

Бадалова Е.Н.

(ПГУ, г. Новополоцк)

УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МНОГОПУСТОТНЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ ПРИКЛЕИВАНИЕМ АРМАТУРЫ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

Арматура из углеродных волокон, как один из видов композиционных материалов, успешно применяется в практике строительства уже более 20 лет. Несмотря на достаточно высокую стоимость, она нашла свою область использования благодаря таким свойствам, как высокая прочность на растяжение при высоком модуле упругости, высокая усталостная прочность, коррозионная стойкость, небольшой собственный вес, простота монтажа и транспортировки и др. Холсты и пластины из углеродных волокон широко используются в зарубежной практике для усиления железобетонных конструкций.

Препятствием для широкого применения арматуры из углеродных волокон в качестве дополнительной арматуры при усилении конструкций на территории нашей страны является отсутствие нормативной базы, регламентирующей требования к качеству и механическим свойствам арматуры, а также правила расчета и конструирования.

В настоящей статье освещены результаты исследований, целью которых является разработка методики расчета с использованием диаграмм деформирования материалов железобетонных многопустотных плит перекрытия, усиленных в растянутой зоне приклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон, с учетом особенностей ее совместной работы с бетоном.

Расчет прочности, жесткости и трещиностойкости согласно требованиям зарубежных норм

Проведенный анализ литературных источников и нормативных документов [1 – 4] показал, что расчет 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.

Согласно [1 – 3], расчет прочности выполняют из условия, что отрыв пластин происходит после достижения предела текучести (условного предела текучести) арматуры основного сечения, но до разрушения бетона сжатой зоны. Эпюра напряжений бетона сжатой зоны – параболическая.

В [4] расчет прочности предлагается производить, исходя из условия достижения бетоном сжатой зоны и растянутой арматурой (основной и дополнительной) предельного сопротивления. Эпюра напряжений в бетоне сжатой зоны принимается прямоугольной.

Исследования жесткости и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в растянутой зоне арматурой из композиционного материала, представлены в работах А.А. Шилина [4], Р. Holzenkampfer [5], F. Rostásy [6] и др.

Расчет усиленной конструкции по жесткости и трещиностойкости в [2; 4] предлагается осуществлять по действующим нормам (соответственно Eurocode 2 и нормы России) с учетом композиционной арматуры, вводя в расчет ее геометрические и механические характеристики.

Учитывая влияние дополнительной арматуры суммарным коэффициентом армирования, Р. Holzenkampfer предложил эмпирическую формулу для расчета ширины раскрытия трещин [5].

Прочность контактного соединения с бетоном арматуры из углеродных волокон

Для выявления особенностей совместной работы с бетоном арматуры из углеродных волокон, приклеенной к наружной поверхности бетона и вклеенной в вертикальные пазы в растянутой зоне конструкции, от длины контактного соединения и прочности бетона были проведены экспериментально-теоретические исследования. В процессе эксперимента устанавливался характер разрушения опытных образцов, податливость контактного шва, влияние на прочность контакта способа обеспечения совместной работы арматуры из углеродных волокон с бетоном, наличия дополнительных усиливающих элементов в виде холста, а также угла ориентации продольных волокон холста.

Опытными образцами были железобетонные блоки размерами поперечного сечения 140(б)×250(н) мм длиной 500 мм. Блоки усиливали пластинами из углеродных волокон. Варьируемыми параметрами опытных образцов являлись: длина приклеивания пластины из углеродных волокон (от 25 мм до 500 мм); прочность бетона опытных образцов (с кубиковой прочностью $f_{cm} = 23,6$ МПа, $f_{cm} = 30,4$ МПа и $f_{cm} = 40,1$ МПа);

– способ обеспечения совместной работы пластин из углеродных волокон с бетоном (приклеиванием пластин к наружной поверхности бетона; приклеиванием пластин к наружной поверхности бетона с усилением зоны приклейки дополнительными элементами в виде холста из углеродных волокон; вклеиванием пластин в предварительно выполненные вертикальные пазы);

– угол ориентации волокон дополнительно усиливающего элемента в виде холста относительно продольной оси образца (от 0 до 90°).

В качестве дополнительного усиливающего элемента применяли холст из углеродных волокон. Методика проведения испытаний, а также характер разрушения опытных образцов описаны в [7; 8].

В результате исследований установлено, что значение максимального сдвигающего усилия растет с увеличением длины контактного соединения до предельной величины l_{sh} . При дальнейшем увеличении длины контактного соединения прочность контакта не увеличивается.

