

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.012.45

УСИЛЕНИЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ АРМАТУРОЙ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

*д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ, Е.Н. БАДАЛОВА
(Полоцкий государственный университет)*

Рассматривается усиление изгибаемых железобетонных конструкций путем приклеивания дополнительной арматуры из углеродных волокон в растянутой зоне как эффективный метод, что подтверждено его широким использованием во многих странах Европы и Северной Америки. На территории Республики Беларусь такая арматура применяется сравнительно недавно и недостаточно изучена. В данной работе представлены результаты и анализ экспериментально-теоретических исследований железобетонных многопустотных плит перекрытий, усиленных в растянутой зоне арматурой из углеродных волокон. При разработке методик расчета прочности по нормальному к продольной оси сечению, прогиба и ширины раскрытия трещин учтены особенности совместной работы с бетоном арматуры из углеродных волокон, в том числе при усилении зоны приклейки дополнительными элементами.

Введение. Одним из важнейших направлений строительной отрасли в настоящее время является ремонт и реконструкция промышленных и гражданских зданий. Проводимые в связи с этим мероприятия зачастую включают работы по усилению несущих конструкций. Выбор способа усиления зависит от многих факторов и всегда требует комплексного подхода. Повышение прочности и трещиностойкости, уменьшение деформативности железобетонной конструкции после ее усиления являются приоритетными. Однако необходимо учитывать также экономичность, ремонтпригодность, эстетичность, сроки проведения работ по усилению конструкций. Таким образом, поиск эффективных методов усиления несущих конструкций эксплуатируемых строительных сооружений с учетом всего комплекса факторов является в настоящее время 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 обладает рядом преимуществ: коррозионной стойкостью, небольшим собственным весом, простотой транспортировки (компактно упаковывается), высокой прочностью на растяжение при достаточно высоком модуле упругости, высокой усталостной прочностью и др. Данный способ усиления характеризуется эстетичностью, простотой выполнения работ по монтажу дополнительной арматуры, не требующих использования тяжелого оборудования и поддерживающих опор, а также возможностью их проведения в короткие сроки без длительной остановки производства.

Арматура из углеродных волокон для усиления железобетонных конструкций изготавливается в виде холстов и пластин. Холсты в основном применяют для усиления сжатых и сжато-изгибаемых конструкций колонн, стен и т.п., а также для усиления зоны среза изгибаемых конструкций и консолей [1; 2]. Пластины широко используют в зарубежной практике для усиления железобетонных конструкций, в том числе изгибаемых.

Совместная работа пластины из углеродных волокон с усиливаемой железобетонной конструкцией обеспечивается путем приклеивания пластины к наружной поверхности бетона конструкции [3 – 6 и др.] или вклеивания пластины в пропиленные пазы [3; 7 – 8]. Расположение пластин в пазах позволяет увеличить прочность сцепления дополнительной арматуры с бетоном и защитить ее от внешних воздействий.

Для повышения прочности анкеровки пластины из углеродных волокон, приклеенной к наружной поверхности бетона усиленной конструкции, используют дополнительные анкерующие элементы. В качестве таких элементов применяют стальные пластины, устанавливаемые на анкерах [6; 7], или холст из углеродных волокон, приклеиваемый на поверхность бетона и пластины с заведением его на боковые грани конструкции [5 – 7; 9; 10].

Проведенный анализ литературных источников и нормативных документов [5; 7; 11 – 13] показал, что расчет по прочности сечений, нормальных к продольной оси, при усилении растянутой зоны изгибаемых элементов дополнительной арматурой из углеродных волокон предлагается выполнять по общим

зависимостям метода предельных усилий с прямоугольной или параболической эпюрой напряжений бетона сжатой зоны. Совместная работа арматуры из углеродных волокон с бетоном конструкции учитывается обобщенными понижающими коэффициентами.

В научной литературе предлагается достаточно большое число формул для расчета длины анкеровки арматуры из углеродных волокон, приклеенной на поверхность усиленной конструкции [5; 11; 14 – 17]. Большинство выражений рассматривают расчетную длину анкеровки как функцию физико-механических характеристик арматуры из углеродных волокон E_f и t_f и прочностных характеристик бетона усиленной конструкции (среднего значения предела прочности бетона при осевом сжатии f_{cm} и осевом растяжении f_{ctm}).

Разработке методов расчета прочности контактного соединения в изгибаемых железобетонных конструкциях, усиленных приклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон, посвящены исследования таких ученых, как: Т. Maeda [16], J.G. Teng [18], U. Neubauer и F.S. Rostasy [19], R. Niedermeier [17], P. Holzenkampfer [20], M. Deuring [21], B. Ferracuti [22], и других.

Максимальное усилие сдвига, которое может воспринять контактное соединение «пластина – бетон», предлагается определять как функцию физико-механических характеристик арматуры из углеродных волокон E_f , b_f , t_f , прочностных характеристик бетона усиленной конструкции и некоторых коэффициентов, учитывающих геометрию пластины и усиливаемого элемента, плотность бетона в усиливаемой части элемента и др. Для случая отслоения арматуры из углеродных волокон с промежуточной трещины выдвигаются требования по ограничению продольных деформаций дополнительной арматуры или изменению напряжения в дополнительной арматуре между двумя соседними трещинами изгиба.

