УДК 624.072.012
д.т.н., проф. Климов Ю.А., Солдатченко А.С.,
Киевский национальный университет строительства и архитектуры

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНОЙ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРОЙ

Приводятся результаты испытаний опытных балок, армированных стержневой композитной базальтопластиковой арматурой, включающие в себя данные о напряженно-деформированном состоянии бетона и арматуры, характере разрушения, прочности и деформативности балок.

Постановка проблемы. В современной мировой строительной практике все более широкое применение находит композитная неметаллическая арматура, одним из основных преимуществ которой является более высокая коррозионная стойкость по сравнению с традиционной стальной арматурой.

Композитная неметаллическая арматура представляет собой основной несущий стержень и внешний слой, формирующий периодический профиль арматуры. Несущий стержень создается с гладким профилем из тонких волокон стекла, базальта или других материалов диаметром 14…16 мк, пропитанных связующей термореактивной смолой (пластиком). Композитная арматура производится методом пултрузии – протяжкой пропитанных связующим волокон через формообразующую фильеру или методом нидлтрузии – без использования фильеры. Периодический профиль поперечного сечения формируется путем вдавливания обмоточного жгута во внешний формообразующий слой, или путем спиральной обмотки уступами несущего стержня обмоточным жгутом. Временное сопротивление композитной арматуры, в зависимости от вида волокон основы, стеклянных либо базальтовых, составляет соответственно 600…800 МПа и 800…1200 МПа, модуль упругости – 40..55 ГПа и 60…70 ГПа, относительное удлинение после разрыва – 2,0 %, плотность – 2,03 т/м^3. Для арматуры характерна линейная зависимость напряжения – деформации с хрупким разрушением образцов при испытании на растяжение.

В последние годы в Украине освоено промышленное производство композитной неметаллической стеклопластиковой и базальтопластиковой арматуры, для применения которой в строительстве необходимо проведение комплекса целенаправленных экспериментально-теоретических исследований

механических характеристик, сцепления с бетоном, прочности, жесткости и трещиностойкости конструкций.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию прочности и жесткости изгибаемых элементов, армированных композитной неметаллической базальтопластиковой арматурой.

Анализ последних исследований. К настоящему времени проведен ряд экспериментально-теоретических исследований физических и механических свойств композитной арматуры, ее долговечности, прочности, жесткости и трещиностойкости элементов армированных композитной арматурой и сцепления с бетоном с целью написания нормативных документов. Результаты проведенных исследований нашли свое отражение в ряде нормативных документах по проектированию ACI 440.1R-06 [1], CAN/CSA-S806-02 [2], JSCE (1997) [3] и отчете обобщающем отчете Международной организации по бетону (*fib*) [4].

В ACI 440.1R-06 [1] изложены, основанные на проведенных исследованиях, физические и механические характеристики композитной арматуры и используемых для ее изготовления материалов, данные о долговечности в агрессивных условиях, специфика технологии изготовления конструкций, общие положения по проектированию конструкций. В частности, расчет изгибаемых конструкций по [1] выполняется исходя из критерия достижения граничных деформаций бетона и арматуры, гипотезы плоских сечений и диаграммы напряжения-деформации для арматуры и бетона.

Цель и задачи исследований.

Целью настоящих экспериментальных исследований изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной базальтовой арматурой, являлось установление закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния бетона и композитной арматуры в процессе нагружения, характера деформирования и возможных форм разрушения элементов, получение данных о прочности, жесткости и трещинностойкости изгибаемых элементов при коэффициенте армирования больше уравновешенного - $\rho_f > \rho_{fb}$ [2].

В качестве опытных образцов были приняты балки прямоугольного сечения, армированные композитной базальтовой арматурой. Варьируемыми факторами при проведении экспериментальных исследований являлись коэффициент продольного армирования и расположение композитной арматуры в сечении балки.

Всего было испытано 3 серии образцов балок-близнецов. Первая (I) и вторая (II) серии включали в себя по 6 балок-близнецов, в которых композитная базальтовая арматура располагалась в растянутой зоне. Третья серия (III) включала в себя 7 балок-близнецов, в которых композитная арматура

располагалась в растянутой и сжатой зонах. В первой серии коэффициент армирования составлял 0,0059, во второй – 0,0086, а в третьей суммарный процент армирования растянутой и сжатой зон – 0,0146.

