

УДК 691

**МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НЕРАЗРЕЗНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С ГИБРИДНЫМ АРМИРОВАНИЕМ РАСТЯНУТОЙ ЗОНЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО ОПОРНОГО СЕЧЕНИЯ**

*А.И. ГИЛЬ; канд. техн. наук Е.Д. ЛАЗОВСКИЙ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Представлена методика проведения экспериментальных исследований, испытательная установка. Рассматривается композитная неметаллическая арматура и возможность ее применения совместно со стальной (гибридное армирование) в изгибаемых железобетонных элементах. Показаны основные недостатки композитных арматурных стержней, препятствующие широкому внедрению композитного армирования в строительной отрасли. По результатам анализа исследований в этой области даны предпосылки применения указанного вида армирования без применения предварительного напряжения, в том числе в неразрезных железобетонных балках. Представленная методика сосредоточена на подтверждении возможности и эффективности применения гибридного армирования в неразрезных железобетонных балках в растянутой зоне опорного сечения, а также проверке теории расчета таких элементов, для чего разработана программа экспериментальных исследований. Даны характеристики и конструкции опытных образцов балок, методика определения физико-механических свойств используемых материалов, особенности изготовления опытных конструкций. Для натурного эксперимента были изготовлены образцы железобетонных балок с применением гибридного армирования.*

**Ключевые слова:** *композитная арматура, неразрезные балки, гибридное армирование.*

**Введение.** В настоящее время в зарубежной и отечественной строительной отрасли все большее применение находит неметаллическая композитная арматура. Интерес к неметаллической арматуре возник еще в середине XX века, и был связан, в первую очередь, с расширением области применения железобетонных конструкций в зданиях и сооружениях, эксплуатируемых в сильно агрессивных средах, где достаточно трудно обеспечить надежную коррозионную защиту металлической арматуре, или в конструкциях, где необходимо обеспечить нейтральные магнитные и диэлектрические свойства.

Композитная арматура (международное обозначение FRP – fiber reinforced polymer composite) представляет собой полимерный элемент, армированный высокопрочными волокнами (исходным материалом для волокна служит стекло, углерод, базальт либо арамид) [1 – 3].

В сравнении с металлической, композитная арматура (в независимости от типа применяемого волокна) обладает следующими положительными свойствами: не подвержена коррозии, устойчива ко многим химическим воздействиям, является диэлектриком, имеет меньший удельный вес, высокую прочность при растяжении. К отрицательным свойствам, которые в первую очередь препятствуют широкому внедрению композитной арматуры взамен стальной, следует отнести низкие огнестойкость, щелочестойкость, достаточно низкий модуль упругости, а также высокую стоимость.

Следует отметить, что именно низкий модуль упругости не дает возможности использовать ненапрягаемую композитную арматуру в качестве рабочей в железобетонных изгибаемых элементах. Исследования вопроса применения композитной арматуры в таких конструкциях без предварительного напряжения показывают, что, после образования нормальных трещин в работе элемента практически полностью отсутствует участок пластического деформирования и разрушение такого элемента происходит по бетону сжатой зоны [4 – 6]. Очевидно, что доминирующим фактором при определении прочности по нормальным сечениям изгибаемого железобетонного элемента, армированного в растянутой зоне исключительно композитными арматурными стержнями без предварительного напряжения, является не прочность композитной арматуры при растяжении, а ее модуль упругости. Таким образом, применение композитной арматуры в изгибаемых элементах без предварительного напряжения на сегодняшний день ограничено.

Ситуация может быть улучшена введением в растянутую зону железобетонного элемента, армированного композитной арматурой, некоторого процента металлической арматуры (гибридное армирование), тем самым достигнув более рациональной и безопасной работы конструкции в целом. Данное суждение подтверждено результатами работы под руководством профессора В.В. Тура [7], в которой показано целесообразное использование композитной арматуры (в данном случае стеклопластиковой) совместно со стальной без предварительного напряжения. Авторами [7] получена пластическая форма разрушения опытных образцов. При этом особое внимание обращено на тот факт, что ветвь пластического деформирования элемента с гибридным армированием оказалась практически в 2 раза протяженнее, чем для элементов, армированных только металлической арматурой, эквивалентной по прочности.

