

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ НА ОСНОВЕ БАЗАЛЬТОВОГО И СТЕКЛЯННОГО РОВИНГА ДЛЯ АРМИРОВАНИЯ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ



**Климов Ю. А.,**  
д.т. н., профессор, Киевский Национальный университет строительства и архитектуры, Киев



**Солдатченко А. С.,**  
асп. каф. ЖБИК, Киевский Национальный университет строительства и архитектуры, Киев



**Витковский Ю. А.,**  
научный сотрудник, Институт водных проблем и мелиорации, Киев

В статье приведена информация о недостатках широко применяемых в строительстве железобетонных конструкций, области применения композитной арматуры в строительной отрасли, современном уровне развития производства композитной арматуры в мире, а также результатах проведенных экспериментально-теоретических исследований с композитной арматурой в Украине и разработке соответствующего нормативного документа по проектированию и изготовлению бетонных конструкций.

Широкая распространенность железобетонных конструкций и многолетний опыт их применения в промышленном, гражданском и гидротехническом строительстве показали, что стойкость бетона к действию агрессивных сред и его способность защищать арматуру не всегда достаточны для обеспечения требуемой долговечности. В первую очередь это относится к конструкциям, которые находятся под влиянием атмосферных воздействий или контактируют с агрессивной средой. Через трещины в бетоне либо в результате проникновения через его поверхность на стальную арматуру попадают щелочные, кислотные, соляные растворы или вода, что приводит к коррозии стальной арматуры.

Достаточно распространена коррозия арматуры в конструкциях путепроводов,

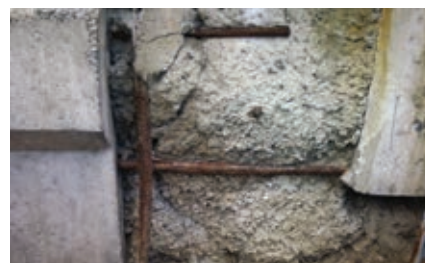
следствием чего является отслаивание защитного слоя бетона торцов (рис.1) и разрушения монолитных стыков сборных конструкций (рис. 2).

При несвоевременном проведении ремонтно-восстановительных работ происходит частичное или полное разрушение как отдельных элементов, так и ответственных несущих конструкций (рис. 3).

Современные методы защиты арматуры (введение ингибиторов коррозии металла в бетонную смесь) и повышения плотности бетона железобетонных конструкций (введение поверхностно-активных веществ в бетонную смесь), нанесение на поверхность бетона изоляционных материалов, не всегда гарантируют сохранение механических свойств арматуры.



**Рис. 1.** Разрушение торцов тротуарных блоков путепровода



**Рис. 2.** Разрушение тротуарной части путепровода



Рис. 3. Коррозия арматуры и разрушения защитного слоя бетона опоры путепровода



Рис. 5. Базальтопластиковая и стеклопластиковая композитная арматура

Композитная арматура нашла свое применение при армировании бетонных конструкций и элементов дорожного строительства, сантехнического назначения, при укреплении морских сооружений и в конструкциях медицинского назначения (несущие элементы помещений магнитно-резонансной томографии).

Кроме того композитная арматура хорошо зарекомендовала себя в конструкциях, которые находятся под воздействием противоледных реагентов, высокохлоридных растворов, в бетонах на шлакопортландцементе, пуццолановом цементе, цементах со смешанными вяжущими и с высоким содержанием активных минеральных добавок,

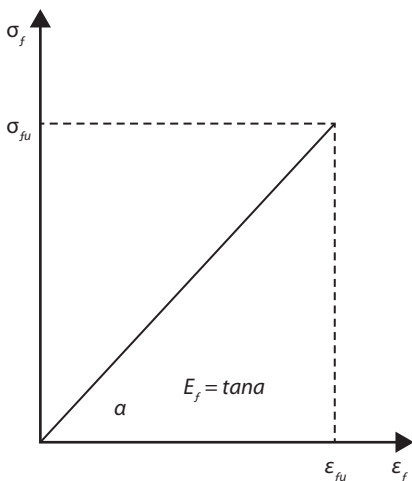


Рис. 4. Принципиальный график зависимости напряжения от деформации.