Данные о составе экспериментальных исследований приведены в таблице 1, а конструкция балок-близнецов – на рис.1-2. По результатам проведенных испытаний на растяжение временное сопротивление арматуры неметаллической базальтовой (АНБ) диаметром 10 и 12 мм соответственно составило 1115…1146 МПа и 863…1036 МПа. Для того чтобы избежать разрушения балок по наклонной трещине, в зоне действия поперечных сил опытных балок устанавливалась необходимая по расчету поперечная арматура класса А240С с шагом 75 мм.

Таблица 1

№ серии	Геометрические размеры образцов, мм			Продольное армирование		Поперечное армирование (поз.3)	ρ_f	ρ_{fb}	Кол-во балок, шт.
	b	h	l	A_s (поз.1)	A'_s (поз.2)				
I	120	220	1300	2ø10 АНБ	2ø8 А240С	ø8 А240С	0,0059	0,0043	6
II	120	220	1300	2ø12 АНБ	2ø8 А240С	ø8 А240С	0,0086		6
III	120	220	1300	2ø12 АНБ	2ø10 АКБ	ø10 А240С	0,0146		7

Опытные балки поперечным сечением 120 х 220 мм и длиной 1300 мм изготавливались из бетона класса В30. Для определения фактической прочности бетона на сжатие (класс бетона) изготавливались образцы-кубы размерами 100х100х100 мм.

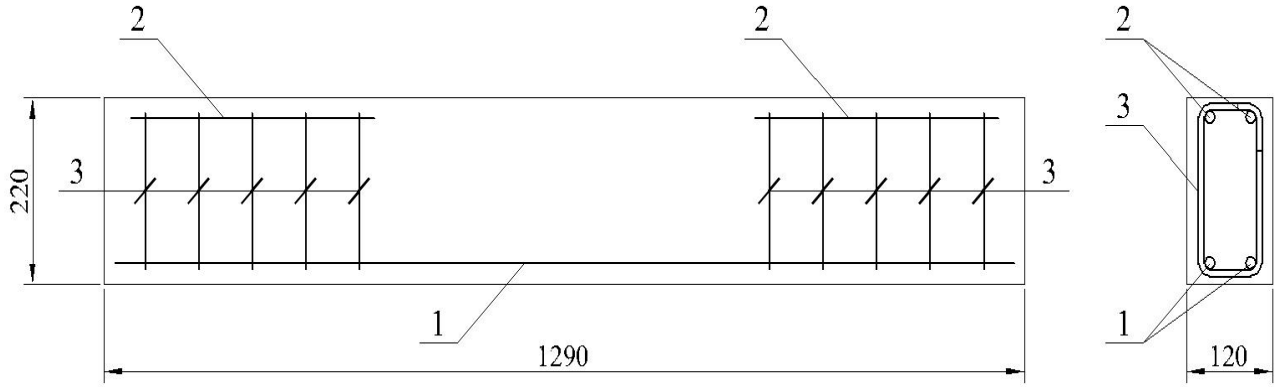

Рис.1. Конструкция опытных балок серии I и II:

