



# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ ВО ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ БЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

УДК 624.072.4

## АВТОР

**КЛИМОВ Ю.А.**, д.т.н., проф., Киевский национальный университет строительства и архитектуры;

**АНДРЮКЕВИЧ А.И.**, аспирант, Киевский национальный университет строительства и архитектуры

## АННОТАЦИЯ

*В данной работе на основании сравнительного анализа графиков несущей способности произведена оценка эффективности применения неметаллической композитной арматуры во внецентренно сжатых бетонных элементах, исходя из различных вариантов учета ее прочности на сжатие.*

*In this study the effectiveness of application of a fiber reinforced polymer bars in eccentrically compressed concrete members based on comparison of charts of bearing capacity for different cases of its compressive strength is evaluated.*

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

бетон, неметаллическая композитная арматура, внецентренное сжатие

## ВВЕДЕНИЕ

В современной мировой строительной практике для армирования бетонных конструкций все чаще применяется неметаллическая композитная арматура. Одним из основных преимуществ данной арматуры является высокая коррозионная стойкость, позволяющая увеличить срок эксплуатации бетонных конструкций. Кроме того, композитная арматура радиопрозрачна, магнетически инертна, является диэлектриком и обладает низким коэффициентом теплопроводности.

Перечисленные выше свойства определяют наиболее рациональные области применения неметаллической арматуры, а именно: в условиях агрессивной среды (конструкции зданий химической промышленности, морские, припортовые и подземные сооружения, фундаменты), при не-

обходимости обеспечения антимагнитных и диэлектрических свойств конструкций (лаборатории с чувствительным электромагнитным оборудованием, электроизолирующие элементы опор ЛЭП), в теплосберегающих ограждающих конструкциях, и т.п.

В последние годы в Украине освоено производство стеклопластиковой и базальтопластиковой композитной арматуры, регламентированное соответствующими техническими условиями [1, 2] и разработан нормативный документ по применению данной арматуры в бетонных конструкциях [3].

## АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На сегодняшний день достаточно хорошо изучены свойства самой неметаллической арматуры и ее применение в изгибаемых бетонных элементах. Во многих странах мира, в том числе и в Украине, уже действует соответствующая нормативная документация [3 - 8]. Однако в этих нормативах не учитывается работа арматуры на сжатие, что продиктовано недостаточной изученностью данного вопроса. В связи с этим последние экспериментально-теоретические исследования ведутся в направлении изучения применения неметаллической композитной арматуры для армирования сжатых бетонных элементов, к таковым относятся работы М. Afifi, В. Benmokrane, С. Choo, А. De Luca, А. Farghaly, М. Lotfy, F. Matta, Н. Mohamed, А. Nanni, А. Tavassoli, Н. Tobbi, Н. Zadeh и др. В результате исследований [9-11] установлено, что в целом работа образцов подобна аналогичным образцам с металлической арматурой, разрушение носит хрупкий характер.

В Украине в соответствии с [1-3] выпускается композитная арматура четырех классов: стеклопластиковая АКС600, АКС800 и базальтопластиковая АКБ600, АКБ800. Модуль упругости стеклопластиковой арматуры составляет 50000МПа, базальтопластиковой – 45000МПа. Временное сопротивление разрыву для арматуры классов АКС600 и АКБ 600 составляет 600МПа, для классов АКС800 и АКБ800 – 800МПа. Временное сопротивление сжатию принимается 20% от временного сопротивления разрыву, что составляет 120 МПа для арматуры классов АКС600 и АКБ600 и 160 МПа для классов АКС800 и АКБ800.

Значительно меньшее значение временного сопротивления сжатию по сравнению с временным сопротивлением растяжению отдельного стержня композитной арматуры обусловлено неоднородностью его структуры и, как следствие, поперечным расслоением



под действием продольной сжимающей силы. В то же время, в результате экспериментально-теоретических исследований [11] установлено, что в бетонном массиве временное сопротивление композитной арматуры сжатию может повышаться за счет стесненности поперечных деформаций, достигая 35% от временно-сопротивления растяжению.