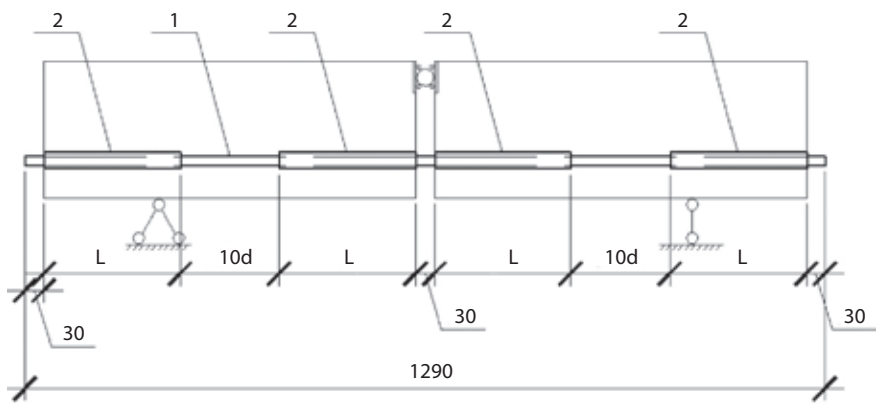


Рис. 6. Конструкция исследуемых образцов. 1 — стержни исследуемой арматуры; 2 — пластиковая трубка

В современной мировой практике наряду с традиционной металлической арматурой все более широкое применение находит композитная, которая применяется в конструкциях, эксплуатирующихся в условиях агрессивной среды.

Композитная арматура представляет собой тонкие волокна диаметром 14–16 мкм, связанные вяжущей термореактивной смолой (пластиком). Композитная арматура производится методом пултрузии (протяжки смазанных вяжущим волокон через формообразующую фильеру) или методом нидл-трузии (без применения фильер).

Физико-механические характеристики композитной арматуры зависят от вида волокна, вида вяжущего и процентного отношения волокно-вяжущее. Оптимальное

соотношение — 75% волокна и 25% вяжущего. Наиболее распространены волокна арамида, базальта, углерода и стекла [1, 2]. Плотность композитной арматуры на основе наиболее распространенных материалов варьируется от 1,25 до 2,20 г/см<sup>3</sup>.

При продольном растяжении стержней композитной арматуры наблюдается линейная зависимость «напряжения — деформации» до хрупкого разрушения образцов (без образования шейки разрушения). Принципиальный график зависимости напряжения от деформации приведен на рис. 4.

В таблице 1 приведены показатели механических свойств наиболее распространенных видов композитной арматуры [1, 2].

Периодический профиль поперечного сечения формируется путем вдавливания жгута в тело стержня или путем спиральной обмотки стержня жгутами без вдавливания.

в бетонах с хлоридсодержащими противоморозными добавками.

Мировой опыт применения композитной арматуры описан во многих сборниках и был положен в основу рекомендаций и руководств по проектированию и конструированию в США [1], Канаде [3], Японии [4], Италии [5].

В последние годы в Украине освоено производство композитной арматуры: ООО «Технобазальт-инвест» производит базальтопластиковую композитную арматуру [6], а ООО ТГ «Экипаж» — стеклопластиковую и базальтопластиковую [7]. Общий вид стержней композитной арматуры обоих производителей приведен на рисунке 5.

На данный момент нами проведена статистическая оценка показателей механических свойств композитной арматуры при растяжении, экспериментальные исследования механических свойств арматуры на срез, испытания на сцепление арматуры с бетоном и испытания на прочность, трещиностойкость и деформативность изгибаемых элементов, армированных композитной арматурой. Исследования и испытания были проведены для композитной арматуры, выпускаемой по [6, 7].