Анализ результатов работы [7] дает возможность предположить, что даже небольшой процент композитной арматуры, которая будет работать в упругой стадии совместно со стальной, может оказать положительный эффект в работе неразрезных железобетонных балок, достижение которого возможно с точки зрения более эффективного перераспределения внутренних усилий. Для проверки эффективности и возможности применения гибридного армирования в растянутой зоне опорного сечения неразрезных балок, а также экспериментальной проверки теории расчета прочности таких элементов разработана методика экспериментальных исследований.

**Характеристики опытных образцов неразрезных балок с гибридным армированием.** Проверочные экспериментальные исследования будут проведены на опытных образцах, представляющих собой железобетонные балки прямоугольного поперечного сечения шириной 120 мм, высотой 190 мм и длиной 4000 мм. Варьируемым параметром является количество гибридного армирования в растянутой зоне опорного сечения. Программа исследований составлена таким образом, что принятое суммарное количество армирования сечения исследуемой опорной зоны оценивалось механическим индексом армирования

$$\omega \left( \omega = \frac{f_{yk} \rho_{st} + f_{pk} \rho_p}{f_{cm}} \right), f_{cm} = 25 \text{ МПа},$$

который обеспечивает достижение примерно равного значения предельного изгибающего момента при прогнозируемом разрушении балок по нормальным сечениям.

Для проведения экспериментальных исследований были запроектированы 4 опытных образца неразрезных двухпролетных (пролет 1800 мм) балок с гибридным армированием растянутой зоны опорного сечения, а также два эталонных образца с полностью металлической и полностью композитной арматурой в опорном сечении. Характеристики опытных образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Характеристика опытных образцов

Обозначения балок	Размеры поперечного сечения, мм	Армирование опорной зоны	Площадь арматуры, мм <sup>2</sup>		Коэффициент армирования, %		$\omega$
			$A_{st}$	$A_p$	$\rho_{st}$	$\rho_p$	
БЭ1	120×190	2Ø12 S500	226	–	0,99	–	19,8
БЭ2		2Ø10 FRP	–	133,34	–	0,58	28,9
Б3		2Ø10 S500, Ø8FRP	157	40	0,69	0,175	21,29
Б4		2Ø8 S500, Ø10FRP	101	66,67	0,44	0,29	23,25
Б5		2Ø6 S500, Ø12FRP	57	94,34	0,25	0,41	25,73
Б6		2Ø6 S500, 2Ø10FRP	57	133,34	0,25	0,58	33,9

В качестве продольного армирования растянутой зоны пролетных сечений всех опытных образцов выбрана стержневая арматура периодического профиля диаметром 12 мм класса S500 (выбор эквивалентного по прочности количества арматуры в опорном и пролетном сечении обусловлен тем, чтобы получить перераспределение усилий за счет деформаций арматуры, т.е. значительным ослаблением растянутой зоны опорного сечения), для поперечного армирования – вязанные замкнутые хомуты из арматурной стали диаметром 6 мм класса S500. Для продольного армирования растянутой зоны центрального опорного сечения образцов балок принято гибридное армирование: в качестве стальной арматуры используются стержни периодического профиля диаметром 6, 8, 10 и 12 мм класса S500, в качестве композитного армирования – стержневая стеклопластиковая арматура периодического профиля диаметром 8, 10 и 12 мм производства ЧТУП «Минпласт». Армирование образцов принято пространственными вязанными каркасами, выбор которых обуславливается исключением влияния на сопротивление изгибу таких факторов, как ослабление сечения продольной арматуры при ее сварке, исключение влияния приваренных поперечных стержней на сцепление продольной арматуры с бетоном. Шаг поперечных стержней запроектирован таким образом, чтобы предотвратить разрушение образцов балок по наклонным сечениям от перерезывающих сил. Спецификация арматурных изделий представлена в таблице 2, конструкция экспериментальных балок и схема армирования показана на рисунке 1.