Целью настоящей работы являлась теоретическая оценка эффективности применения неметаллической композитной арматуры во внецентренно сжатых бетонных элементах. Для достижения поставленной цели предусматривалось проведение сравнительного анализа графиков несущей способности внецентренно сжатых элементов при различных значениях расчетного сопротивления композитной арматуры на сжатие.

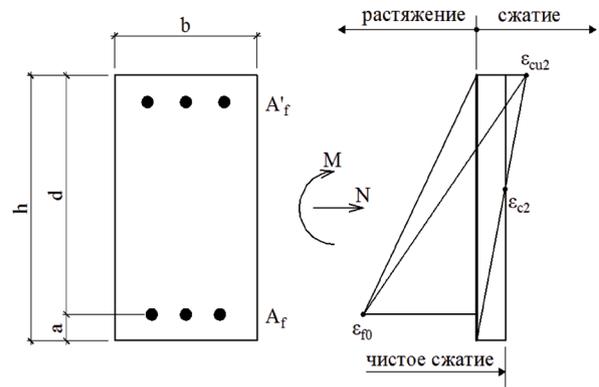


Рис.1. Возможное распределение деформаций в предельном состоянии.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения несущей способности внецентренно сжатых элементов применяется методика ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010 [12], в рамках которой приняты следующие условия: плоские сечения остаются плоскими, деформации арматуры одинаковы с деформациями окружающего бетона, прочность бетона на растяжение не учитывается, напряжения в бетоне и арматуре определяются на основании соответствующих зависимостей «напряжения - деформации». Критерием разрушения сечения считается достижение относительными деформациями бетона или (и) арматуры предельных значений.

Зависимость «напряжения - деформации» для бетона принимается параболично-прямоугольной в соответствии с [12], для неметаллической композитной арматуры – прямолинейной на основании [3]. При этом для композитной арматуры реализовано два варианта учета прочности на сжатие: как для отдельного стержня по [3] так и для стержня в бетонном массиве по [11].

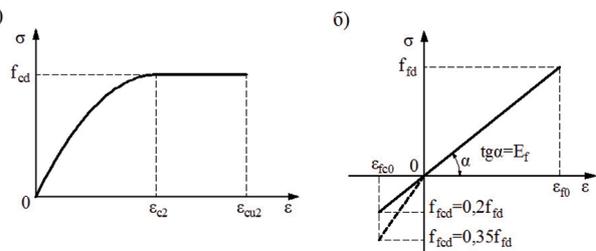


Рис.2. Зависимости «напряжения - деформации» для материалов (а – бетона, б – композитной арматуры).

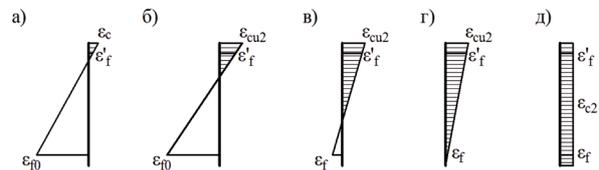


Рис.3. Эпюры распределения деформаций при различных формах разрушения.

- одновременное достижение предельных деформаций и в растянутой арматуре и в бетоне сжатой зоны (рис. 3, а);
- разрушение в результате достижения предельных деформаций в бетоне сжатой зоны до достижения предельных деформаций в растянутой арматуре (рис. 3, в);
- разрушение по бетону, когда все сечение сжато. Рассматривается два случая, при неравномерном распределении в сечении деформаций сжатия (рис. 3, г) и при центральном сжатии (рис. 3, д).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основании выше изложенных предпосылок приведена общая схема возможного распределения относительных деформаций в предельном состоянии при совместном действии на сечение изгибающего момента и нормальной силы (рис. 1).

Зависимость «напряжения - деформации» для бетона представлена на рис. 2,а, для неметаллической композитной арматуры - на рис. 2,б. Для композитной арматуры отображено два варианта учета прочности на сжатие: сплошной линией как для отдельного стержня и пунктирной - как для стержня в бетонном массиве.

