

УДК 624.012.45

ПРОЧНОСТЬ ПО НОРМАЛЬНОМУ СЕЧЕНИЮ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МНОГОПУСТОТНЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ, УСИЛЕННЫХ АРМАТУРОЙ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН**Е.Н. БАДАЛОВА***(Полоцкий государственный университет)*

При проектировании усиления железобетонных конструкций приклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон необходимо учитывать, что отслоение дополнительной арматуры от поверхности бетона является одной из основных причин потери работоспособности усиленной конструкции. Такой вид разрушения накладывает ограничение на возможность полного использования прочностных свойств арматуры из углеродных волокон. Расчет прочности по нормальному сечению усиленной железобетонной конструкции с целью обеспечения ее безотказной работы на протяжении всего времени эксплуатации следует производить с учетом прочности контактного соединения дополнительной арматуры из углеродных волокон с бетоном. В статье приведены результаты экспериментальных исследований железобетонных многопустотных плит перекрытий, усиленных в растянутой зоне арматурой из углеродных волокон, приклеенной к наружной поверхности бетона и вклеенной в предварительно подготовленные вертикальные пазы. Предложена усовершенствованная методика расчета прочности по нормальному сечению усиленной многопустотной плиты на основе деформационной модели, учитывающая совместную работу дополнительной арматуры из углеродных волокон с бетоном.

Введение. Вопросам усиления изгибаемых железобетонных конструкций дополнительной арматурой из углеродных волокон посвящены многочисленные исследования Т. Maeda [1], J.G. Teng [2], U. Neubauer и F.S. Rostasy [3], R. Niedermeier [4], P. Holzenkampfer [5], M. Deuring [6] и др. Однако цель большинства исследований – разработка методики расчета прочности контактного соединения, и лишь некоторые [7; 8] освещают вопросы расчета прочности по нормальному сечению.

Проведенный анализ литературных источников и нормативных документов [9 – 12] 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.

Так, согласно швейцарским нормам расчет прочности по нормальному сечению изгибаемого железобетонного элемента, усиленного пластинами из композиционных материалов, выполняют из условия, что отрыв пластин происходит после достижения предела текучести арматуры или условного предела текучести предварительно напряженной арматуры основного сечения, но до разрушения бетона сжатой зоны [9]. Распределение относительных деформаций по высоте сечения принимается прямолинейное, эпюра напряжений бетона сжатой зоны сечения – параболическая. Положение равнодействующего усилия сжатия в бетоне определяется с помощью коэффициента. Аналогичные требования к расчету прочности по нормальному сечению предъявляют FIB-14 [10] и ACI-440 [11].

В [12] расчет прочности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в растянутой зоне арматурой из композиционного материала, 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.

Экспериментальные исследования. 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, шириной 720 и высотой 220 мм, изготовленные в заводских условиях (табл. 1). Армирование плит в нижней зоне осуществляли продольной арматурой класса S800 диаметром 12 мм, по два стержня в каждой плите. Плиты усиливали в растянутой зоне дополнительной арматурой в виде пластин из углеродных волокон шириной 50, толщиной 1,4 мм (усиление плиты П-2), шириной 50, толщиной 1,2 мм (усиление плит П-3, П-4, П-5) и шириной 25, толщиной 1,2 мм (усиление плиты П-6). Производителем используемой арматуры из углеродных волокон является фирма Sika (Швейцария). Арматуру из углеродных волокон приклеивали на поверхность бетона и вклеивали в пазы на длине 5500 мм без заведения за грани опор (рис. 1). Поверхность бетона перед приклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон подготавливали различными способами: у плит П-2 и П-3 – обработкой ацетоном, у плит П-4 и П-5 – путем шлифования поверхности бетона с последующей ее обработкой ацетоном. Кроме того, варьируемым фактором являлось повышение прочности анкеровки пластин из углеродных волокон: у плиты П-5 повышение прочности анкеровки осуществляли путем приклеивания в зоне анкеровки холста из углеродных волокон. Холст наклеивали на по-

верхность бетона и пластин из углеродных волокон на длине 400 мм от конца пластин с направлением продольных волокон холста под углом 15° к продольным волокнам пластины. Дополнительную арматуру у плиты П-6 клеивали в предварительно подготовленные вертикальные пазы.