Статистическая оценка показателей механических свойств на растяжение проводилась для временного сопротивления

Таблица 1

Показатель механических свойств	Тип волокна основания			
	Арамид	Базальт	Углерод	Стекло
$\sigma_{fu}$ , Н/мм <sup>2</sup>	1000...2500	800...2000	600...35000	480...1600
$E_f \cdot 10^{-4}$ , Н/мм <sup>2</sup>	4,0...12,5	3,5...8,0	10,0...58,0	3,5...6,0
$\epsilon_{fu}$ , %	2,0...4,2	1,8...3,2	0,5...1,7	1,2...3,7

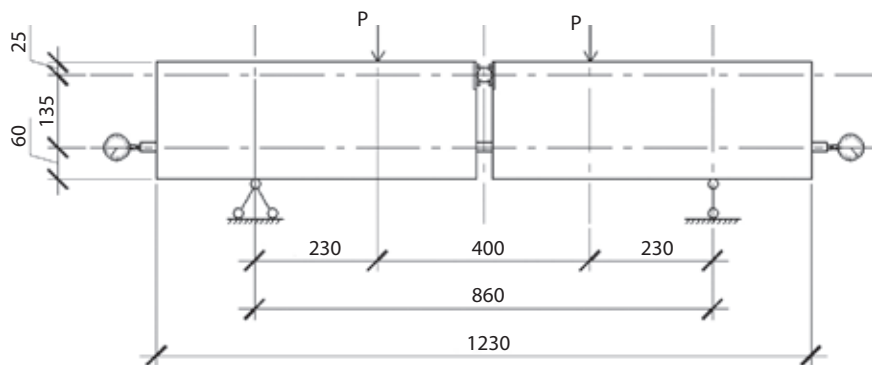


Рис. 7. Схема испытания экспериментальных образцов

разрыву ( $\sigma_{fu}$ ), модуля упругости ( $E_p$ ), относительного временного удлинения ( $\epsilon_{fu}$ ).

Для значений генеральной совокупности были рассчитаны среднее арифметическое ( $\bar{x}$ ), среднеквадратическое отклонение ( $S$ ), коэффициент вариации ( $v$ ) и обеспеченность. Вычисленные значения были сравнены с требованиями к соответствующим минимальным значениям по [8, 9, 10, 11].

По результатам проведенной статистической оценки показателей механических свойств композитной арматуры при растяжении были вычислены характеристические значения соответствующих показателей и коэффициент надежности ( $\gamma_p$ ).

В существующей мировой практике основным методом оценивания сцепления арматуры с бетоном является балочный метод [11, 12].

Метод [12] предусматривает испытание на изгиб образцов (балок), которые состоят из двух половинок, объединенных между собой в растянутой зоне испытуемым арматурным стержнем, а в сжатой зоне — шарниром. Экспериментальные арматурные стержни в середине каждой из половинок имеют сцепление с бетоном длиной  $10d$  ( $d$  — диаметр стержня), а на других участках расположены в специальных трубках, которые исключают его сцепление с бетоном (рис. 6). Схема проведения испытаний приведена на рис. 7.

В качестве критерия соответствия сцепления с бетоном требованиям проектирования, в частности [11] для стальной арматуры, при испытаниях по балочному методу [12] принимаются такие условия:

$$\tau_m \geq 0,098(80 - 1,2d) \quad (1)$$

$$\tau_r \geq 0,098(130 - 1,9d) \quad (2)$$

где:  $\tau_m$  — среднее значение касательных напряжений сцепления при сдвиге на 0,01 мм, 0,1 мм и 1,0 мм по результатам испытаний, МПа;

$\tau_r$  — касательные напряжения при разрушении (выдергивании), МПа;  
 $d$  — диаметр стержня, мм.

Касательные напряжения определялись из функции осевого усилия в стержне по формуле:

$$N_s = \frac{M}{z} \quad (3)$$

где:  $M$  — изгибаемый момент в сечении, которое разделяет балку на две половинки;  
 $z$  — плечо внутренней пары в сечении, которое разделяет балку на две половинки и равно расстоянию от оси исследуемого стержня до оси цилиндра в сжатой зоне.

Касательные напряжения между исследуемым арматурным стержнем и бетоном вычислялись по формуле:

$$\tau = \frac{N_s}{A_s \cdot l} \quad (4)$$

где:  $A_s$  — фактическая площадь поперечного сечения арматурного стержня;  
 $l$  — длина анкеровки арматурного стержня в бетоне, которая равнялась  $10d$ .

По результатам проведенных экспериментальных исследований сцепления ком-

позитной арматуры [6, 7] с бетоном установлено, что периодический профиль стержней удовлетворяет требованиям (1, 2) предъявляемым к традиционной стальной арматуре, применяемой для армирования бетонных конструкций.