Рост максимального сдвигающего усилия наблюдался также с увеличением прочности бетона опытных образцов.

Увеличение сдвигающего усилия на 6 – 40 % достигнуто для опытных образцов с приклеенным дополнительным усиливающим элементом в виде холста. Испытания показали, что сдвигающее усилие зависит от угла расположения волокон холста α по отношению к продольной оси опытного образца. При расположении волокон холста под острым углом ($\alpha = 15 - 45^\circ$) значение сдвигающего усилия увеличилось на 18 – 40 %. Для сравнения: при расположении волокон холста вдоль пластины ($\alpha = 0^\circ$) достигнуто увеличение сдвигающего усилия в среднем на 6,7 %, при $\alpha = 90^\circ$ – в среднем на 13 %.

Рассмотрим механизм контакта арматуры из углеродных волокон с бетоном конструкции (рис. 1).

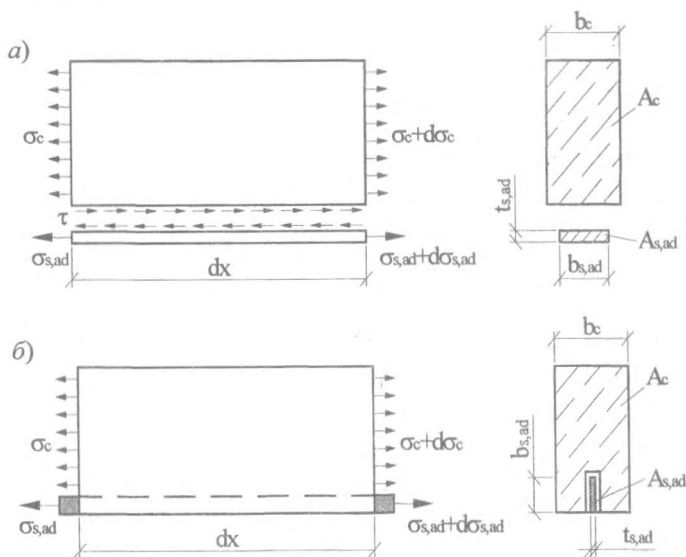


Рис. 1. Расчетная схема элемента с пластиной из углеродных волокон: а – приклеенной к поверхности бетона; б – вклеенной в вертикальный паз

В результате получили зависимости для определения сдвигающего усилия:

– для образцов с арматурой из углеродных волокон, приклеенной к поверхности бетона

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

где $b_{s,ad}$, $t_{s,ad}$ – соответственно ширина и толщина поперечного сечения арматуры (пластины) из углеродных волокон в мм;

$E_{s,ad}$ – модуль упругости арматуры из углеродных волокон в МПа;

k_f – коэффициент, определенный в результате обработки экспериментальных данных;

k_b – коэффициент, учитывающий отношение ширины пластины $b_{s,ad}$ к ширине бетонного сечения b_c , определяется по формуле

$$k_b = \sqrt{\frac{2 \cdot b_{s,ad} / b_c}{1 + b_{s,ad} / 400 \text{ мм}}}; \quad (2)$$

f_{ck} , f_{ctm} – соответственно характеристическая цилиндрическая прочность бетона на сжатие и среднее значение предела прочности бетона при осевом растяжении;

– для образцов с арматурой из углеродных волокон, вклеенной в вертикальный паз

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

– для образцов с арматурой из углеродных волокон, приклеенной к поверхности бетона, при усилении зоны приклейки дополнительными элементами в виде холста из углеродных волокон

$$T_{an} = b_{s,ad} \cdot \sqrt{2 \cdot E_{s,ad} \cdot t_{s,ad} \cdot k_\alpha \cdot k_f \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}}}, \quad (4)$$

где k_α – коэффициент, учитывающий влияние угла расположения волокон холста на прочность контакта, определенный в результате обработки экспериментальных данных

$$k_\alpha = 1 + 2.7 \cdot \alpha \cdot e^{-4\alpha}. \quad (5)$$

Прочность на действие изгибающего момента

С целью получения данных о напряженно-деформированном состоянии железобетонных многопустотных плит перекрытий, усиленных в растянутой зоне арматурой из углеродных волокон, проведены экспериментальные исследования.