Таблица 1

Геометрические размеры сечений и характеристики материалов опытных плит

Шифр опытных плит	Поперечное сечение, $b \times h$, мм	Бетон плит	Арматура плит			Арматура усиления			Дополнительный усиливающий элемент
			f_{pk} , МПа	f_{tk} , МПа	E_s , МПа	поперечное сечение, $b \times h$, мм	f_{tk} , МПа	E_s , ГПа	
П-1	720×220	C ³⁰ / _{37,5}	975	1115	$2,0 \cdot 10^5$	–	–	–	–
П-2	710×220	C ^{28,3} / _{35,4}	975	1115	$2,0 \cdot 10^5$	50×1,4	1715	280	Приклеена к наружной поверхности бетона
П-3	700×220	C ^{29,8} / _{37,3}	975	1115	$2,0 \cdot 10^5$	50×1,2	2465	191	То же
П-4	720×220	C ^{28,3} / _{35,4}	975	1115	$2,0 \cdot 10^5$	50×1,2	2465	191	–
П-5	720×220	C ^{28,3} / _{35,4}	975	1115	$2,0 \cdot 10^5$	50×1,2	2465	191	–
П-6	720×220	C ^{28,3} / _{35,4}	975	1115	$2,0 \cdot 10^5$	25×1,2	2465	191	Вклеена в вертикальные пазы

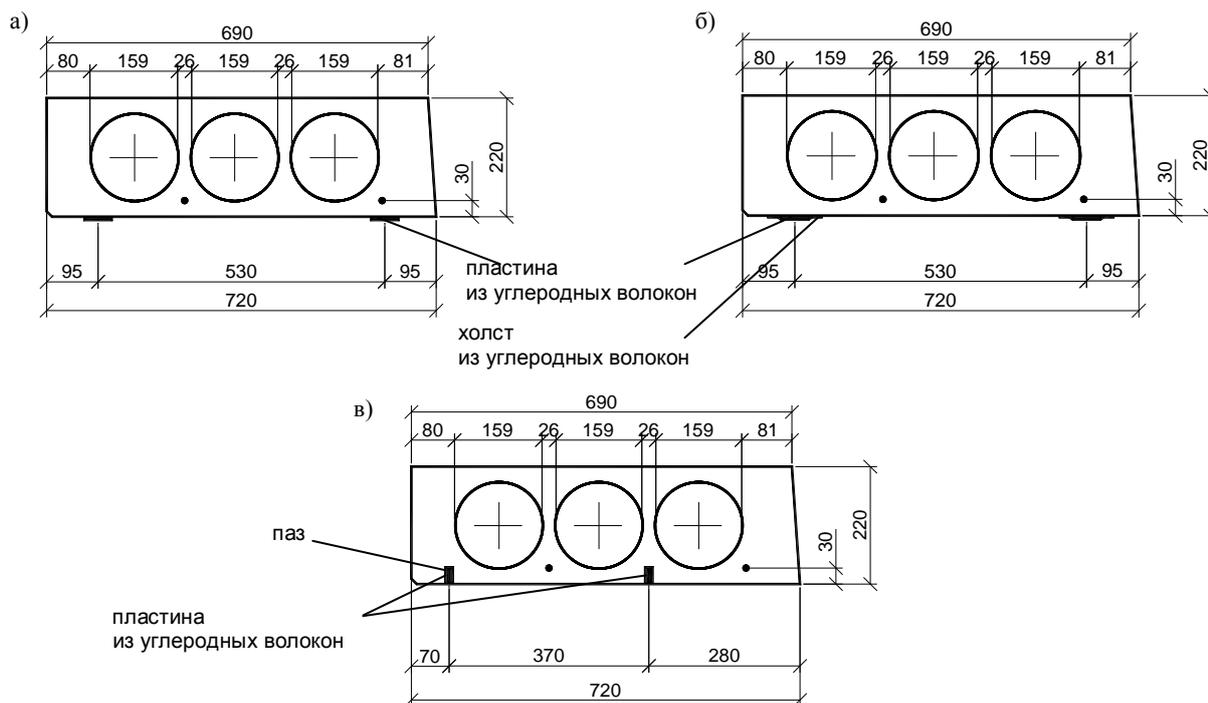


Рис. 1. Схемы усиления плит: П-2, П-3, П-4 (а); П-5 (б); П-6 (в)

