

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С ГИБРИДНЫМ АРМИРОВАНИЕМ**

Гиль А. И., Лазовский Е.Д.

В настоящее время все большее применение в строительстве находит неметаллическая композитная арматура (в международной практике FRP – fiber reinforced polymer composite) [1-3]. Данный вид арматуры находит широкое применение при возведении бетонных объектов, эксплуатируемых в агрессивных средах, конструкций специального назначения. Также общеизвестно, что широкому внедрению такого вида армирования препятствуют определенные трудности, а именно отсутствие единых требований к механическим свойствам композитных стержней и методам расчета конструктивных элементов, армированных композитной арматурой, единых требований к контролю качества готового изделия. Кроме того, широкому внедрению композитной арматуры (из стеклянных, базальтовых и арамидных волокон) препятствует ряд отрицательных свойств данного материала: низкая огнестойкость, низкий модуль упругости, а также низкая щелочестойкость, от которой будет зависеть долговечность проектируемых конструкций.

В настоящее время даже высокая прочность при растяжении (более 1000 МПа), не позволяет решить одной из главных проблем применения композитной арматуры (из стеклянных, базальтовых и арамидных волокон) в качестве рабочей (при полной замене стальной) в железобетонных конструкциях, а именно низкого значения модуля упругости (порядка 50 ГПа). Исследования в этой области [4-6] показали, что при работе железобетонного изгибаемого элемента, армированного исключительно композитной арматурой, после образования нормальных трещин практически полностью отсутствует участок пластического деформирования и, следовательно, разрушение такого типа элементов носит хрупкий характер. Таким образом, применение композитной арматуры в изгибаемых элементах без предварительного напряжения на сегодняшний день нецелесообразно.

Ситуация может быть значительно улучшена при использовании в растянутой зоне железобетонного элемента совместно композитной и металлической арматуры (так называемое гибридное, либо комбинированное армирование). Экспериментальные исследования [7] статически определимых балок с комбинированным армированием позволили получить пластическую форму разрушения элемента. Кроме того, авторами отмечено, что пластическое деформирование конструкции, даже с минимальным введением композитных стержней, оказалась существенно прочнее, нежели у элементов, армированных исключительно металлической арматурой. Анализ результатов проведенных испытаний [7] дает возможность предположить, что даже небольшое количество композитной арматуры, которая будет работать в упругой стадии, может оказать положительный эффект в работе статически неопределимых балок, достижение которого возможно с точки зрения более рационального перераспределения усилий.

Для проверки эффективности применения гибридного армирования в неразрезных балках проведены исследования на опытных образцах в виде двухпролетных балок прямоугольного поперечного сечения 120мм(*b*)×190мм(*h*) длиной 4000мм, пролетом 1800мм. В качестве варьируемого параметра выбрано количество металлической и композитной арматуры в опорном сечении. Программа исследований составлена таким образом, чтобы принятое суммарное количество арматуры опорной зоны, оценивалось механическим индексом армирования  $\omega$  ( $\omega = \frac{f_{yk} \cdot \rho_{st} + f_{pk} \cdot \rho_p}{f_{cm}}$ ,  $f_{cm} = 25 \text{ МПа}$ ), обеспечивающим достижение примерно равного

значения предельного изгибающего момента при прогнозируемом разрушении балок по нормальным сечениям (по растянутой зоне). Были изготовлены 4 опытных образца неразрезных двухпролетных балок с гибридным армированием растянутой зоны опорного сечения, а также два эталонных образца с полностью металлической и композитной арматурой в растянутой зоне опорного сечения соответственно. Характеристика опытных образцов приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика опытных образцов

Обозначения балок	Размеры поперечного сечения, мм	Армирование опорной зоны	Площадь, мм <sup>2</sup>		Коэффициент армирования, %		$\omega$
			$A_{st}$	$A_p$	$\rho_{st}$	$\rho_p$	
БЭ1	120x190	2d12 S500	226	-	0,99	-	19,8
БЭ2		2d10 FRP1300	-	133,34	-	0,58	28,9
Б3		2d10 S500, d8FRP1300	157	40	0,69	0,175	21,29
Б4		2d8 S500, d10FRP1300	101	66,67	0,44	0,29	23,25
Б5		2d6 S500, d12FRP1300	57	94,34	0,25	0,41	25,73
Б6		2d6 S500, 2d10FRP1300	57	133,34	0,25	0,58	33,9

