характера разрушения изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных углепластиковой арматурой / Е. Н. Бадалова // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : сб. тр. XV междунар. науч.-метод. семинара : в 2-х т. / под общ. ред. Д. Н. Лазовского, А. А. Хотько. – Новополоцк : ПГУ, 2008. – Т. I. – С. 95–99.
7. Lazouski, A. Experimental research of the concrete and carbonplastic fibers joint strength / A. Lazouski, E. Badalova // National and European dimension in research : Materials of junior researchers' II conference. In 2 parts. Part 2. Technology. – Novopolotsk, PSU, 2010. – P. 3–6.

8. Бадалова, Е. Н. Исследование длины анкеровки углепластиковой пластины, приклеенной к поверхности бетона усиленной конструкции / Е. Н. Бадалова, А. Д. Лазовский // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров : сб. науч. ст. / ГрГУ им. Я. Купалы ; редкол. : Т. М. Пецольд, Е. А. Ровба [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2010. – С. 7–10.

9. Lazouski, A. Strength calculation of the joint between concrete and carbon fiber armature / A. Lazouski, E. Badalova // National and European dimension in research : Materials of junior researchers' III conference. In 3 parts. Part 3. Economics. Civil Engineering. – Novopolotsk, PSU, 2011. – P. 110–116.

10. Бадалова, Е. Н. Усиление железобетонных многопустотных плит перекрытий приклеиванием арматуры из углеродных волокон / Е. Н. Бадалова // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : сб. тр. XVIII междунар. науч.-метод. семинара : в 2-х т. ; под общ. ред. Д. Н. Лазовского, А.И. Колтунова. – Новополоцк : ПГУ, 2012. – Т. I. – С. 169–180.

Патенты

11. Способ усиления изгибаемой железобетонной конструкции : пат. 17367 Респ. Беларусь, МПК E 04G 23/02 / Е. Н. Бадалова, Д. Н. Лазовский ; заявитель и патентообладатель Полоц. гос. ун-т. – № а 20110816 ; заявл. 10.06.2011 ; опубл. 30.08.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 4. – С. 145.

РЭЗЮМЭ

Бадалава Кацярына Мікалаеўна

УЗМАЦНЕННЕ ЖАЛЕЗАБЕТОННЫХ МНОГАПУСТОТНЫХ ПЛІТ ПЕРАКРЫЦЦЯЎ ПРЫКЛЕЙВАННЕМ АРМАТУРЫ З ВУГЛЯРОДНЫХ ВАЛОКНАЎ

Ключавыя словы: арматура з вугляродных валокнаў, жалезабетонная канструкцыя, кантактнае злучэнне, прагіб, трываласць, разлік, узмацненне, шырыня раскрыцця трэшчын.

Мэтай дысертацыйнай работы з’яўляецца ўдасканаленне метадыкі разліку з выкарыстаннем дыяграм дэфармавання матэрыялаў выгінаемых жалезабетонных канструкцый, узмоцненых у расцягнутай зоне прыклеяваннем дадатковай арматуры з вугляродных валокнаў, з улікам асаблівасцей яе сумеснай работы з бетонам. Мэта дасягаецца з ужываннем эксперыментальнага і тэарэтычнага метадаў даследавання з выкарыстаннем камп’ютарнай праграмы “Бэта 4.2”.

У рабоце прапанавана ўдасканаленая метадыка разліку трываласці па нармальным да падоўжнай восі счэнню выгінаемых жалезабетонных канструкцый, узмоцненых арматурай з вугляродных валокнаў, на аснове дэфармацыйнай мадэлі, якая ўлічвае значэнне лімітавай адноснай дэфармацыі дадатковай арматуры з вугляродных валокнаў пры розных спосабах забеспячэння яе сумеснай работы з бетонам.

Удасканалена метадыка разліку прагібу і шырыні раскрыцця трэшчын, нармальных да падоўжнай восі выгінаемых жалезабетонных канструкцый, узмоцненых арматурай з вугляродных валокнаў, якая ўлічвае павелічэнне даўжыні зоны ўтварэння трэшчын.