Механические характеристики продольной рабочей арматуры опытных плит и дополнительной арматуры из углеродных волокон определяли по результатам испытания образцов на разрывной машине в соответствии с [13]. Разрушение образцов арматуры из углеродных волокон происходило в результате разрыва углеродных волокон. Арматуре из углеродных волокон свойственен упругий характер деформирования и хрупкий характер разрушения.

Испытание железобетонных многоспустотных плит производилось по методике, описанной в [14]. Разрушение опытных плит П-2, П-3, П-4, П-5 произошло по нормальному сечению в результате отслоения дополнительной арматуры из углеродных волокон от поверхности бетона усиленной конструкции. При этом отслоение арматуры из углеродных волокон у плит П-2, П-3 и П-4 началось с концов, а у плиты П-5 – с промежуточной трещины в зоне изгиба. У плиты П-2 одновременно с отслоением арматуры из углеродных волокон произошел разрыв одной из пластин. Во всех случаях разрушение

имело хрупкий характер. Увеличение прочности анкеровки арматуры из углеродных волокон путем приклеивания в зоне анкеровки дополнительного элемента повысило прочность плиты П-5 в 1,26 раза по сравнению с плитой П-4, усиленной аналогичным образом. Разрушение плиты П-6 произошло по нормальному сечению в зоне действия максимального изгибающего момента в результате разрыва одной пластины из углеродных волокон. Результаты экспериментальных исследований плит приведены в таблице 2.

Таблица 2

Сопоставление значений изгибающего момента M_u для плит П-1 – П-6

Шифр опытных плит	M_{ui} , кН·м	$\frac{M_{ui}}{M_{u1}}$
П-1	40,2	1,00
П-2	69,4	1,73
П-3	58,4	1,45
П-4	67,7	1,68
П-5	85,6	2,13
П-6	72,9	1,81

Расчет прочности по нормальному сечению. В действующих национальных нормативных документах расчет прочности нормальных сечений изгибаемых элементов предлагается производить на основе деформационной расчетной модели исходя из общего условия метода предельных состояний [15; 16]. Деформационная модель позволяет определить параметры напряженно-деформированного состояния на любом этапе нагружения конструкции. Применение деформационной модели для расчета прочности нормальных сечений элементов, усиленных увеличением поперечного сечения, позволяет учесть напряженно-деформированное состояние конструкции на момент ее усиления.

Поперечное сечение многослойной плиты, усиленной в растянутой зоне дополнительной арматурой из углеродных волокон, согласно деформационной модели представляем совокупностью элементарных слоев (рис. 2).