Армирование образцов осуществлялось пространственными вязанными каркасами. Для продольного армирования нижней зоны опытных образцов использовалась стержневая арматура периодического профиля диаметром 12 мм класса S500 (выбор одинакового количества арматуры в опорном и пролетном сечении обусловлен необходимостью получения перераспределения усилий за счет деформирования арматуры опорной зоны, т.е. снижения жесткости опорного сечения); для поперечного армирования – вязанные замкнутые хомуты из арматурной стали класса S500 диаметром 6мм. Для продольного армирования верхней зоны балок Б3-Б6 применялось гибридное армирование, в качестве стальной арматуры используются стержни периодического профиля диаметром 6, 8, 10 мм класса S500, в качестве композитного армирования стержневая стеклопластиковая арматура периодического профиля диаметром 8, 10, 12 мм, прочностью при растяжении  $f_{pk} = 1100 \text{ МПа}$ . Конструкция образцов балок и схема армирования показана на рисунке 1, готовые вязанные каркасы на рисунке 2, спецификация арматурных изделий представлена в таблице 2.

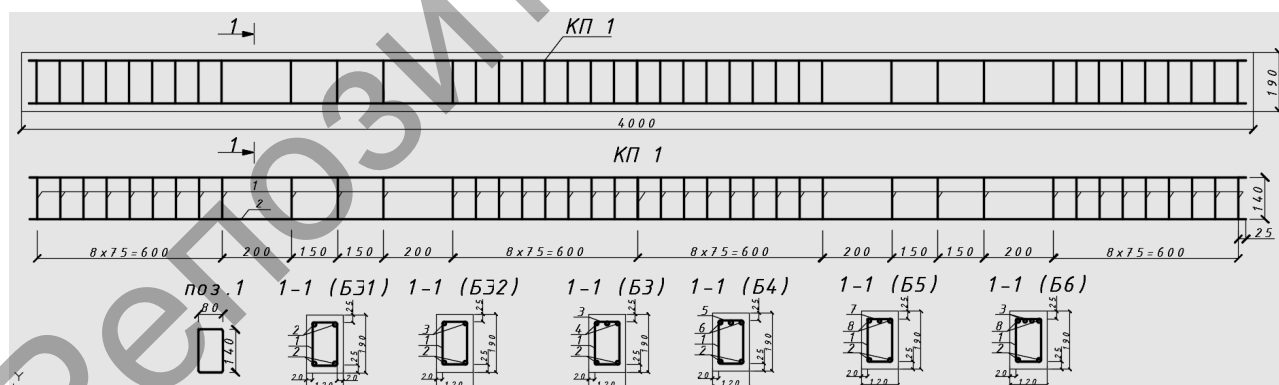


Рисунок 1 – Конструкция образцов и схема армирования образцов-балок

На данный момент были испытаны 2 опытных образца Б1Э и Б3. Балки испытывались как двухпролетные неразрезные, загруженные четырьмя сосредоточенными силами, расположенными симметрично относительно средней опоры на расстоянии 600мм и 1200 мм соответственно. Загрузка балок осуществлялась с помощью гидравлического домкрата, подключенного к ручной насосной станции. Нагрузка от домкрата на каждый пролет балки передавалась через распределительную траверсу, выполненную из прокатных швеллеров. Испытания образцов балок проведены согласно ГОСТ 8829-94.