График несущей способности внецентренно сжатых элементов строится на всем диапазоне изменения  $M$  и  $N$  от чистого изгиба до центрального сжатия. В данном диапазоне выделяются четыре возможные формы разрушения и соответствующие эпюры распределения деформаций в нормальном сечении:

- разрушение в результате достижения предельных деформаций в растянутой арматуре до достижения предельных деформаций в бетоне сжатой зоны (рис. 3, а);

В качестве расчетного для построения графиков несущей способности принимается прямоугольное сечение с симметричным армированием, с заданными значениями геометрических характеристик сечения, свойств материалов, площади арматуры и ее привязки. Внешние нагрузки задаются в виде нормальной силы, приложенной с заданным эксцентриситетом (отношение изгибающего момента к продольной силе). Расчетная схема в общем виде представлена на рис. 4.

В систему расчетных уравнений для определения предельной несущей способности элемента входят: уравнение равновесия внешних и внутренних продольных сил (1), уравнение равновесия изгибающих моментов относительно центра тяжести рас-

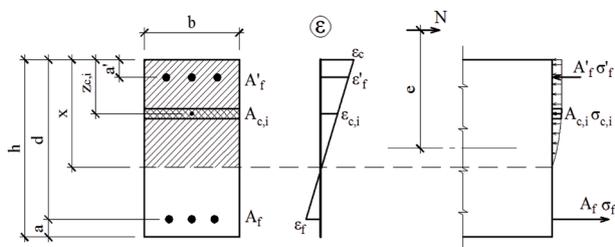


Рис.4. Расчетная схема сечения в общем виде.

тянутой арматуры (2), условие гипотезы плоских сечений (3), зависимости «напряжения - деформации» для бетона (4) и композитной арматуры (5). Напряжения в сжатой арматуре определяются из условия совместности деформаций с окружающим бетоном и не превышения предельной внутренней нормальной силы при заданном эксцентриситете.

$$N = \sum \sigma_{c,i} \cdot A_{c,i} + \sigma'_f \cdot A'_f - \sigma_f \cdot A_f. \quad (1)$$

$$N \cdot e = \sum \sigma_{c,i} \cdot A_{c,i} \cdot (d - z_{c,i}) + \sigma'_f \cdot A'_f \cdot (d - a'). \quad (2)$$

$$\epsilon_c \cdot x = \epsilon_f \cdot (d - x). \quad (3)$$

$$\sigma_c = f_{cd} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

для  $0 \leq \epsilon_c < \epsilon_{c2}$ ,

$$\sigma_c = f_{cd} \text{ для } \epsilon_{c2} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu2}.$$

$$\sigma_f = \epsilon_f \cdot E_f \leq f_{fd}, \quad \sigma'_f = \epsilon'_f \cdot E_f \leq f_{fcd}. \quad (5)$$

где:  $\sigma_{c,i}$ ,  $\sigma'_f$ ,  $\sigma_f$  - напряжения в *i*-том участке сжатого бетона, сжатой и растянутой арматуре;  $\epsilon_{c,i}$ ,  $\epsilon'_f$ ,  $\epsilon_f$  - деформации в *i*-том участке сжатого бетона, сжатой и растянутой арматуре;  $A_{c,i}$ ,  $A'_f$ ,  $A_f$  - площадь *i*-го участка сжатого бетона, сжатой и растянутой арматуры;  $h$  - высота сечения;  $a'$ ,  $a$  - защитный слой сжатой и растянутой арматуры;  $d$  - рабочая высота сечения;  $x$  - высота сжа-

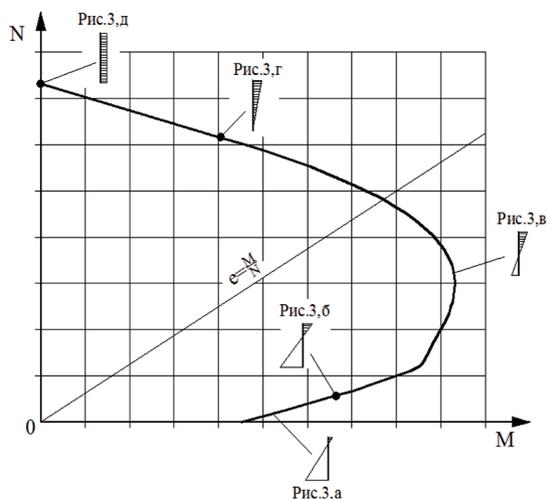


Рис.5. Общий вид графика несущей способности по нормальной силе и моменту с возможными формами разрушения.