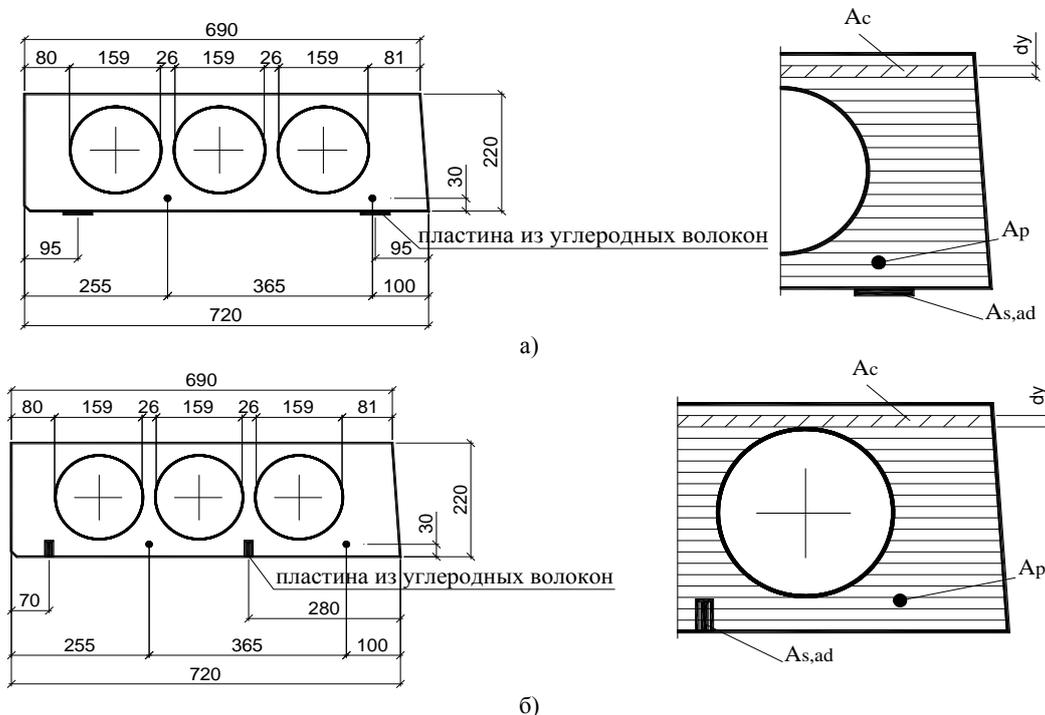


Рис. 2. Расчетная модель нормального сечения многослойной плиты, усиленной арматурой из углеродных волокон: а – приклеиванием к наружной поверхности бетона; б – вклеиванием в пазы

В пределах каждого слоя нормальные напряжения принимаем равномерно распределенными. Считаем, что основной элемент и дополнительная арматура после усиления деформируются совместно, а разность их деформаций сохраняется постоянной на всех этапах работы усиленной конструкции. В расчете учитываем наличие деформаций в основной части сечения на момент усиления, возникших от пред-

варительного напряжения арматуры, усадки бетона и действия внешней нагрузки. Для случая неоднородного напряженного состояния при изгибе считаем известными зависимости «напряжение – деформация» для бетона и арматуры (основной и дополнительной), т.е. функции $\sigma_c(\varepsilon_c(y))$, $\sigma_s(\varepsilon_s(y))$, $\sigma_{s,ad}(\varepsilon_{s,ad}(y))$ являются определенными. Это допущение позволяет по известным значениям продольных относительных деформаций определять напряжения в бетоне и арматуре.

Зависимости «напряжение – деформация» при неоднородном напряженном состоянии, которое имеется в сечении элемента вследствие изгиба, можно описать зависимостями «напряжение – деформация» материалов элемента, полученными в результате испытания бетона и арматуры на сжатие и растяжение (т.е. по однородному напряженному состоянию). В расчете нормального сечения железобетонной плиты, усиленной приклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон, использовали диаграмму деформирования бетона с ниспадающей ветвью при осевом кратковременном сжатии.

Расчет железобетонной многпустотной плиты, усиленной арматурой из углеродных волокон, по деформационной модели производится в несколько этапов:

- 1) момент отпуска предварительно напряженной арматуры основного сечения плиты;
- 2) момент, предшествующий усилению плиты, учитывающий деформации в основном сечении от воздействия внешней нагрузки, включая нагрузку от собственного веса плиты и усилие обжатия;
- 3) стадия эксплуатации плиты после усиления под воздействием внешней нагрузки;
- 4) предельное состояние усиленной плиты по прочности.