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.

Экспериментально-теоретическое исследование прочности контактного соединения с бетоном арматуры из углеродных волокон

С целью выявления особенностей совместной работы с бетоном арматуры из углеродных волокон, приклеенной к наружной поверхности бетона и вклеенной в вертикальные пазы в растянутой зоне конструкции, в зависимости от длины контактного соединения и прочности бетона были проведены экспериментально-теоретические исследования. В ходе эксперимента определяли: характер разрушения опытных образцов; влияние на прочность контакта способа обеспечения совместной работы арматуры из углеродных волокон с бетоном, дополнительных усиливающих элементов в виде холста, а также угла ориентации продольных волокон холста относительно направления действия сдвигающих усилий. Опытными образцами являлись фрагменты железобетонных балок длиной 500 мм, размером поперечного сечения 140×250 мм ($b \times h$) с приклеенной в нижней зоне дополнительной арматурой.

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°).

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: отслоение и сдвиг пластины относительно бетона с его разрушением при срезе или контактов «клей – пластина» и «клей – бетон».

С увеличением прочности бетона возрастала прочность контактного соединения арматуры из углеродных волокон с бетоном (рис. 1). 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.

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 ($\alpha = 15...45^\circ$) [23].

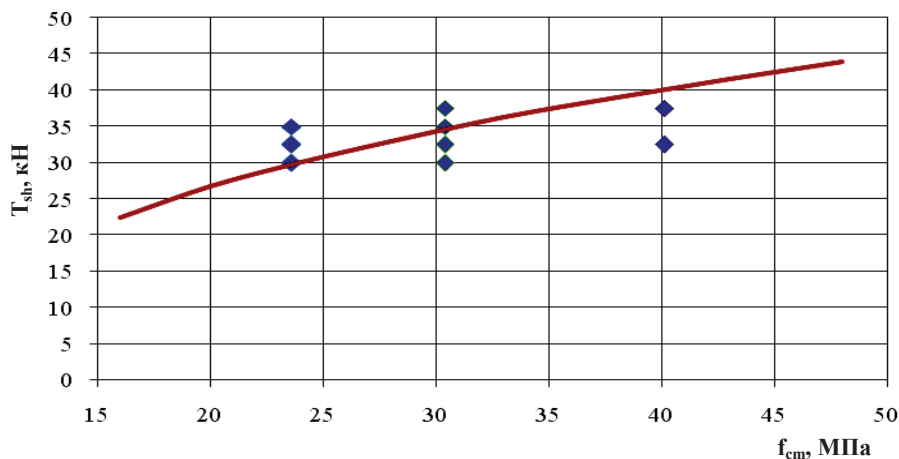


Рис. 1. Зависимость сдвигающего усилия от прочности бетона: сравнение экспериментальных данных с теоретическими значениями

В результате исследований усовершенствованы и экспериментально обоснованы зависимости для вычисления сдвигающего усилия T_{sh} , при котором происходит разрушение контактного соединения арматуры из углеродных волокон с бетоном при различных способах обеспечения совместной работы (рис. 2):

- приклеиванием арматуры из углеродных волокон к наружной поверхности бетона (рис. 2, а):

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

- вклеиванием арматуры из углеродных волокон в вертикальные пазы (рис. 2, б):

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

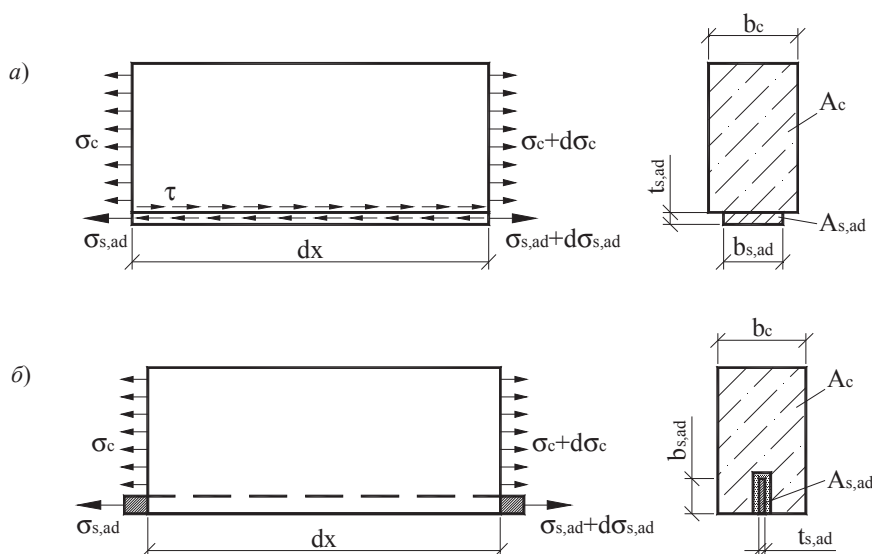


Рис. 2. Расчетная схема элемента с пластиной из углеродных волокон, приклеенной к поверхности бетона (а); вклеенной в вертикальный паз (б)