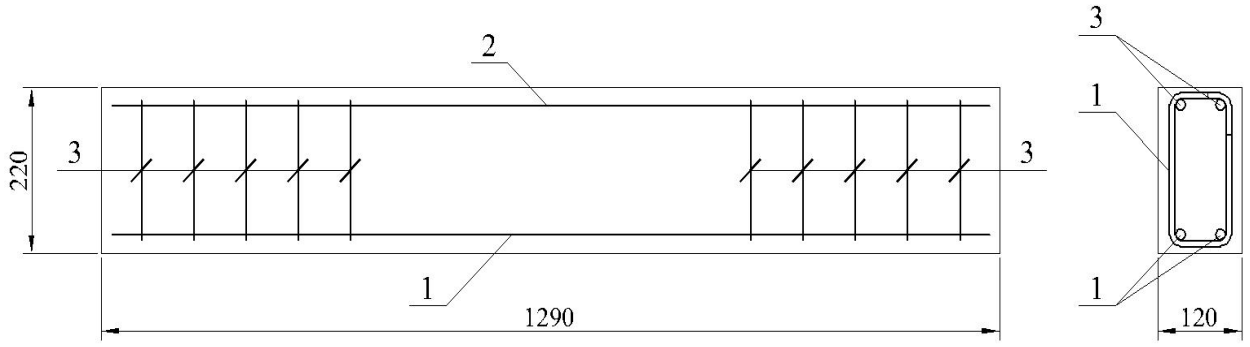

Рис.2. Конструкция опытных балок серии III:

Испытание образцов (балок и кубов) производилось после 28 суток.

Опытные балки испытывались как свободно опертые пролетом 860 мм. При этом одна из опор (шарнирно-неподвижная) допускала только поворот балки, а вторая (шарнирно подвижная) - поворот и перемещение в плоскости изгиба. Нагружение балок осуществлялось двумя сосредоточенными силами, расположенными на расстоянии 230 мм от опор, расстояние между силами (длина зоны чистого изгиба) составляла 400 мм (рис.3). Схема испытаний опытных балок и расстановка измерительной аппаратуры приведена на рис.3.

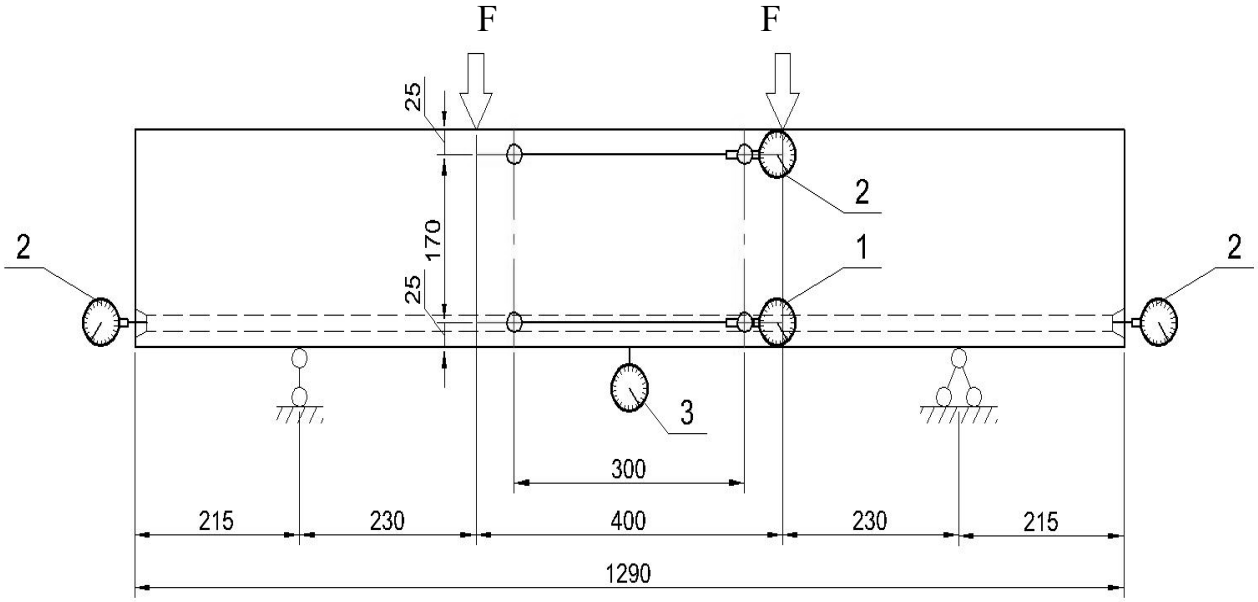

Рис.3. Схема испытаний опытных балок
и расстановка измерительной аппаратуры
1 - индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм;
2 - индикатор часового типа с ценой деления 0,001 мм;
3 - прогибомер часового типа с ценой деления 0,1 мм.