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

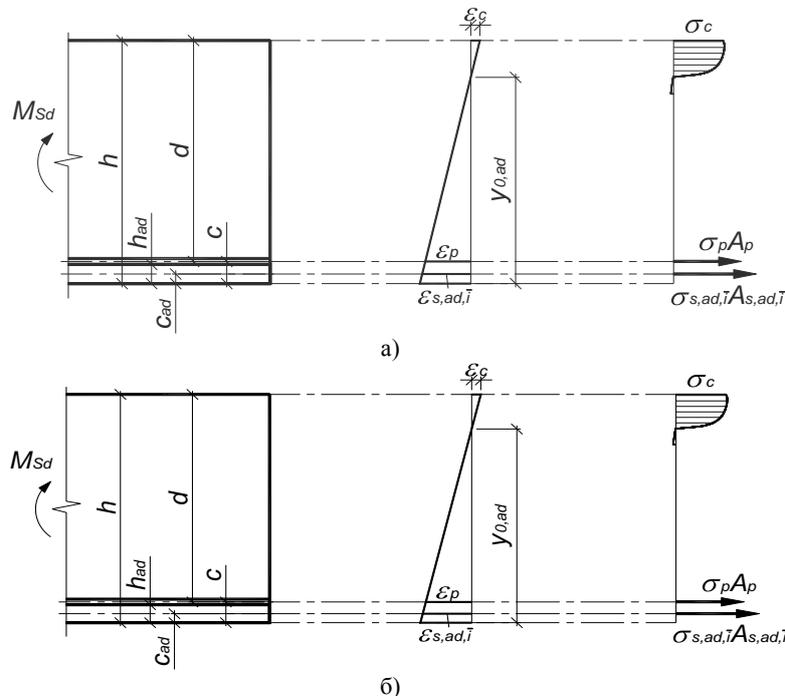


Рис. 3. Распределение деформаций и напряжений в сечении плиты, усиленной арматурой из углеродных волокон: а – приклеиванием к наружной поверхности бетона; б – вклеиванием в пазы

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:

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

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:

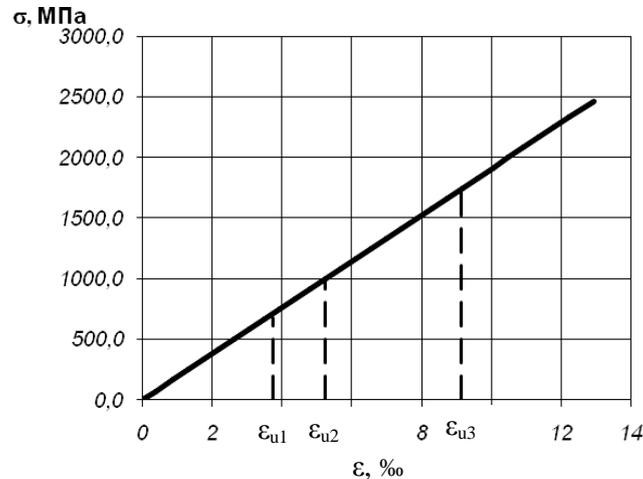
$$\varepsilon_{0c,p}(y) = \frac{1}{r}(y_0 - y_{c,p});$$

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

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.

Расчет производим методом последовательного нагружения с реализацией итерационного процесса вычисления деформаций. Процесс итераций завершается при достижении заданной точности вычислений.

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



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

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

Значение $\varepsilon_{s,ad,u}$ определяем по формулам (2) – (4):

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

$$\varepsilon_{s,ad,u} = \sqrt{\frac{2k_f \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot f_{cm}}{E_{s,ad} \cdot t_{s,ad}} / 1 \text{ мм}}; \quad (2)$$

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

$$\varepsilon_{s,ad,u} = \sqrt{\frac{2k_{\alpha} \cdot k_f \cdot k_b \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}}}{E_{s,ad} \cdot t_{s,ad} / 1 \text{ мм}}}; \quad (3)$$

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

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

где k_f – коэффициент, определенный в результате обработки экспериментальных данных; f_{ck}, f_{ctm} – соответственно характеристическая цилиндрическая прочность бетона на сжатие и среднее значение предела прочности бетона при осевом растяжении; $E_{s,ad}, t_{s,ad}$ – модуль упругости и толщина дополнительной арматуры из углеродных волокон, соответственно в МПа и мм; k_b – коэффициент, учитывающий отношение ширины пластины $b_{s,ad}$ к ширине бетонного сечения b_c , определяется по формуле:

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_{s,ad}}{b_c}}{1 + \frac{b_{s,ad}}{400 \text{ мм}}}}. \quad (5)$$

Коэффициент k_{α} учитывает влияние ориентации продольных волокон холста и определяется следующим образом:

$$k_{\alpha} = 1 + a \cdot \alpha \cdot e^{-4\alpha}. \quad (6)$$

Значения коэффициентов k_f и k_{α} установлены по результатам обработки данных экспериментов, проведенных на опытных железобетонных блоках, усиленных приклеиванием к поверхности бетона и вклеиванием в пазы дополнительной арматуры из углеродных волокон [14].