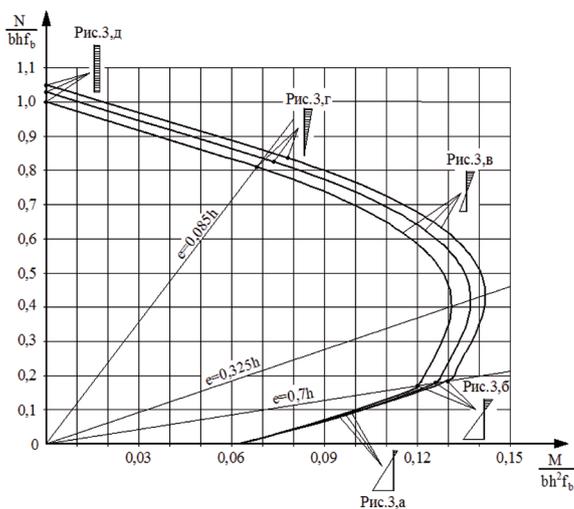


Рис.6. Графики несущей способности внецентренно сжатых элементов с композитной арматурой (а – прочность арматуры на сжатие не учитывается, б – прочность арматуры на сжатие принята как для отдельного стержня, в – прочность арматуры на сжатие принята как для стержня в бетонном массиве).

той зоны бетона;  $z_{c,i}$  - расстояние от верхней грани сечения до центра тяжести *i*-го участка сжатого бетона;  $N$  - внешняя продольная сила;  $e$  - эксцентриситет приложения силы  $N$  относительно центра тяжести сечения элемента.

Результаты расчета представляются в виде графика несущей способности по нормальной силе и моменту на всем диапазоне их изменения от чистого изгиба до центрального сжатия. Общий вид графика с возможными формами разрушения показан на рис. 5.

Для сравнительного анализа выполнен расчет несущей способности прямоугольного элемента размерами  $h=600$  мм,  $b=300$  мм из бетона кл. С20/25 ( $f_{cd}=14,5$  МПа), симметрично армированного неметаллической композитной арматурой кл. АКС600 ( $f_{fd}=400$  МПа,  $E_f=50000$  МПа) по 4 стержня  $\varnothing 12$  (процент армирования 0,5%), защитный слой арматуры 30 мм. Варьируемым фактором является прочность композитной арматуры на сжатие, рассматривается три случая: в первом случае прочность композитной арматуры на сжатие не учитывается, во втором принимается как для отдельного стержня ( $f_{fcd}=0,2 \cdot f_{fd}$ ), в третьем - как для стержня в бетонном массиве ( $f_{fcd}=0,35 \cdot f_{fd}$ ). Полученные графики представлены на рис. 6.

Анализ графиков (рис. 6) показывает, что при одновременном достижении предельных деформаций в растянутой арматуре и сжатом бетоне ( $e=0,7h$ ) учет прочности арматуры на сжатие как для отдельного стержня вносит 4,4% в несущую способность элемента, а учет прочности на сжатие как для стержня в бетоне - 7,2%, для случая максимального момента при достижении предельных деформаций только в бетоне сжатой зоны ( $e=0,325h$ ) вклад составляет соответственно 4,7% и 8%, при переходе к полностью сжатому сечению ( $e=0,085h$ ) - 3% и 5,3%, и при центральном сжатии - 2,8% и 4,8%.

## ВЫВОДЫ

В результате проделанной работы установлено, что при расчете внецентренно сжатых бетонных