Опытными образцами являлись железобетонные многопустотные плиты перекрытия длиной 5980 мм, шириной 720 и высотой 220 мм. Плита П-1 испытана без усиления. Другие плиты усиливали в растянутой зоне дополнительной арматурой в виде пластин из углеродных волокон шириной 50 мм, толщиной 1.4 мм (усиление плиты П-2), шириной 50 мм, толщиной 1,2 мм (усиление плит П-3, П-4, П-5) и шириной 25 мм, толщиной 1.2 мм (усиление плиты П-6). Арматуру из углеродных волокон приклеивали на поверхность бетона и вклеивали в пазы на длине 5500 мм без заведения за грани опор (рис. 2).

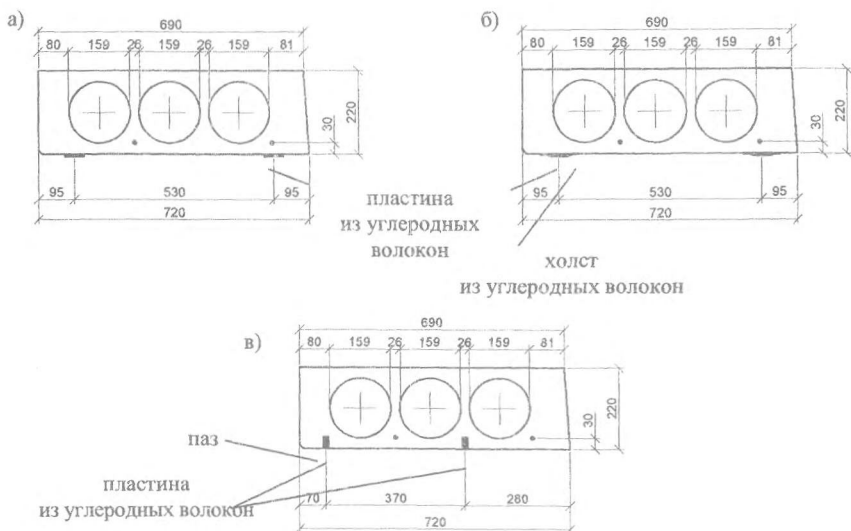


Рис. 2. Схемы усиления плит:
 а – П-2, П-3, П-4; б – П-5; в – П-6

Характеристики опытных образцов и методика их испытания описаны в [9].

Усилением многопустотных плит перекрытия приклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон к поверхности бетона увеличена прочность конструкции в 1.45 – 1.73 раза (плиты П-2, П-3, П-4, П-6) по сравнению с неусиленной плитой П-1. Повышением прочности анкеровки арматуры из углеродных волокон путем приклеивания в зоне анк-

ровки дополнительного элемента в виде холста увеличена прочность плиты П-5 в 2.13 раза по сравнению с плитой П-1.

Результаты экспериментальных исследований плит приведены в таблице.

Сопоставление значений изгибающего момента M_u , $M_{[alim]}$, $M_{[wtim]}$ для плит П-1 – П-6

Шифр опытных плит	M_{u1} , кНМ	$\frac{M_{u1}}{M_{u1}}$	M_{cr} , кНМ	$M_{[wtim]}$, кНМ	$M_{[alim]}$, кНМ
П-1	40,2	1,00	31,0	31,0	37,0
П-2	69,4	1,73	36,5	47,5	53,2
П-3	58,4	1,45	36,5	39,4	55,9
П-4	67,7	1,68	34,9	42,2	47,7
П-5	85,6	2,13	38,5	46,0	47,9
П-6	72,9	1,81	38,5	42,2	47,7

Расчет железобетонной многпустотной плиты, усиленной арматурой из углеродных волокон, предлагается производить по деформационной модели.

Распределение деформаций и напряжений по высоте сечения, нормального к продольной оси, после усиления плиты приведено на рисунке 3.

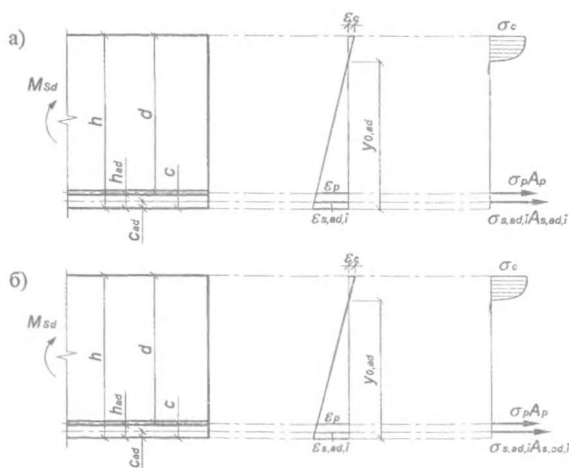


Рис. 3. Распределение деформаций и напряжений в сечении плиты, усиленной арматурой из углеродных волокон:
а – приклеиванием к поверхности бетона; б – вклеиванием в пазы