Таблица 2. – Спецификация арматурных изделий

Поз.	Наименование	Кол-во, шт.	Поз.	Наименование	Кол-во, шт.
1	2	3	4	5	6
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

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6
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			

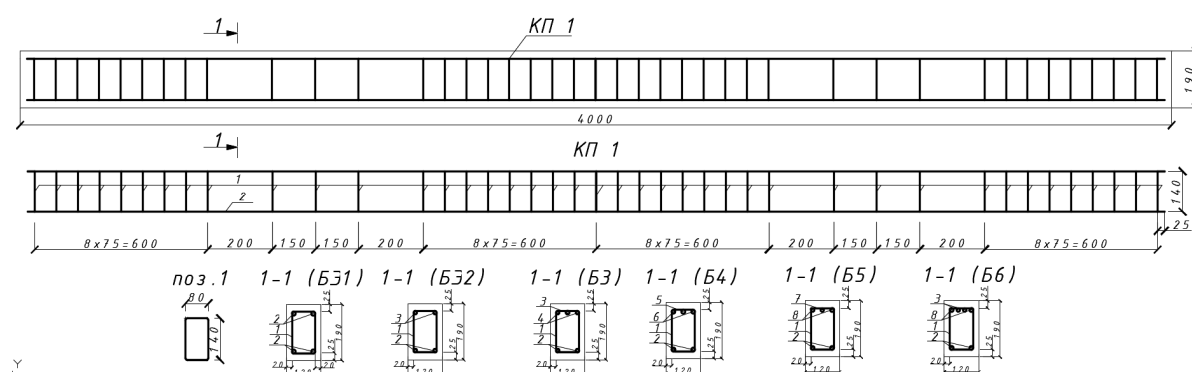


Рисунок 1. – Конструкция и схема армирования образцов-балок

С целью определения физико-механических характеристик продольной и поперечной арматуры опытных образцов-балок были отобраны отрезки арматуры из тех же партий, которые использовались для изготовления арматурных каркасов. Площадь поперечного сечения определялась путем взвешивания и измерением длины образцов. Для определения относительных деформаций образцов при растяжении применялись индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм на базе 100 мм. Образцы арматурной стали испытаны согласно [8].

Испытания по определению физико-механических характеристик стеклопластиковой арматуры проведены согласно ГОСТ 32492-2015 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения физико-механических характеристик» на отрезках арматуры, отобранных из тех же партий, которые использовались при изготовлении каркасов. Результаты исследований представлены в публикации [9].

Определение физико-механических характеристик бетона будет проведено непосредственно перед исследованием опытных балок на образцах призм и кубах размерами 100 × 100 × 400 мм и 100 × 100 × 100 мм, соответственно, по требованиям [10, 11].

**Изготовление опытных образцов.** Вязаные пространственные арматурные каркасы опытных образцов изготавливались в испытательной лаборатории Полоцкого государственного университета с применением вязальной проволоки диаметром 0,8 мм, общий вид каркасов представлен на рисунке 2.

После изготовления пространственных арматурных каркасов опытные образцы бетонировались в металлодеревянной опалубке в лаборатории Полоцкого государственного университета. Для облегчения распалубливания образцов опалубка смазывалась машинным маслом. В качестве ограничителей для создания защитного слоя бетона использовались стандартные держатели (рисунок 3). Бетонирование образцов выполнялось в вертикальном (рабочем) положении.

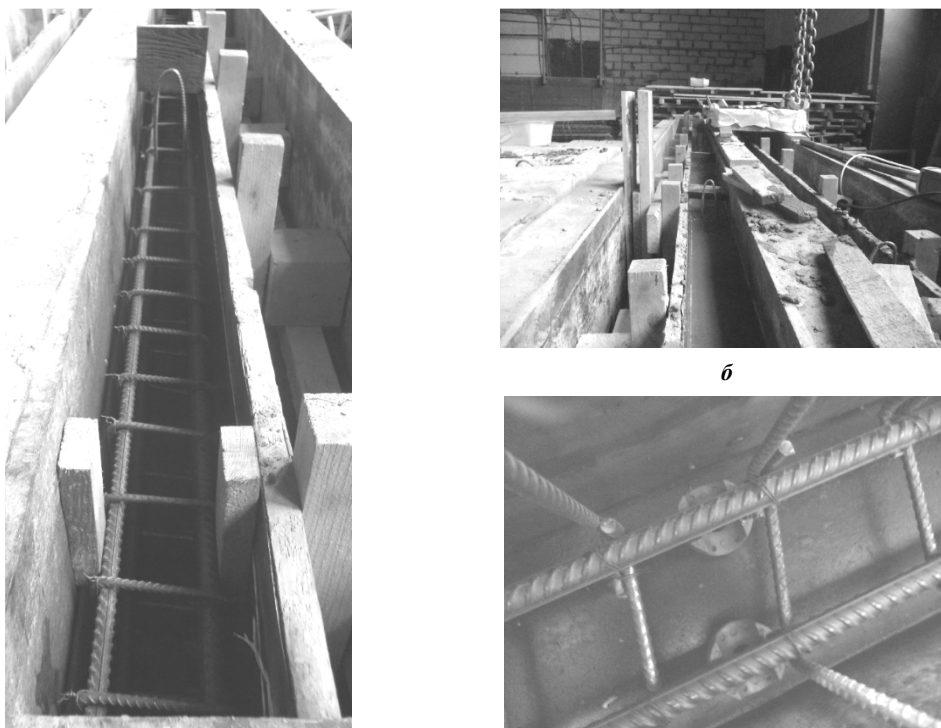
Уплотнение бетонной смеси производилось глубинным вибратором. Набор прочности проходил в естественных условиях.