В процессе испытаний измерялись:

- деформации бетона сжатой зоны;
- деформации композитной арматуры растянутой зоны;
- вертикальные перемещения (прогиб) балки в середине пролета;

- количество и ширину раскрытия нормальных трещин;

- смещение (сдвиг) свободного конца композитной продольной арматуры растянутой зоны на торцах балки.

Нагружение образцов осуществлялось ступенями по 0,05…0,10 от предполагаемой разрушающей нагрузки. На каждой ступени нагрузка выдерживалась 2-3 минуты.

Результаты экспериментальных исследований. В процессе нагружения первыми образовывались нормальные трещины в зоне чистого изгиба. Образование трещин происходило при нагрузке 0,32…0,36 от разрушающей. При дальнейшем увеличении нагрузки происходило развитие по высоте и раскрытие нормальных трещин. Развитие нормальных трещин по высоте практически прекращалось при нагрузке 0,65…0,8 от разрушающей, а раскрытие трещин продолжалось вплоть до разрушения балки. При нагрузке 0,6…0,75 от разрушающей, которая соответствует уровню нормативной, принятой для оценки трещиностойкости конструкций, средняя ширина раскрытия трещин составляла 0,35…0,55 мм. Сдвига свободного конца композитной продольной арматуры на торце балки вплоть до ее разрушения зафиксировано не было, что свидетельствует об обеспечении сцепления арматуры с бетоном.

Разрушение всех опытных балок носило пластический характер и происходило в результате разрушения (раздробления) бетона сжатой зоны над нормальной трещиной.

Результаты проведенных экспериментальных исследований приведены в таблице 2 и на рис.4-5 в виде:

- средних по сериям экспериментальных данных о деформациях бетона сжатой зоны и композитной базальтовой растянутой арматуры на стадии предшествующей разрушению, значениях перемещений (прогибов) и ширины раскрытия трещин на стадии соответствующей нормативной нагрузке (порядка 0,5…0,6 от разрушающей) и стадии предшествующей разрушению, характере разрушения и величине разрушающей нагрузки (см. табл.2);

- средних по сериям графиков изменения деформаций бетона сжатой зоны и продольной композитной базальтовой арматуры растянутой зоны опытных балок в процессе нагружения (см. рис.4);

- средних по сериям графиков изменения прогибов опытных балок в процессе нагружения (см. рис.5);

Таблица 2

№ серии	Коэффициент армирования, ρ_f	Относительные деформации $*10^3$		Прогиб f при нагрузке, мм		Ширина раскрытия нормальных трещин, мм	Разрушающая нагрузка M_u, кНм	Характер разрушения
		ε_b	ε_s	F_{ser} [1)]	F_u [2)]	a_{crc}		
I	0,0059	2,016	17,627	3,650	15,200	0,40…0,55	19,40	Дробление бетона сжатой зоны
II	0,0086	2,090	13,160	3,900	13,183	0,35…0,50	21,30	
III	0,0146	2,237	13,763	3,917	15,047	0,35…0,45	22,80	

Примечание: [1)] – нормативная нагрузка; [2)] – разрушающая нагрузка.