Для предельного состояния плиты, усиленной в растянутой зоне приклеиванием к поверхности бетона или вклеиванием в вертикальные пазы дополнительной арматуры из углеродных волокон, по прочности уравнения напряженно-деформированного состояния имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int \sigma_c(y) \cdot (y_{0,ad} - y_c) \cdot A_c \cdot dy + \int \sigma_p(y) \cdot (y_{0,ad} - y_p) \cdot A_p \cdot dy + \\ \quad + \int \sigma_{s,ad}(y) \cdot (y_{0,ad} - y_{s,ad}) \cdot A_{s,ad} \cdot dy - M_y = 0 \\ \int \sigma_c(y) \cdot A_c \cdot dy + \int \sigma_p(y) \cdot A_p \cdot dy + \int \sigma_{s,ad}(y) \cdot A_{s,ad} \cdot dy = 0 \\ \varepsilon_{c,p}(y) = \frac{1}{r_{ad}} (y_{0,ad} - y_{c,p}) + \varepsilon_{0c,p}(y) + \varepsilon_{1c,p}(y), \quad \varepsilon_{s,ad}(y) = \frac{1}{r_{ad}} (y_{0,ad} - y_{s,ad}) \\ \sigma_{c,p,s,ad}(y) = f(\varepsilon_{c,p,s,ad}(y)) \end{array} \right. \quad (6)$$

где $\sigma_c(y)$, $\sigma_p(y)$, $\sigma_{s,ad}(y)$ – функция нормальных напряжений в элементарном слое с координатой y бетона и арматуры основной части сечения и дополнительной арматуры из углеродных волокон; $y_{0,ad}$ – расстояние от выбранной оси до центра изгиба сечения элемента после усиления; y_c , y_p , $y_{s,ad}$ – расстояние от выбранной оси до центра тяжести соответственно элементарного слоя бетона и арматуры основной части сечения и дополнительной арматуры из углеродных волокон; A_c , A_p , $A_{s,ad}$ – площадь сечения соответственно элементарного слоя бетона и арматуры основного сечения и дополнительной арматуры из углеродных волокон; M_y – изгибающий момент от внешней нагрузки после усиления; $\varepsilon_c(y)$, $\varepsilon_p(y)$, $\varepsilon_{s,ad}(y)$ – продольные относительные деформации соответственно элементарного слоя с координатой y бетона и арматуры основной части сечения и дополнительной арматуры из углеродных волокон после усиления; $\varepsilon_{0c,p}(y)$, $\varepsilon_{1c,p}(y)$ – продольные относительные деформации элементарного слоя бетона и арматуры основного сечения от предварительного напряжения и от внешней нагрузки до усиления, определяемые по формулам:

$$\varepsilon_{0c,p}(y) = \frac{1}{r} (y_0 - y_{c,p}),$$

$$\varepsilon_{1c,p}(y) = \frac{1}{r_1} (y_{0,1} - y_{c,p}),$$

здесь y_0 – расстояние от выбранной оси до центра изгиба сечения элемента в момент передачи усилия предварительного напряжения; $y_{0,1}$ – расстояние от выбранной оси до центра изгиба сечения элемента в момент, предшествующий усилению; $\frac{1}{r}$, $\frac{1}{r_1}$ – кривизна продольной оси основного сечения железобетонной плиты соответственно в момент обжатия и перед усилением; $\frac{1}{r_{ad}}$ – кривизна продольной оси усиленного сечения железобетонной плиты.

Продольные относительные деформации дополнительной арматуры из углеродных волокон ограничиваем предельной величиной $\varepsilon_{s,ad,u}$ (рис. 4).

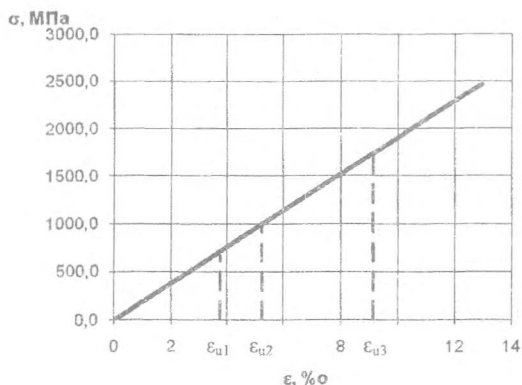


Рис. 4. Диаграмма деформирования арматуры из углеродных волокон при расчете прочности сечений железобетонных конструкций, усиленных арматурой из углеродных волокон

Примечание. Предельные продольные деформации арматуры из углеродных волокон при усилении плит: ϵ_{u1} – приклеиванием к поверхности бетона; ϵ_{u2} – приклеиванием к поверхности бетона с усилением зоны анкеровки холстом из углеродных волокон; ϵ_{u3} – вклеиванием в вертикальные пазы.