При изготовлении бетонной смеси опытных образцов применялся портландцемент марки 500 Д-0 Кричевского цементного завода. В качестве крупного заполнителя использовался гранитный щебень фракции 5–20 мм, мелкого заполнителя – кварцевый песок с объемным весом 1630 кг/м<sup>3</sup> и модулем

крупности 1,62. Бетонная смесь для бетонирования образцов приготавливалась водоцементным отношением В/Ц = 0,53. Для лабораторных испытаний с целью определения физико-механических свойств бетона, одновременно с бетонированием образцов, из бетонной смеси тех же замесов были изготовлены призмы размерами 100 × 100 × 400 мм и кубы 100 × 100 × 100 мм.



Рисунок 2. – Общий вид вязаных каркасов образцов-балок

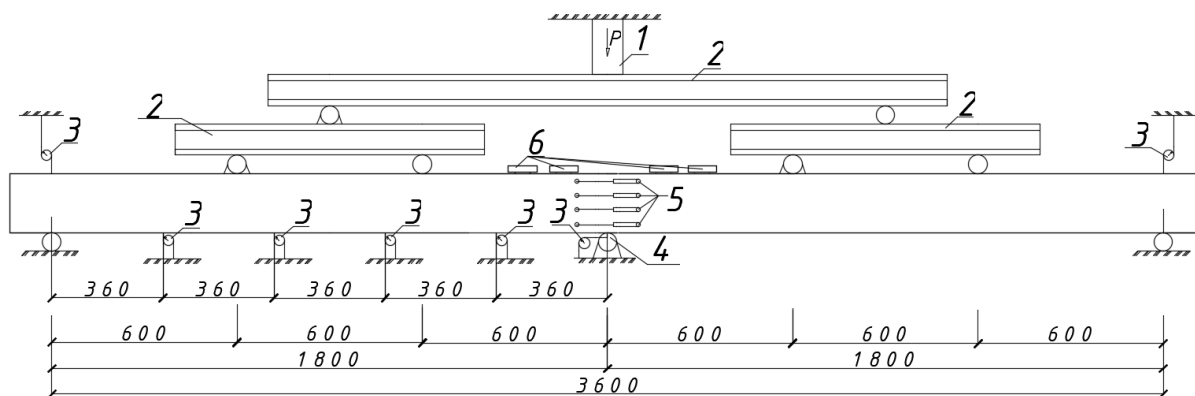


*а* – арматурный каркас в опалубке; *б* – забетонированный опытный образец;  
*в* – стандартные держатели для создания защитного слоя бетона

Рисунок 3. – Бетонирование опытных образцов

**Методика экспериментальных исследований.** Предполагается испытание двухпролетных неразрезных, нагруженных четырьмя сосредоточенными силами, расположенными симметрично относительно средней опоры на расстоянии 600 мм и 1200 мм соответственно, балок. Их нагружение будет произведено гидравлическим домкратом, подключенным к ручной насосной станции. Нагрузка от домкрата на балку распределяется через систему распределительных траверс, выполненных из прокатных швеллеров, которая разделяет нагрузку от домкрата на 4 сосредоточенные силы (по 2 в каждом пролете).