Целью экспериментальных исследований изгибаемых элементов было установление закономерностей напряженно-деформированного состояния бетона и композитной арматуры в процессе нагружения, определение возможных форм разрушения элементов, получение данных о прочности, ширине раскрытия трещин и деформативности изгибаемых элементов.

В качестве экспериментальных образцов были приняты балки прямоугольного поперечного сечения, размерами  $120 \times 220$  мм и длиной 1300 мм, армированные композитной арматурой. Варьируемым фактором при проведении экспериментальных исследований были: класс продольной композитной арматуры и коэффициент продольного армирования.

Схема проведения испытаний экспериментальных образцов балок и расположение измерительной аппаратуры приведены на рисунке 8.

В процессе испытания измерялись деформации бетона сжатой зоны, деформации композитной арматуры растянутой зоны, ширина раскрытия нормальных трещин, вертикальные перемещения (прогиб) балки в середине пролета, сдвиг свободного конца композитной продольной арматуры растянутой зоны на торцах балок.

Целью специальных экспериментальных исследований трещиностойкости изгибаемых элементов, армированных композитной арматурой, было установление ширины раскрытия трещин ( $w$ ) от нагружения. В качестве экспериментальных образцов были приняты балки квадратного сечения размерами  $150 \times 150$  мм и длиной 600 мм. Варьируемым фактором при проведении экспериментальных исследований был класс продольной композитной арматуры растянутой

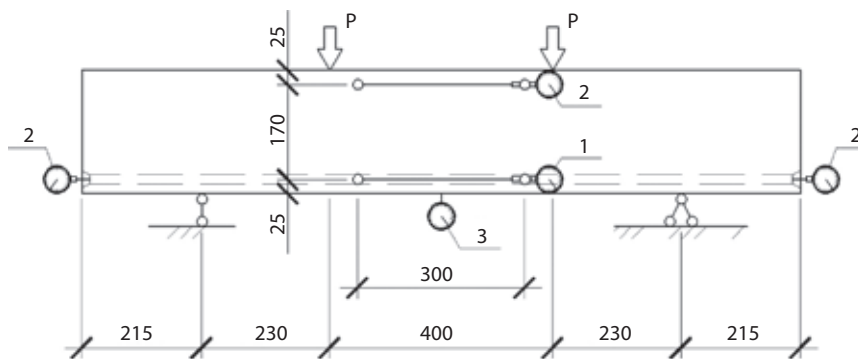


Рис. 8. Схема испытания экспериментальных балок и расположение измерительной техники. 1 — индикатор часового типа с ценой деления 0,01 мм; 2 — индикатор часового типа с ценой деления 0,001 мм; 3 — прогибомер часового типа с ценой деления 0,1 мм.

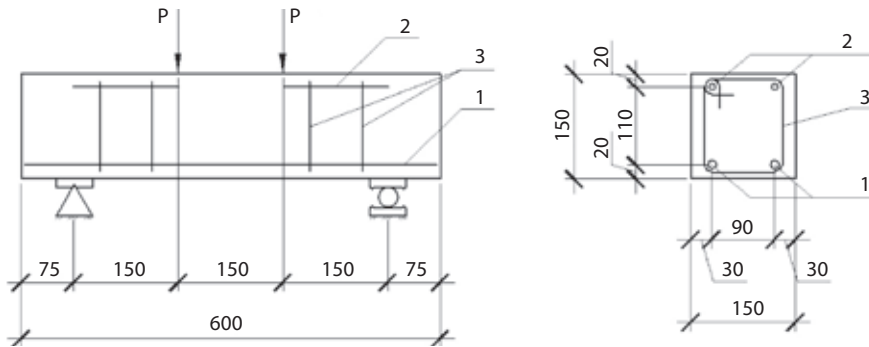


Рис. 9. Конструкция экспериментальных образцов

зоны. Конструкция экспериментальных образцов и схема проведения испытания приведены на рис. 9.

В процессе испытания измерялась ширина раскрытия трещин на уровне растянутой композитной арматуры и интенсивность их развития по высоте от нагрузки.