Значение $\epsilon_{s,ad,u}$ определяем исходя из формул (1), (3), (4):

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

$$\epsilon_{s,ad,u} = \sqrt{\frac{2 \cdot k_f \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot f_{ctm}}{E_{s,ad} \cdot \tau_{s,ad} / 1.1 \mu}} \quad (7)$$

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

$$\epsilon_{s,ad,u} = \sqrt{\frac{2 \cdot k_a \cdot k_f \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot f_{ctm}}{E_{s,ad} \cdot \tau_{s,ad} / 1.1 \mu}} \quad (8)$$

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

$$\epsilon_{s,ad,u} = \sqrt{\frac{4 \cdot k_f \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot f_{ctm}}{E_{s,ad} \cdot \tau_{s,ad} / 1.1 \mu}} \quad (9)$$

Жесткость и трещиностойкость. В результате экспериментальных исследований установлено, что для усиленных плит значение изгибающего момента, при котором прогиб конструкции достигает предельной величины (29,6 мм), увеличивается в 1,29 – 1,51 раза по сравнению с неусиленной плитой.

Увеличение момента трещинообразования M_{cr} для усиленных плит по сравнению с неусиленной составило 13 – 24 % (таблица). 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).

При исследовании трещинообразования наблюдали следующую картину распределения трещин: средний шаг трещин был близок по значению для неусиленной и усиленных плит и составлял на разных уровнях нагружения для плиты П-1 130 – 183 мм и для плит П-2 – П-5 110 – 170 мм. Однако для усиленных плит зона образования трещин, нормальных к продольной оси, по длине конструкции была больше 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.

При расчете прогиба усиленной изгибаемой конструкции учитывается ее напряженно-деформированное состояние до усиления. Прогиб железобетонной многпустотной плиты, усиленной приклеиванием арматуры из углеродных волокон, от действия внешней нагрузки можно определить в соответствии с требованиями действующих нормативных документов [10]:

$$a = k_r \cdot \int_0^l \bar{M}(x) \cdot \frac{1}{r(x)} \cdot dx, \quad (10)$$

где $\bar{M}(x)$ – изгибающий момент в сечении с координатой x по длине пролета от действия единичной силы, приложенной по направлению искомого перемещения; $\frac{1}{r(x)}$ – кривизна усиленного элемента в сечении x , определяемая по формуле:

$$\frac{1}{r(x)} = \frac{1}{r_0(x)} + \frac{1}{r_1(x)} + \frac{1}{r_{ad}(x)}, \quad (11)$$

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

Кривизну усиленного элемента принимают равной разности относительных деформаций крайнего сжатого волокна бетона и крайнего растянутого стержня арматуры (предварительно напряженной арматуры плиты), деленной на расстояние от крайнего сжатого волокна бетона до крайнего растянутого стержня арматуры. Краевые относительные деформации усиленного сечения определяют с учетом наличия дополнительной арматуры из углеродных волокон из расчета системы уравнений деформационной модели.

Особенность работы дополнительной арматуры в сечении, проявляющаяся в увеличении длины участка с трещинами для конструкций, усиленных приклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон, предлагается учитывать коэффициентом k_r . 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.

Ширину раскрытия трещин, нормальных к продольным оси изгибаемого элемента, усиленного дополнительной арматурой из углеродных волокон, предлагается определять согласно [10] по формуле:

$$w = k_r \cdot s_r \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}), \quad (12)$$

где s_r – расстояние между трещинами. В расчетах, приведенных в данной статье, s_r принималось равным опытным значениям; ε_{sm} – средние относительные деформации стержневой арматуры, определенные с учетом работы дополнительной арматуры из углеродных волокон и работы бетона на растяжение; ε_{cm} – средняя относительная деформация бетона между трещинами.