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

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

В формулах (1)...(3) $b_{s,ad}$, $t_{s,ad}$ и $E_{s,ad}$ – соответственно ширина, толщина и модуль упругости арматуры (пластины) из углеродных волокон; $k_f = 0,077 \dots 0,164$ – коэффициент, значение которого определяется путем обработки экспериментальных данных; k_b – коэффициент, учитывающий распределение касатель-

ных напряжений на ширине, большей, чем ширина арматуры из углеродных волокон: $k_b = \sqrt{\frac{2-b_f/b_c}{1+b_f/400}}$;

f_{ck} – нормативное сопротивление бетона осевому сжатию; f_{ctm} – прочность бетона на осевое растяжение; k_{α} – коэффициент, учитывающий влияние угла ориентации волокон холста на прочность контакта, предлагается определять по следующей формуле:

$$k_{\alpha} = 13,375 \cdot \alpha \cdot e^{-4\alpha} \quad (4)$$

Здесь α – угол ориентации волокон холста по отношению к продольной оси элемента, в радианах.

Экспериментальные исследования железобетонных многпустотных плит перекрытий, усиленных в растянутой зоне арматурой из углеродных волокон

Опытными образцами являлись: плита П-1 – испытана как эталонная без усиления; плиты П-2, П-3, П-4 – усилены приклеиванием к наружной поверхности бетона арматуры из углеродных волокон (отличались подготовкой поверхности бетона перед приклеиванием и типом арматуры из углеродных волокон); плита П-5 – усилена приклеиванием к наружной поверхности бетона арматуры из углеродных волокон с усилением зоны анкеровки холстом из углеродных волокон; плита П-6 – усилена вклеиванием в вертикальные пазы арматуры из углеродных волокон.

Характеристики опытных образцов и методика их испытания описаны в [24].

Разрушение плиты П-1 произошло в середине пролета по нормальному к продольной оси сечению вследствие достижения рабочей арматурой плиты условного предела текучести. Разрушение плиты имело плавный характер. Разрушение опытных плит П-2, П-3, П-4, П-5 происходило также по сечению, нормальному к продольной оси, со сдвигом и последующим отслоением дополнительной арматуры из углеродных волокон от поверхности бетона усиленной конструкции. У плиты П-2 одновременно с отслоением арматуры из углеродных волокон произошел разрыв одной из пластин. Во всех случаях разрушение имело хрупкий характер. Разрушение плиты П-6 происходило по сечению, нормальному к продольной оси, в зоне действия максимального изгибающего момента в результате разрыва одной пластины из углеродных волокон.

Характер разрушения контактного шва арматуры из углеродных волокон с бетоном вдоль пролета плит П-2...П-5 неоднородный: по бетону с его отрывом на глубину до 20 мм и по контакту между клеем и пластиной. При этом характер разрушения контакта различался по длине пролета. Разрушение соединения происходило по контактному слою бетона, когда напряжения от действующей нагрузки превышали сопротивление бетона срезу. Такой вид разрушения соединения наблюдался в пролете на длине 4...4,5 м для плит П-2, П-3, П-4 и на длине 3,5 м для плиты П-5. На концевых участках пластин, в зоне действия максимальных касательных напряжений, соединение разрушалось по контакту «клей – пластина». Такой характер разрушения контакта объясняется появлением не только сдвигающих усилий, но и усилий отрыва от бетона.

Напряжения сцепления по длине контакта распределялись неравномерно и наибольшего значения достигли в зоне анкеровки арматуры из углеродных волокон. Усилением зоны анкеровки дополнительными элементами в виде холста у плиты П-5 увеличена прочность сцепления арматуры из углеродных волокон с бетоном конструкции в этой зоне. Качество подготовки поверхности плиты к приклеиванию пластины из углеродных волокон не повлияло на распределение напряжений сцепления по длине контакта, однако увеличило прочность контакта: разрушение соединения для плиты П-4 произошло при нагрузке, в 1,16 раза превышающей разрушающую нагрузку для плиты П-3.

Результаты экспериментальных исследований плит П-1...П-6 приведены в таблице.

Усилением многпустотных плит перекрытия приклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон к поверхности бетона 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.

Экспериментальные значения разрушающего изгибающего момента M_{ui} , изгибающего момента начала трещинообразования M_{cr} , изгибающих моментов $M_{[\sigma_{max}]}$ и $M_{[w_{max}]}$, соответствующих предельному прогибу и предельной ширине раскрытия трещин

Шифр опытных плит	M_{ui} , кН·м	M_{cr} , кН·м	$M_{[\sigma_{max}]}$, кН·м	$M_{[w_{max}]}$, кН·м
П-1	40,2	31,0	37,0	31,0
П-2	69,4	36,5	53,2	47,5
П-3	58,4	36,5	55,9	39,4
П-4	67,7	34,9	47,7	42,2
П-5	85,6	38,5	47,9	46,0
П-6	72,9	38,5	47,7	42,2

Усиление приклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон в растянутой зоне оказало влияние на деформации, образование и раскрытие трещин в многпустотных 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 (рис. 3).