Обобщение, систематизация и анализ результатов проведенных исследований напряженно-деформированного состояния, ширины раскрытия трещин и деформативности изгибаемых элементов позволили сделать следующие выводы:

1. Разрушение изгибаемых элементов зависит от коэффициента армирования и происходит в результате раздробления бетона сжатой зоны или в результате разрыва композитной арматуры растянутой зоны.
2. Разрушение в результате раздробления бетона сжатой зоны происходит при деформациях в растянутой композитной арматуре, составляющих 0,50...0,80 от предельных деформаций и деформаций в сжатом бетоне, близких к предельным. Разрушение в результате разрыва композитной арматуры имеет более хрупкий характер по сравнению с раздроблением бетона сжатой зоны и происходит при деформациях в арматуре растянутой зоны близких к предельным.
3. В процессе нагружения после появления трещин наблюдалось линейное увеличение ширины их раскрытия, что соответствует диаграмме «напряжение — деформация» при растяжении композитной арматуры (рис. 4).
4. Значение ширины раскрытия трещин при нагрузке близкой к нормативной (примерно 0,6 Mu), изменялось в диапазоне  $w = 0,21...0,33$  мм.
5. Прогибы экспериментальных образцов, которые разрушались в результате раз-

рыва композитной арматуры после момента трещинообразования (0,1...0,2 от Mu), развивались по закономерностям, близким к линейным, что соответствует рисунку 4.

6. Прогибы экспериментальных образцов, разрушавшихся в результате раздробления бетона сжатой зоны, на уровне нагрузки 0,80...1,0 от Mu, развивались по криволинейной зависимости, что является следствием достижения в сжатом бетоне деформаций близких к предельным.
7. Значения прогибов на уровне нормативной нагрузки (примерно 0,6 Mu) в зависимости от коэффициента армирования элемента изменялись в диапазоне  $f = 2,5...4,5$  мм, что соответствовало 1/350...1/250 пролета.
8. В целом закономерности сопротивления бетонных конструкций, армированных композитной арматурой, а именно характер напряженно-деформированного состояния, трещиностойкости и деформативности, отвечают аналогичным закономерностям для элементов, армированных традиционной стальной арматурой.

Полученные данные проведенных экспериментальных исследований были применены при разработке ДСТУ «Руководство по проектированию и изготовлению бетонных конструкций с композитной арматурой на основе базальтового и стеклянного ровинга».

Таким образом, композитная арматура является перспективным материалом для армирования бетонных элементов и конструкций, которые находятся под действием агрессивных сред. К тому же, такие свойства, как диамагнитность, диэлектричность и малая теплопроводность, могут найти свое применение в строительстве.

## Литература

1. ACI 440.1R-06 «Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars» — ACI Committee 440, American Concrete Institute, 2006. — 44 p.
2. FIB Bulletin 40: FRP reinforcement in RC structures. — International Federation for Structural Concrete 2007. — 160 p.
3. CAN/CSA-S806-02, «Design and Construction of Building Components with Fiber-Reinforced Polymers», Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada, (May 2002), 187p.
4. Japan Society of Civil Engineers (JSCE) 1997 «Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforced Materials», Concrete Engineering Series 23, ed. by A. Machida, Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Tokyo, Japan, 325 p.
5. CNR-DT 203/2006 — «Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars».
6. ТУ У В.2.7-25.2-21191464-024:2011 «Арматура композитная «Экибар» для армирования конструкций из бетона. Технические условия».
7. ТУ У В.2.7-25.2-34323267-001:2009 «Арматура неметалева композитна базальтова періодичного профілю. Технічні умови».
8. ДСТУ 3760:2006 Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови.
9. ASTM A615/A615M — 12 Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement.
10. BS 4449:2005 Steel for the reinforcement of concrete. Weldable reinforcing steel. Bar, coil and decoiled product. Specification.
11. EN 1992-1-1:2004 (E) Eurocode 2: Design of concrete structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings. — December 2004
12. Rilem-Fip-Ceb. Bond test for reinforcing steel: 1-Beam test (7-II-28 D). 2-Pullout test (7-II-128): Tentative recommendations. RILEM Journal Materials and Structures, V. 6, No. 32, Março-abril, 1973, p. 96-105.