Заключение. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили эффективность способа усиления растянутой зоны железобетонных многопустотных плит перекрытия дополнительной арматурой из углеродных волокон.

Экспериментально подтвержден способ увеличения прочности анкеровки дополнительной арматуры из углеродных волокон, приклеенной к бетонной поверхности усиливаемой конструкции, с применением дополнительных усиливающих элементов в виде холста.

Усовершенствована методика расчета прочности по нормальному сечению изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных арматурой из углеродных волокон, на основе деформационной модели, учитывающая совместную работу дополнительной арматуры с бетоном.

ЛИТЕРАТУРА

1. A study on Bond mechanism of Carbon Fiber Sheet Non Metallic (FRP) Reinforcement for concrete structures / T. Maeda [and others] // Proceedings of third International Symposium, Vol. 1, Oct, 1997. – P. 279 – 287.
2. Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs / J.G. Teng [and others] // Construction and Building Materials, 17, 6 – 7, 2003. – P. 447 – 62.
3. Neubauer, U.N. Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP plates / U.N. Neubauer and F.S. Rostasy // Concrete and Composites, Proc. 7th Int. Conf. on Structural Faults and Repair, ECS Pub. Edinburgh, Scotland. – 1997. – V. 2. – P. 109 – 118.
4. Niedermeier, R. Zugkraftdeckung bei klebarmierten Bauteilen (Envelope line of tensile forces while using externally bonded reinforcement) / R. Niedermeier. – TU Munchen (In German), 2000.
5. Holzenkampfer, P. Ingenieurmodelle des verbundes geklebter Bewehrung für Betonbauteile / P. Holzenkampfer. – TU Braunschweig, Germany, 1996.
6. Deuring, M. Bemessung vom mit CFK-Lamellen verstärkten Stahlbetonträgern / M. Deuring. – Beton- und Stahlbetonbau, 1995.

7. Tann, D.B. Numerical modeling of FRP strengthened reinforced concrete flexural elements / D.B. Tann; FRPRCS-8, University of Patras. – Patras, Greece, 2007.
8. Gamino, A.L. Reinforced concrete beams strengthened with CFRP: experimental, analytical and numerical approaches / A.L. Gamino, T.N. Bittencourt; FRPRCS-8, University of Patras. – Patras, Greece, 2007.
9. SIA 166 (2004). Klebebewehrungen (Externally bonded reinforcement). Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA.
10. Federation International du Beton “BULLETIN 14: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures”. – Lausanne, outubro, 2001.
11. American Concrete Institute. State of the art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures. – ACI 440R-02, 2002.
12. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами / А.А. Шилин [и др.]. – М.: ОАО «Издательство “Стройиздат”», 2007. – 184 с.
13. Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение: ГОСТ 12004-81. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 15 с.
14. Бадалова, Е.Н. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных приклеиванием углепластиковых пластин / Е.Н. Бадалова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия F. Прикладные науки. – 2009. – № 12. – С. 45 – 50.
15. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02 / Минстройархитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.
16. ТКП EN 1992-1-1-2009 (02250). Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций / Минстройархитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 2010. – 191 с.

Поступила 21.11.2011

**THE NORMAL CROSS-SECTION STRENGTH CAPACITY
OF THE REINFORCED CONCRETE HOLLOW-CORE SLABS,
THAT WERE STRENGTHENED WITH THE CFRP ADDITIONAL ARMATURE**

E. BADALOVA

In the course of the designing of the RC elements additional CFRP armature strengthening it is necessary to take into account that delaminating of the additional armature out of the concrete surface is one of the main factor of strengthened constructions failure factor. This failure type imposes constraints on the complete CFRP armature strength properties usage possibility. The normal cross-section analysis of the strengthened construction should be realized with the contact joint between the additional CFRP armature and surface of the concrete durability. In this article the results of the experimental researches of the reinforced concrete hollow-core slabs, that were strengthened in the tensile zone with the help of additional CFRP armature are listed, and the developed normal cross-section strength capacity, based on the deformational model, design procedure, which takes into account the collaboration of concrete and the additional CFRP armature is put forward.