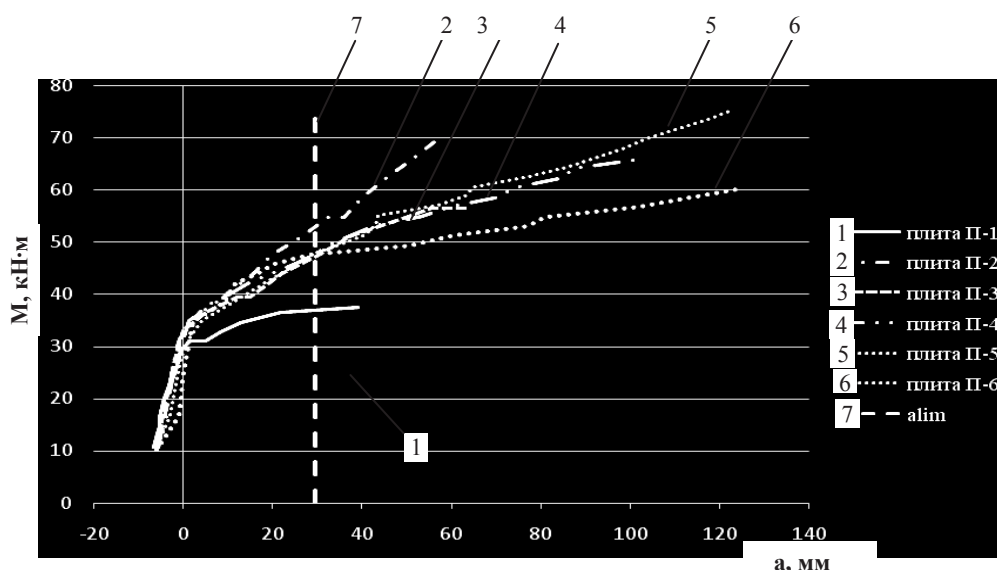


Рис. 3. Изменение прогиба плиты с уровнем нагружения

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 (рис. 4).

Наблюдалось уменьшение ширины раскрытия трещин для усиленных плит по сравнению с неусиленной плитой при действии одинаковой нагрузки.

Увеличение момента трещинообразования для усиленных плит по сравнению с неусиленной плитой происходило в результате включения в совместную работу с бетоном конструкции дополнительной арматуры из углеродных волокон с более высоким, чем у бетона, модулем упругости.

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 неусиленных плит изменялось в процессе нагружения и в предельном состоянии составило 1,58...1,84.

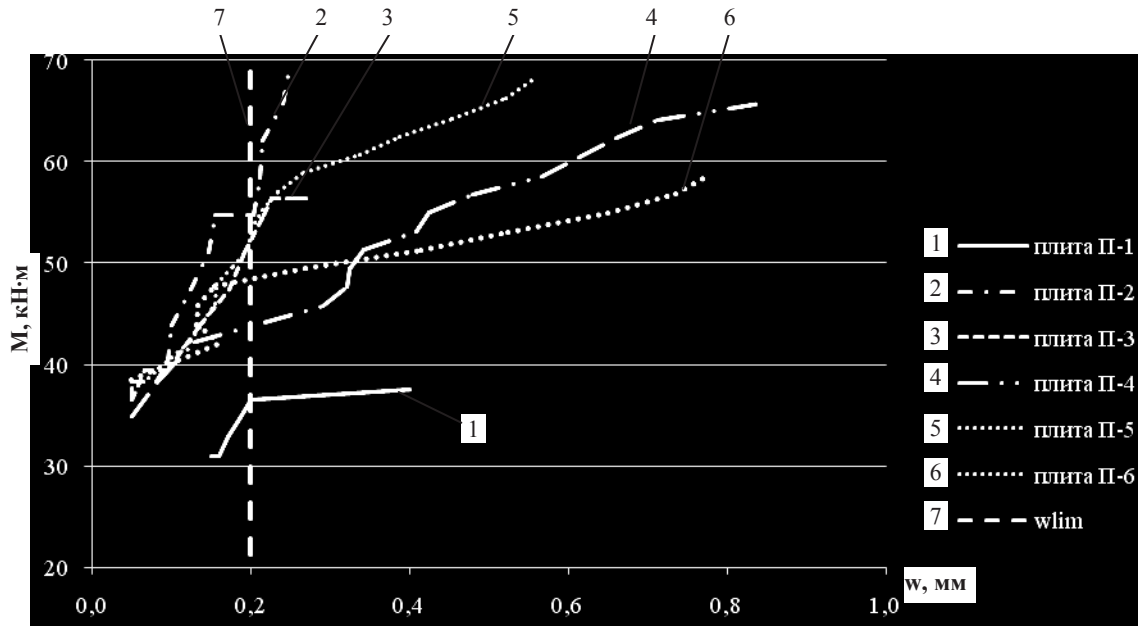


Рис. 4. Изменение ширины раскрытия трещин с уровнем нагружения

Анализ экспериментальных данных исследования жесткости и трещиностойкости показал, что при проектировании усиления многопустотных плит перекрытия приклеиванием арматуры из углеродных волокон ограничивающими факторами, не позволяющими полностью использовать прочностные свойства арматуры, кроме прочности контактного соединения дополнительной арматуры с бетоном, являются нормируемые показатели предельной ширины раскрытия трещин и предельного прогиба для железобетонных плит.