элементов с неметаллической композитной арматурой учет ее прочности на сжатие как для отдельного стержня вносит вклад в несущую способность элемента, размер этого вклада зависит от процента армирования и эксцентриситета приложения продольной силы. Для процента армирования 0,5% при так называемых больших эксцентриситетах вклад составляет около 5% а при так называемых малых эксцентриситетах – около 3%. Учет прочности арматуры на сжатие как для стержня в бетонном массиве позволяет увеличить эти показатели более чем в полтора раза.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Арматура неметаллическая композитная базальтовая периодического профиля. Технические условия : ТУ У В.2.7-25.2-34323267-001:2009. – Хмельницкий, 2009.
2. Арматура композитная «Экибар» для армирования конструкций из бетона. Технические условия : ТУ У В.2.7-25.2-21191464-024:2011. – Харьков, 2011.
3. Настанова з проектування та виготовлення бетонних конструкцій з неметалевою композитною арматурою на основі базальто- і склоровінгу : ДСТУ Н Б В.2.6-185:2012. – [Чинний від 2013-04-01]. – К. : Мінрегіон України, 2012. – IV, 28 с. – (Національний стандарт України).
4. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars : ACI 440.1R-06. – American Concrete Institute, ACI Committee 440, 2006. – 44 p.
5. Design and Construction of Building Components with Fiber-Reinforced Polymers : CAN/CSA-S806-02. – Canada, Ontario, Toronto, Canadian Standards Association, 2007. – 218 p.
6. Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars : CNR-DT 203/2006. – Italia, Rome, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, 2007. – 39 p.
7. FRP reinforcement in RC structures : FIB Bulletin 40. – International Federation for Structural Concrete 2007. – 160 p.
8. Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforced Materials : Concrete Engineering Series 23, JSCE 1997. - Japan, Tokyo, Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, 1997. - 325 p.
9. Tavassoli A. Behaviour of GFRP-reinforced concrete columns under combined axial load and flexure: дис. магістра прикладних наук / Arjang Tavassoli. – Toronto, 2013. – 198 p.
10. De Luca, A., Matta, F., Nanni, A. Behavior of Full-Scale Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Columns under Axial Load // ACI Structural Journal. – 2010. – №107(5). – P. 589-596.
11. Tobbi, H. Farghaly, A.S., Benmokrane, B. Concrete Columns Reinforced Longitudinally and Transversally with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars // ACI Structural Journal. – 2012. – №109(4). – P. 551-558.

12. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1992-1-1:2004, IDT) : ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010. Єврокод 2. – [Чинний від 2013-07-01]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2012. –VIII, 312 с. – (Національний стандарт України).

## REFERENCES

1. Technical specifications: TU U V.2.7-25.2-34323267-001:2009 Basalt fiber reinforced polymer bars with periodic profile. - Khmelnytsky, 2009 (In Ukrainian).
2. Technical specifications: TU U V.2.7-25.2-21191464-024:2011 Fiber reinforced polymer bars “Ekibar” for reinforcing of concrete constructions. - Kharkiv, 2011 (In Ukrainian).
3. State standard DSTU N B V.2.6-185:2012 Instruction of application and production of concrete construction with nonmetallic composite reinforcement based on basalt and glass roving. – [Valid from 2013-04-01]. - Kyiv, Minregionbud of Ukraine, 2012. - 28p. (in Ukrainian).
4. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars : ACI 440.1R-06. – American Concrete Institute, ACI Committee 440, 2006. – 44 p.
5. Design and Construction of Building Components with Fiber-Reinforced Polymers : CAN/CSA-S806-02. – Canada, Ontario, Toronto, Canadian Standards Association, 2007. – 218 p.
6. Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars : CNR-DT 203/2006. – Italia, Rome, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, 2007. – 39 p.
7. FRP reinforcement in RC structures : FIB Bulletin 40. – International Federation for Structural Concrete 2007. – 160 p.
8. Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforced Materials : Concrete Engineering Series 23, JSCE 1997. - Japan, Tokyo, Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, 1997. - 325 p.
9. Tavassoli A. Behaviour of GFRP-reinforced concrete columns under combined axial load and flexure: дис. магістра прикладних наук / Arjang Tavassoli. – Toronto, 2013. – 198 p.
10. De Luca, A., Matta, F., Nanni, A. Behavior of Full-Scale Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Columns under Axial Load // ACI Structural Journal. – 2010. – №107(5). – P. 589-596.
11. Tobbi, H. Farghaly, A.S., Benmokrane, B. Concrete Columns Reinforced Longitudinally and Transversally with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars // ACI Structural Journal. – 2012. – №109(4). – P. 551-558.
12. State standard DSTU-N B EN 1992-1-1:2010. Eurocode 2. Design of concrete structures part 1-1. General rules and rules for buildings (EN 1992-1-1:2004, IDT). – [Valid from 2013-07-01]. - Kyiv, Minregionbud of Ukraine, 2012. – 312 p. (in Ukrainian).