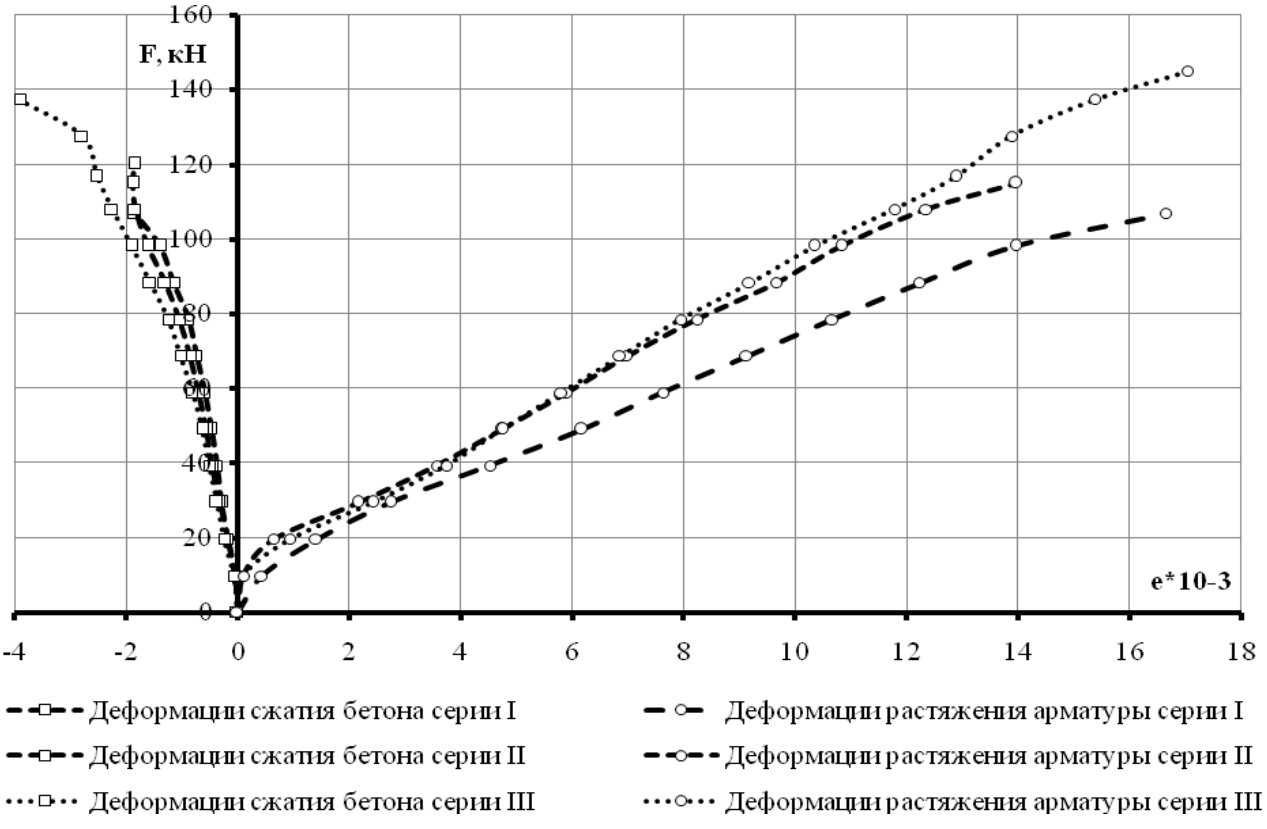

Рис.4. Изменение средних по сериям деформаций бетона сжатой зоны и композитной базальтовой растянутой арматуры опытных балок в процессе нагружения