Расчет прочности, жесткости и трещиностойкости изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных арматурой из углеродных волокон

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. Поперечное сечение многопустотной плиты, усиленной в растянутой зоне дополнительной арматурой из углеродных волокон, согласно деформационной модели представляли совокупностью элементарных площадок (рис. 5). 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 (5):

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

В формуле (5) 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; $\frac{1}{r_{ad}}$ – 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.

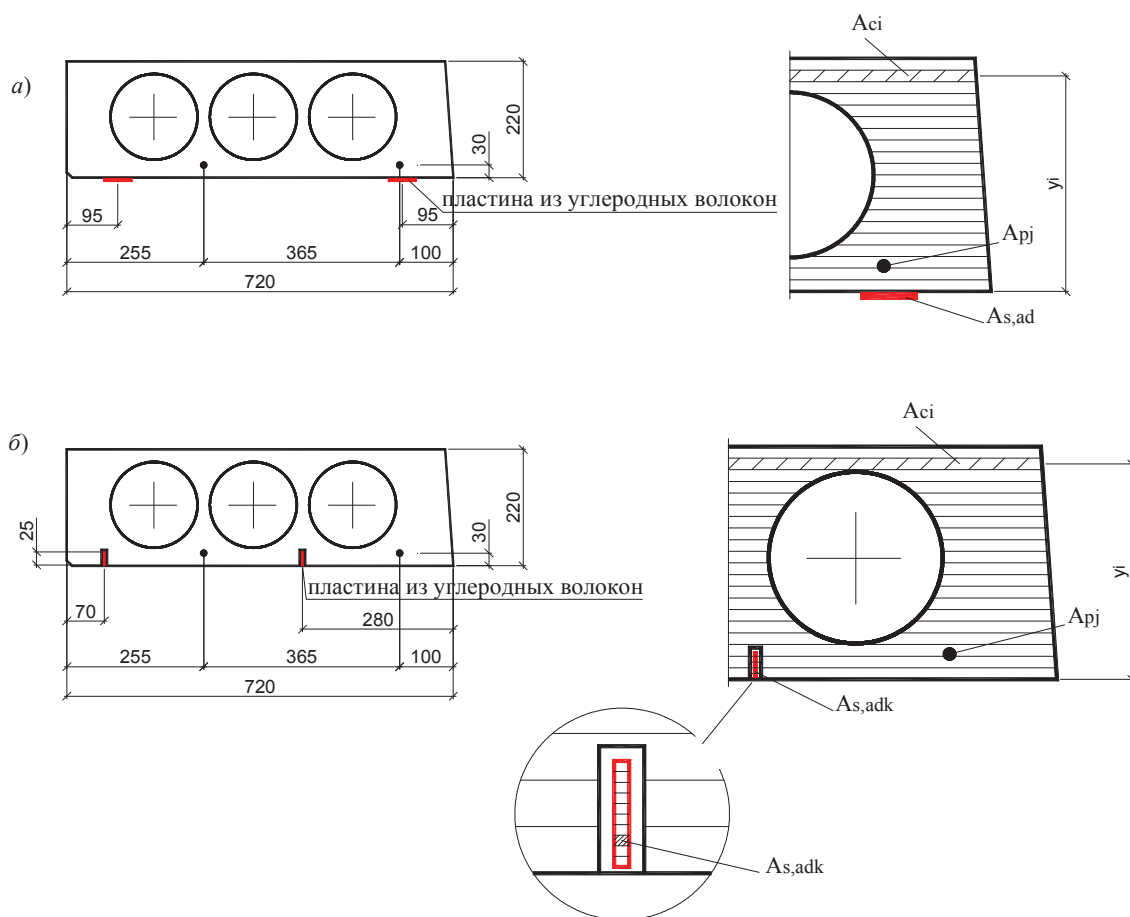


Рис. 5. Расчетная модель нормального сечения многопустотной плиты, усиленной арматурой из углеродных волокон:
 а – приклеиванием к наружной поверхности бетона;
 б – вклеиванием в пазы

Параметры напряженно-деформированного состояния конструкции определяли в программе «Бета 4.2», усовершенствованной с учетом предложенной методики (рис. 6).