Распрацаваны спосаб павелічэння трываласці кантактнага злучэння з бетонам дадатковай арматуры з вугляродных валокнаў, прыклеенай да бетоннай паверхні ўзмацняемай канструкцыі, сутнасць якога ва ўжыванні дадатковых ўзмацняючых элементаў у выглядзе палатна пры арыентацыі яго валокнаў адносна падоўжнай восі канструкцыі пад вострым вуглом ($\approx 15^\circ$), які дазваляе павысіць эфектыўнасць выкарыстання арматуры з вугляродных валокнаў. Вынікі работы могуць быць выкарыстаны пры праектаванні ўзмацнення жалезабетонных канструкцый дадзеным метадам.

РЕЗЮМЕ

Бадалова Екатерина Николаевна

УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МНОГОПУСТОТНЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ ПРИКЛЕИВАНИЕМ АРМАТУРЫ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

Ключевые слова: арматура из углеродных волокон, железобетонная конструкция, контактное соединение, прогиб, прочность, расчет, усиление, ширина раскрытия трещин

Целью диссертационной работы является усовершенствование методики расчета с использованием диаграмм деформирования материалов изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных в растянутой зоне приклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон, с учетом особенностей ее совместной работы с бетоном. Цель достигается с применением экспериментального и теоретического методов исследования с использованием компьютерной программы «Бета 4.2».

В работе предложена усовершенствованная методика расчета прочности по нормальному к продольной оси сечению изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных арматурой из углеродных волокон, на основе деформационной модели, учитывающая значение предельной относительной деформации дополнительной арматуры из углеродных волокон при различных способах обеспечения ее совместной работы с бетоном.

Усовершенствована методика расчета прогиба и ширины раскрытия трещин, нормальных к продольной оси изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных арматурой из углеродных волокон, учитывающая увеличение длины зоны образования трещин.

Разработан способ увеличения прочности контактного соединения с бетоном дополнительной арматуры из углеродных волокон, приклеенной к бетонной поверхности усиливаемой конструкции, заключающийся в применении дополнительных усиливающих элементов в виде холста при ориентации его волокон относительно продольной оси конструкции под острым углом ($\approx 15^\circ$), позволяющий повысить эффективность использования арматуры из углеродных волокон. Результаты работы могут быть использованы при проектировании усиления железобетонных конструкций данным методом.

SUMMARY

Badalova Ekaterina Nikolaevna

STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE HOLLOW-CORE SLABS BY GLUING OF CARBON FIBER REINFORCEMENT

Keywords: carbon fiber reinforcement, reinforced concrete construction, contact joint, deflection, strength, design procedure, strengthening, width of cracks.

The aim of the dissertation work is the improvement of the calculation method with the usage of materials' deformation diagrams of bended reinforced concrete constructions strengthened by gluing additional carbon fiber reinforcement on the stretched face taking into account features of it's collaborative work with concrete. The aim is achieved with the application of experimental and theoretical research methods and the usage of PC software "Beta 4.2".

In the work an improved design procedure of strength of normal to the longitudinal axis section of bended reinforced concrete constructions, strengthened with carbon fiber reinforcement, on the basis of deformation model, considering the value of ultimate relative strain of the additional carbon fiber reinforcement with different ways of its collaborative work with concrete is offered.

Design procedure of deflection and width of normal to the longitudinal axis cracks of bended reinforced concrete constructions strengthened with carbon fiber reinforcement was improved. This design procedure considers the increase of cracking zone length.

A new method of strength increasing of contact joint of concrete with additional carbon fiber reinforcement glued to the concrete surface of strengthening construction was developed. This new method is the usage of additional reinforcing elements in the form a canvas when the orientation angle of it's fibers relative to the longitudinal axis of the construction is an acute angle ($\approx 15^\circ$), which allows to increase the efficiency of carbon fiber reinforcement usage. The results of the work can be used in design of strengthening of reinforced concrete constructions with this method.

Екатерина Николаевна БАДАЛОВА

УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
МНОГОПУСТОТНЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ
ПРИКЛЕИВАНИЕМ АРМАТУРЫ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.23.01 – строительные конструкции,
здания и сооружения

Подписано в печать 18.12.2013. Бумага офсетная. 60×84¹/₁₆. Ризография.
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,04. Тираж 60. Заказ 1792.

Издатель и полиграфическое исполнение :
учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

Лицензия ЛИ № 02330/0548568 от 26.06.2009

Лицензия ЛП № 02330/0494256 от 27.05.2009

211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29