Значение $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ определяется по формуле (7.9) [10]:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0.6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}, \quad (13)$$

где σ_s – напряжение в растянутой стержневой арматуре в сечении с трещиной, определенное с учетом работы дополнительной арматуры из углеродных волокон; $\rho_{p,eff}$ – коэффициент армирования эффективной площади растянутого бетона, определяемый по формуле:

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_{s,ad} \frac{E_{s,ad}}{E_s} + \xi_1^2 \cdot A_p'}{A_{c,eff}}. \quad (14)$$

Здесь, в (14) $A_{s,ad}$, A'_p – площадь поперечного сечения соответственно дополнительной арматуры из углеродных волокон и предварительно напряженной стержневой арматуры; $E_{s,ad}$, E_s – модуль упругости соответственно дополнительной арматуры из углеродных волокон и предварительно напряженной стержневой арматуры; ξ_1 – поправочный коэффициент прочности сцепления, равный

$$\xi_1 = \sqrt{\xi \cdot \frac{\varnothing_{s,ad}}{\varnothing_p}}, \quad (15)$$

где $\varnothing_{s,ad}$ – эквивалентный диаметр дополнительной арматуры, соответствующий площади контакта арматуры из углеродных волокон с бетоном конструкции. Для условий эксперимента $\varnothing_{s,ad} = \frac{b_{s,ad}}{\pi}$; \varnothing_p – диаметр предварительно напряженной арматуры.

Заключение:

1. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили эффективность способа усиления железобетонных многослойных плит перекрытия приклеиванием в растянутой зоне дополнительной арматуры из углеродных волокон (повышение прочности конструкции в 1,45 – 2,13 раза, повышение жесткости и трещиностойкости).

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.

3. Разработан способ увеличения прочности контактного соединения с бетоном дополнительной арматуры из углеродных волокон, приклеенной к бетонной поверхности усиливаемой конструкции, с применением дополнительных усиливающих элементов в виде холста (пат. 7879 [11]).

4. Предложена методика расчета предельного сдвигающего усилия для конструкций с дополнительной арматурой из углеродных волокон, приклеенной к поверхности бетона в растянутой зоне конструкции, учитывающая влияние дополнительных усиливающих элементов в виде холста в зоне контакта, а также возможное размещение дополнительной арматуры из углеродных волокон в вертикальных пазах.

5. Усовершенствована методика расчета прочности нормальных к продольной оси сечений изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных арматурой из углеродных волокон, на основе деформационной модели, учитывающая совместную работу дополнительной арматуры с бетоном.

6. Предложена методика расчета прогиба и ширины раскрытия трещин, нормальных к продольной оси усиленных изгибаемых железобетонных конструкций.

Литература

1. SIA 166 (2004). Klebebewehrungen (Externally bonded reinforcement). Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA.
2. Federation International du Beton – “BULLETIN 14: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures”. Lausanne, outubro, 2001.
3. American Concrete Institute. State of the art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures. – ACI 440R-02, 2002.
4. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами / А.А. Шилин [и др.]. – М.: ОАО «Издательство "Стройиздат"», 2007. – 184 с.
5. Holzenkampfer, P. Ingenieurmodelle des verbundes geklebter Bewehrung für Betonbauteile / P. Holzenkampfer. – TU Braunschweig, Germany, 1996.
6. 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. – V. 2, 1997. – P. 109 – 118.
7. Lazouski, A. Strength calculation of the joint between concrete and carbon fiber armature // National and European dimension in research: Materials of junior researchers' III conference. Part 3. Economics. Civil Engineering. – Novopolotsk, 2011. – pp. 110-116.
8. Бадалова, Е.Н. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных приклеиванием углепластиковых пластин / Е.Н. Бадалова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Прикладные науки. – 2009. – № 12. – С. 45 – 50.
9. Бадалова, Е.Н. Прочность по нормальному сечению железобетонных многослойных плит перекрытий, усиленных арматурой из углеродных волокон // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Прикладные науки. – 2011. – № 16. – С. 60 – 66.
10. Проектирование железобетонных конструкций: ТКП EN 1992-1-1-2009 (02250). Еврокод 2 / Минстройархитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 2010. – 191 с.
11. Устройство для усиления изгибаемых железобетонных конструкций: пат. 7879 Респ. Беларусь, МПК E 04G 23/02. / Бадалова Е.Н., Лазовский Д.Н.; заявитель и патентообладатель Учреждение образования «Полоцкий государственный университет». – № u 20110468; заявл. 10.06.11; опубл. 30.12.11 // Афіцыйны бюл. – 2011. – № 6(83). – С. 241.