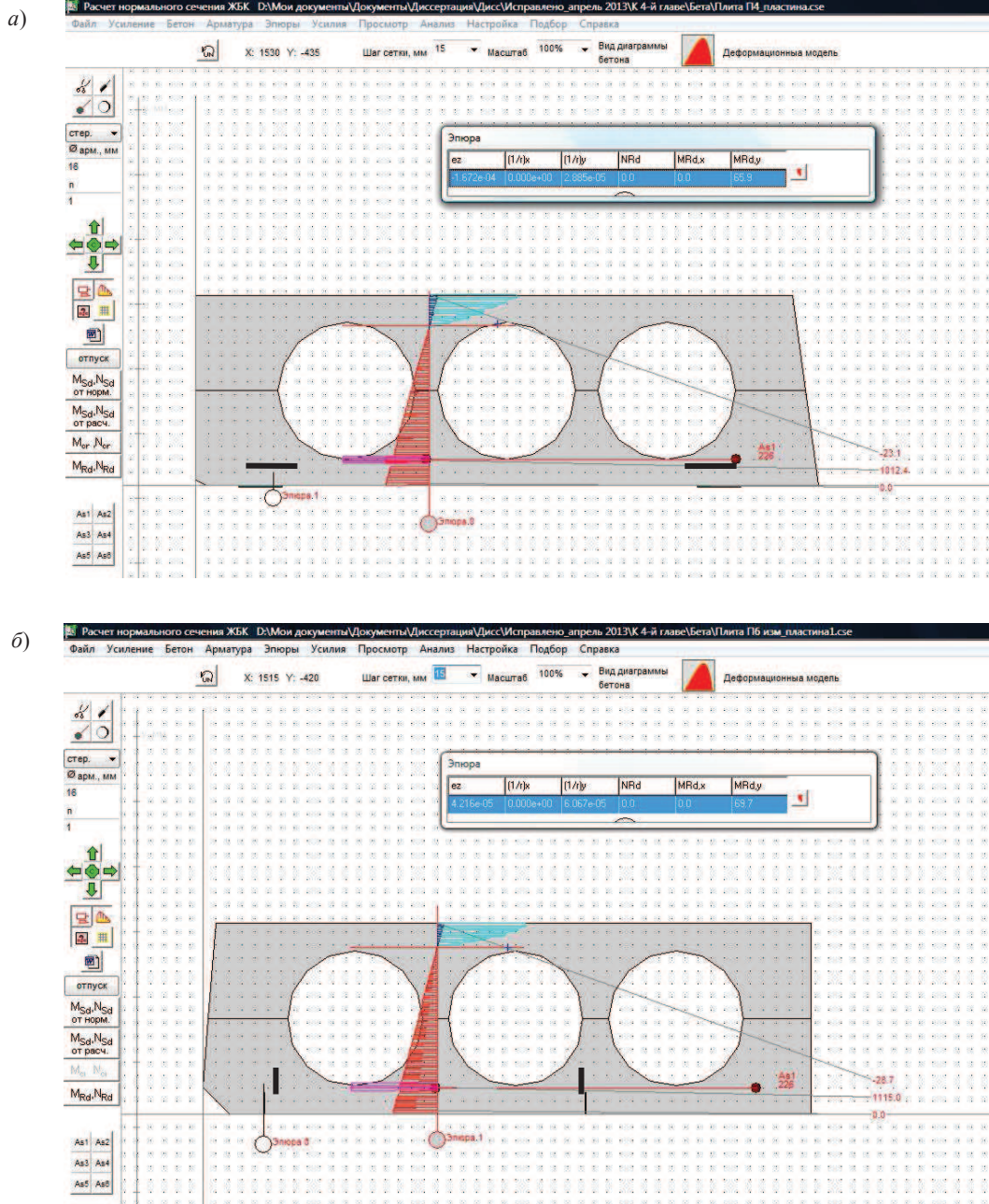


Рис. 6. Окно программы «Бета 4.2»
при расчете параметров напряженно-деформированного состояния плит,
усиленных арматурой из углеродных волокон:
а – приклеиванием к наружной поверхности бетона; б – вклеиванием в пазы

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 $\epsilon_{su,ad}$. Для случая разрушения по сжатой зоне – при достижении бетоном сжатой зоны предельной относительной деформации ϵ_{cu} .

Предельные относительные деформации дополнительной арматуры из углеродных волокон $\epsilon_{su,ad}$ (рис. 7) определяли по расчетным зависимостям:

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

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

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

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

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

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

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 – коэффициент, установленный в результате обработки экспериментальных данных при различных способах обеспечения совместной работы арматуры из углеродных волокон с бетоном конструкции, составляет 0,107...0,443); 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 бетона; $k_{cr} = 1,56$ – при усилении плит вклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон в вертикальные пазы.