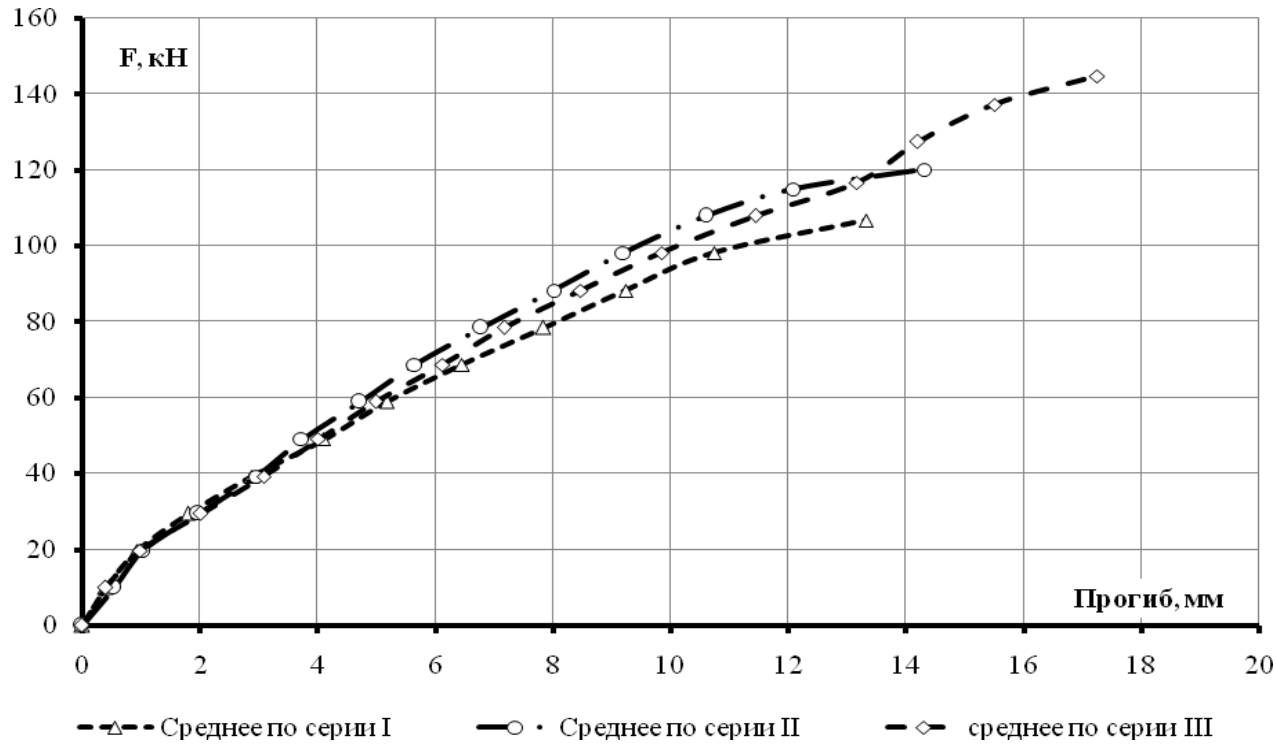

Рис.5. Средние по сериям графики изменения прогибов опытных балок в процессе нагружения

ВЫВОДЫ

1. Закономерности изменения напряженно-деформированного состоянии бетона и композитной арматуры, полученные при испытаниях опытных балок, в целом соответствуют результатам ранее проведенных исследований, обобщенных в отчете [2].

2. Разрушение балок с композитной арматурой с одиночным и двойным армированием с коэффициентами армирования 0,0059…0,0086 и 0,0146 (см. табл.1) происходит по бетону сжатой зоны при деформациях в бетоне близким к предельным и напряжениях в композитной арматуре 0,50…..0,79 от временного сопротивления.

3. Прогибы опытных балок с композитной арматурой при нагрузке, соответствующей уровню нормативной (характеристической), составляли 2,7…4,9 мм (см. табл.2), что соответствовало (1/180…1/320) пролета, и в целом соответствует требованиям к предельным прогибам элементов со стальной арматурой.

4. Ширина раскрытия трещин опытных балок с композитной арматурой при нагрузке, соответствующей уровню нормативной (характеристической), составляла 0,45…0,55 мм, что выше предельных значений, установленных для стальной арматуры исходя из требований коррозионной стойкости в СНиП 2.03.01-84* [5].

5. Результаты проведенных исследований имеют практическую ценность для применения композитной неметаллической арматуры в строительной отрасли и могут быть использованы для создания нормативных документов по проектированию и конструированию бетонных элементов армированных композитной неметаллической базальтопластиковой арматурой.

Список литературы

1. ACI 440.1R-06 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. — American Concrete Institute, 2006. — 44 p.
2. CAN/CSA-S806-02 (2002), Design and Construction of Building Components with Fiber Reinforced Polymers, Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada.
3. JSCE (1997), Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials, research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan.
4. FIB Bulletin 40: FRP reinforcement in RC structures. – International Federation for Structural Concrete 2007. – 160 p.
5. СНиП 2.03.01-84* Бетонные и железобетонные конструкции. – М.: Госстрой СССР, 1986. — 56 с.

Анотація

У статті приведено результати випробування дослідних балок, армованих стрижневою композитною базальтопластиковой арматурою, включаючи данні о напружено-деформованому стані бетону і арматури, характері руйнування, міцності і деформативності балок.

Annotation

In the articles described the results of tests of experimental beams, reinforced with basalt fiber reinforced polymer bars with information about the tense-deformed state of concrete and armature, character of destruction, durability and deformation of the beams.