Рисунок 2 – Вязанные каркасы образцов-балок

Таблица 2 – Спецификация арматурных изделий

Поз.	Наименование	Кол-во, шт.	Поз.	Наименование	Кол-во, шт.
КП1 БЭ1			КП1 Б5		
1	Ø6 S500 L=500	41	1	Ø6 S500 L=500	41
2	Ø12 S500 L=3950	4	2	Ø12 S500 L=3950	2
КП1 БЭ2			7	Ø12 FRP L=3950	1
1	Ø6 S500 L=500	41	8	Ø6 S500 L=3950	2
2	Ø12 S500 L=3950	2	КП1 Б6		
3	Ø10 FRP L=3950	2	1	Ø6 S500 L=500	41
КП1 Б3			2	Ø12 S500 L=3950	2
1	Ø6 S500 L=500	41	3	Ø10 FRP L=3950	2
2	Ø12 S500 L=3950	2	8	Ø6 S500 L=3950	2
4	Ø8 S500 L=3950	2			
3	Ø10 FRP L=3950	1			
КП1 Б4					
1	Ø6 S500 L=500	41			
2	Ø12 S500 L=3950	2			
5	Ø8 FRP L=3950	1			
6	Ø10 S500 L=3950	2			

Для раскрытия статической неопределимости в качестве центральной опоры использован образцовый динамометр. Для определения угла поворота использовались электрические инклинометры, установленные на верхней грани балки. Прогибы определялись при помощи прогибомеров БПАО, установленных в пролете и на опорах (для учета влияния осадки опор). Для определения ширины раскрытия трещин использовались микроскопы с ценой деления 0,05мм. Для определения деформаций по высоте опорного сечения использовалась система комплексного мониторинга «Терем – 4». Нулевые показания приборов снимались до начала испытаний с учетом собственного веса конструкции. Схема расстановки приборов приведена на рисунке 3. На рисунке 4 приведена испытательная установка реального образца.

Проведенные испытания двух опытных образцов позволили получить первые экспериментальные результаты исследования.

Разрушение балок произошло в пролете от достижения стальной арматурой предела текучести, в точке приложения крайней сосредоточенной силы. Предельная нагрузка для балки Б1Э составила 203,64кН, балки Б3 188,4кН. Характер разрушения опытных образцов был аналогичен друг другу. Момент трещинообразования для Б1Э наступил при нагрузке 38,64кН, первые трещины образовались одновременно в пролете и на опоре балки, для Б3

момент трещинообразования соответствовал нагрузке 28,74 кН, трещины появились также одновременно. Стоит отметить, что количество трещин в балке Б1Э превышало количество трещин в Б3, однако ширина раскрытия трещин существенно не отличалась. Экспериментальные образцы после испытания представлены на рисунке 5.

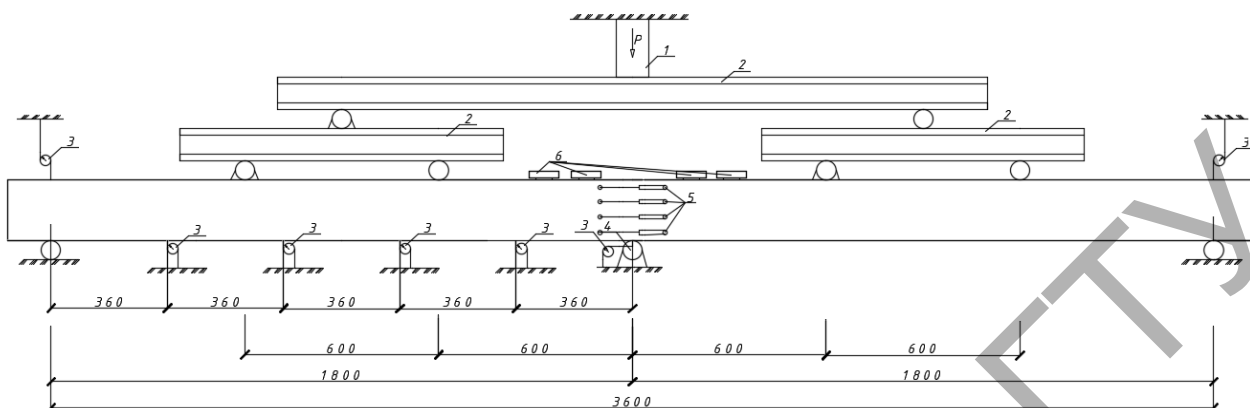


Рисунок 3 – Схема расстановки приборов на опытной балке  
 1 – гидравлический домкрат; 2 – распределительная траверса; 3 – прогибомер;  
 4 – образцовый динамометр; 6 – электронный инклинометр;  
 7 – система мониторинга «Терем-4».