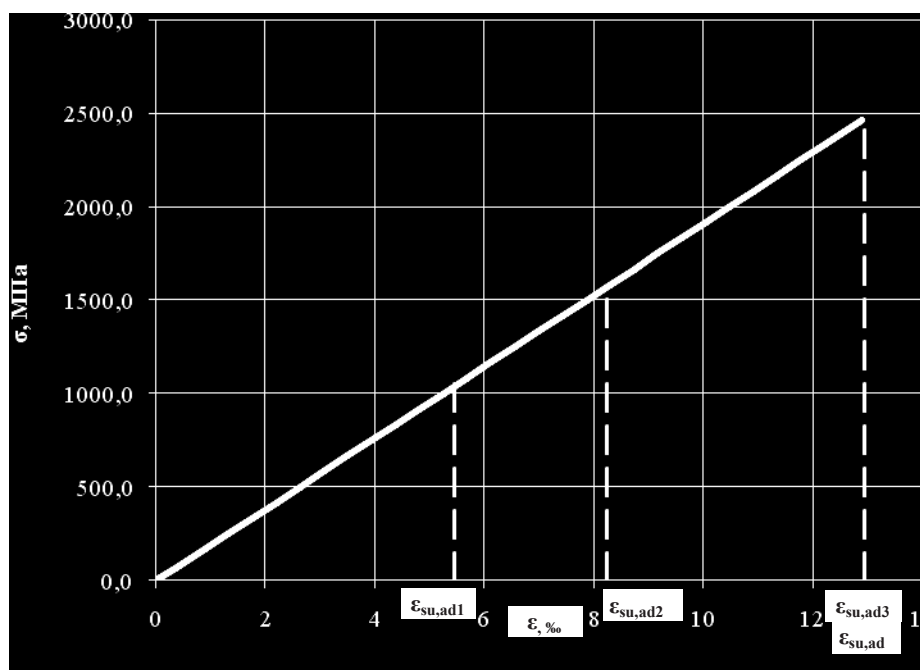


Рис. 7. Зависимость «напряжение – деформация» арматуры из углеродных волокон при расчете прочности сечений железобетонных конструкций, усиленных арматурой из углеродных волокон

Примечание. 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.

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

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

где k_r – коэффициент, учитывающий особенность работы усиленных конструкций, проявляющуюся в увеличении длины участка с трещинами; $\overline{M}(x)$ – 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 по формуле

$$\frac{1}{r(x)} = \frac{1}{r_0(x)} + \frac{1}{r_1(x)} + \frac{1}{r_{ad}(x)}, \quad (10)$$

где $\frac{1}{r_0(x)}$ – кривизна плиты в сечении x от действия усилия предварительного напряжения; $\frac{1}{r_1(x)}$ – кривизна плиты в сечении x от внешней нагрузки, действующей до усиления; $\frac{1}{r_{ad}(x)}$ – кривизна усиленной плиты в сечении x от внешней нагрузки, действующей после усиления.

Коэффициент k_r определяли по результатам обработки экспериментальных данных и принимали равным отношению длины участка с трещинами для неусиленной плиты к длине участка с трещинами для усиленной плиты на соответствующем уровне нагружения:

- при усилении плит приклеиванием к поверхности бетона дополнительной арматуры из углеродных волокон $k_r = 0,6$;
- при усилении плит вклеиванием в вертикальные пазы дополнительной арматуры из углеродных волокон $k_r = 0,68$;
- при усилении плит приклеиванием к поверхности бетона дополнительной арматуры из углеродных волокон с усиленной зоной анкеровки холстом из углеродных волокон $k_r = 0,73$.

Ширину раскрытия трещин, нормальных к продольной оси изгибаемого элемента, усиленного дополнительной арматурой из углеродных волокон, предлагается определять согласно требованиям действующих нормативных документов [25] с учетом особенностей трещинообразования, выявленных в результате экспериментальных исследований:

$$w = k_r \cdot s_{rm} \cdot \epsilon_{sm}, \quad (11)$$

где s_{rm} – среднее расстояние между трещинами, определяемое в соответствии с требованиями [25]; 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 предложенные методики позволяют с достоверной точностью определять значение изгибающего момента, соответствующего прочности усиленных плит, прогиба и ширины раскрытия трещин при действии вертикальной нагрузки.

Заключение. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили эффективность способа усиления железобетонных многпустотных плит перекрытия приклеиванием в растянутой зоне дополнительной арматуры из углеродных волокон с целью повышения их прочности, жесткости и трещиностойкости.

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 отслоении и сдвиге пластины относительно бетона с разрушением бетона при срезе или контактов «клей – пластина» и «клей – бетон».

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 ($\approx 15^\circ$) [23].

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.

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.

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Особенности методики расчета колонн, усиленных композитными материалами / А.Н. Болгов [и др.] // Бетон и железобетон. – 2012. – № 1. – С. 14 – 17.
2. Considerations about non linear static analysis of a reinforced concrete frame retrofitted with FRP / M. Savoia [et al.] // *Mecánica Computacional*. – 2010. – Vol. XXIX, № 11. – P. 10173 – 10182.
3. Blaschko, M. Rehabilitation of concrete structures with CFRP strips glued into slits / M. Blaschko, K. Zilch [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM12proceedings/site/papers/pap352.pdf>. – Date of access: 25.01.2012.
4. Bonding of CarboDur CFRP plates under oscillating load Static testing of prestressed narrow slabs strengthening with CarboDur CFRP Plate systems // Report No.418'931E/1. – Zürich, 2002. – 14 p.
5. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures : Fib Bulletin 14. – Switzerland, 2001. – 130 p.
6. Van Gemert D. Strengthening of concrete constructions with externally bonded reinforcement: Design concepts and case studies / D. Van Gemert, S. Ignoul, K. Brosens // *Innovative materials and technologies for construction and restoration: First International Conference (IMTCR-04)*. – University of Lecce, Italy, 2004.
7. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами / А.А. Шилин [и др.]. – М.: ОАО «Изд-во «Стройиздат», 2007. – 184 с.
8. Near surface mounted CFRP strips for the flexural strengthening of RC columns: experimental and numerical research / J.A.O. Barros [et al.] // *Engineering Structures*. – 2008. – Vol. 30, № 12. – P. 3412 – 3425.
9. Быков, А.А. Чистый изгиб железобетонных балок, армированных углеродным холстом / А.А. Быков, А.В. Калугин, А.А. Балакирев // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2011. – № 7. – С. 22 – 25.
10. Daugevičius, M. Жесткость железобетонных балок, усиленных углепластиком при действии кратковременной и длительной нагрузки / M. Daugevičius // *Проблемы современного бетона и железобетона: материалы III междунар. симпоз., Минск, 9 – 11 ноября 2011 г.: в 2 т. / М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь. Научно-исследовательское республиканское унитарное предприятие по строительству «Институт БелНИИС»; редкол.: М.Ф. Марковский [и др.]. – Минск: Минсктиппроект, 2011. – Т. 1: Бетонные и железобетонные конструкции. – С. 9 – 19.*
11. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures / Reported ACI Committee 440: ACI440.2R-02, 2002. – 45 p.
12. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures: CNR DT 200/ 2004. – National Research Council, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, 2004. – 144 p.
13. Klebebewehrungen (Externally bonded reinforcement): SIA 166. – Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, 2004. – 44 s.
14. Chen, J.F. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete / J.F. Chen, J.G. Teng // *J. of Structural Engineering*. – 2001. – № 7. – P. 784 – 791.
15. Design and construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers / Canadian Standard Association: S806-02. – Toronto, ON, Canada, 2002. – 178 p.
16. A study on Bond mechanism of Carbon Fiber Sheet Non Metallic (FRP) Reinforcement for concrete structures / T. Maeda [et al.] // *proceedings of third International Symposium, 1997*. – Vol. 1. – P. 279 – 287.
17. Niedermeier, R. Zugkraftdeckung bei klebarmierten Bauteilen: doct. Diss / R. Niedermeier. – TU Munchen, German, 2000. – 294 s.

18. Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs / J.G. Teng [et al.] // Construction and Building Materials, 17. – 2003. – P. 447 – 462.
19. Neubauer, U.N. Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP plates / U.N. Neubauer, F.S. Rostasy // Concrete and Composites: Proc. 7th Int. Conf. on Structural Faults and Repair, ECS Pub. Edinburgh, Scotland, 1997. – Vol. 2. – P. 109 – 118.
20. Holzenkampfer, P. Ingenieurmodelle des Verbunds geklebter Bewehrung für Betonbauteile: doct. Diss. / P. Holzenkampfer. – TU Braunschweig, Germany, 1996.
21. Deuring, M. Bemessung vom mit CFK-Lamellen verstärkten Stahlbetonträgern / M. Deuring // Nachträgliche Verstärkung von Bauwerken mit CFK-Lamellen. – Zürich, 1995. – S. 37 – 50.
22. Fracture energy and design rules against FRP – concrete debonding / V. Ferracuti, [et al.] // FRPRCS-8. – Patras, Greece, 2007.
23. Способ усиления изгибаемых железобетонных конструкций: пат. 17367 Респ. Беларусь, МПК E 04G 23/02 / Бадалова Е.Н., Лазовский Д.Н.; заявитель и патентообладатель Полоц. гос. ун-т. – № а 20110816; заявл. 10.06.11; опубл. 21.03.13 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 1(90). – С. 27.
24. 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 F. Строительство. Прикладные науки. – 2011. – № 16. – С. 60 – 66.
25. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02. – Введ. 01.07.2003. – Минск: Минстрой-архитектуры Респ. Беларусь, 2003. – 139 с.

Поступила 21.06.2013

THE STRENGTHENING OF THE BENDING REINFORCED CONCRETE STRUCTURES WITH THE HELP OF CFRP ARMATURE

D. LAZOVSKI, E. BADALOVA

The strengthening of the bending reinforced concrete structures by attaching additional CFRP armature in the tension zone is an effective method, as confirmed by its wide use in many countries in Europe and North America. On the territory of the Republic of Belarus, this method has been recently applied and researched insufficiently. The paper presents the results and comparison of the experimental and theoretical studies of the reinforced concrete hollow core slabs, which were strengthened with the additional CFRP reinforcement in the tension zone. The development of the analysis methods for calculating the normal to the longitudinal axis cross-section strength, deflection and cracks width, which takes into account peculiarities of the concrete work with CFRP, including methods with additional strengthening the bonding area with additional elements.