Рисунок 4 – Испытательная установка



Рисунок 5 – Балка Б3(а) и Б1Э(б) после испытания

Экспериментальные исследования позволили получить данные о жёсткости образцов. На рисунке 6 представлена зависимость прогибов балок от приложенной нагрузки. Максимальные прогибы были зафиксированы в крайних точках приложения нагрузки.

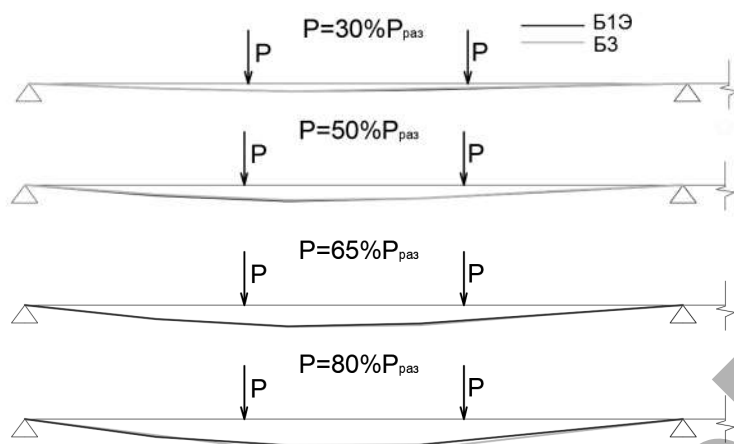


Рисунок 6 – Прогибы экспериментальных балок в зависимости от приложенной нагрузки

Из приведенных схем видно, что прогиб обеих балок практически одинаков, вплоть до приложения нагрузки соответствующей 65% от разрушающей. В дальнейшем прогиб балки БЗ стремительно растет и уже к 80% от разрушающей значительно превышает прогиб балки с металлическим армированием опорной зоны, что свидетельствует об активном включении в работу композитной арматуры и соответственно снижению жесткости балки в целом.

Проведенные экспериментальные исследования позволили получить новые данные по работе и характере разрушения статически неопределимых балок с гибридным и традиционным армированием опорной зоны.

#### Список источников

1. *fib* 2005 "FRP Reinforcement for reinforced concrete structures", Task Group 9.3 (Fiber-Reinforced Polymer) Reinforcement for Concrete Structures, Lausanne, Switzerland, 2005 – 173 p.
2. ACI 440.1R-03 " Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA – 2003 – 81 p.
3. Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber Reinforced Polymer Bars – CNR–DT 203/206, Rome, June 2007 – 35 p.
4. Мясников А.Л. Изгибаемые конструкции со стеклопластиковой арматурой /А.Л. Мясников, Е.П. Телешман, А.А. Варламов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 72-й международной научно-технической конференции / под ред. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. Т.2. с. 70-74.
5. Польской П.П. О влиянии стеклопластиковой арматуры на прочность нормальных сечений изгибаемых элементов из тяжёлого бетона //П.П. Польской, Мерват Хишмах, Михуб Ахмад // Эл. журнал «Инженерный вестник дона», №4, Ростов-на-дону, 2012.
6. Маилян Д.Р., Влияние стального и композитного армирования на ширину раскрытия нормальных трещин / П.П. Польской, Маилян Д.Р. // [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-stalnogo-i-kompozitnogo-armirovaniya-na-shirinu-raskrytiya-normalnyh-treschin> Дата доступа: 24.03.2015
7. Тур В.В. Экспериментальные исследования изгибаемых бетонных элементов с комбинированным армированием стальными и стеклопластиковыми стержнями / Тур В.В. Малыха В.В. // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия F Строительство. Прикладные науки. – 2013. – №8. – С. 58-65.