Для раскрытия статической неопределимости в качестве центральной опоры предполагается использование образцового динамометра известной жесткости с фиксацией величин осадок опор на каждом этапе. Для определения угла поворота опорного сечения относительно центральной оси будут применены электрические инклинометры, установленные на верхней грани балки вблизи центрального опорного сечения. Для определения прогибов предусмотрена установка прогибомеров часового типа БПАО в пролете и на опорах (для учета влияния осадки опор). Определение ширины раскрытия трещин будет проведено с помощью отсчетного микроскопа с ценой деления 0,05 мм. Для определения распределения относительных деформаций по высоте опорного сечения будет использована система комплексного мониторинга «Терем-4» с линейными измерителями деформаций, установленными на базе 200 мм в четырех местах по высоте сечения. Схема расстановки приборов приведена на рисунке 4. На рисунке 5 представлено фото испытательной установки.



1 – гидравлический домкрат; 2 – распределительная траверса; 3 – прогибомер;  
4 – образцовый динамометр; 5 – система мониторинга «Терем-4»; 6 – электронный инклинометр

Рисунок 4. – Схема расстановки приборов на опытной балке



Рисунок 5. – Испытательная установка. Внешний вид

**Заключение.** В рамках программы экспериментальных исследований двухпролетных железобетонных балок с гибридным армированием растянутой зоны стальной и стеклопластиковой стержневой арматурой на промежуточных опорах авторами разработана методика их испытания, включающая разработку опытных образцов и технологию их изготовления. Результаты проводимых исследований позволят получить новые экспериментальные данные о характере работы нормальных сечений статически неопределимых железобетонных балочных элементов с гибридным армированием стальной и композитной

стеклопластиковой рабочей продольной арматурой, подтвердить теоретические предпосылки их расчета, а также проверить практическую эффективность внедрения такого вида армирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. FRP Reinforcement for reinforced concrete structures : fib 2005. – Task Group 9.3 Fiber-Reinforced Polymer. – Lausanne, 2005. – 173 p.
2. Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars : ACI 440.1R-03, American Concrete Institute. – Farmington Hills, 2003. – 81 p.
3. Гиль, А.И. Стеклопластиковая и углепластиковая арматура в строительстве: преимущества, недостатки, перспективы применения / А.И. Гиль, Е.Н. Бадалова, Е.Д. Лазовский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 16. – С. 48–53.
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 междунар. науч.-техн. конф. : в 2 т. / 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 тяжелого бетона [электронный ресурс] / П.П. Польской, Мерват Хишмах, Михуб Ахмад // Эл. журнал Инженерный вестник дона. – 2012. – № 4. – Ростов н/Д. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/14246452>. – Дата доступа: 01.12.2019.
6. Польской, П.П. Влияние стального и композитного армирования на ширину раскрытия нормальных трещин [электронный ресурс] / П.П. Польской, Д.Р. Маилян. – 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 / В.В. Тур, В.В. Малыха // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2013. – № 8. – С. 58–65.
8. Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение : ГОСТ 12004-81. – Введ. 15.12.81. – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 16 с.
9. Гиль, А.И. Экспериментальное исследование механических свойств стеклопластиковой арматуры / А.И. Гиль, Е.Д. Лазовский // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. – Минск : Колорград, 2017. – Вып. 9. – С. 168–183.
10. Бетонные и железобетонные конструкции : СНиП П-В.1-62\*. – Введ. 01.01.1963. – М.: Изд-во лит-ры по строительству, 1970. – 114 с.
11. Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона : ГОСТ 24452-80. Введ. 18.11.80. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 19 с.

Поступила 20.12.2019

#### EXPERIMENTAL RESEARCH METHODOLOGY OF CONTINUOUS REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH HYBRID REINFORCEMENT OF THE TENSIONED ZONE OF NORMAL SECTION AT THE CENTRAL SUPPORT

A. HIL, Y. LAZOUSKI

*The methodology of experimental studies and a test setup is presented. The article discusses composite non-metallic reinforcement and the possibility of its use in conjunction with steel (hybrid reinforcement) in flexible concrete elements. The main disadvantages of composite reinforcing bars that impede the widespread adoption of composite reinforcement in the construction industry are shown. According to the results of the analysis of studies in this area, the prerequisites for the use of this type of reinforcement without the use of prestressing are presented, including in continuous reinforced concrete beams. The presented studies are focused on confirming the possibility and effectiveness of the use of hybrid reinforcement in continuous reinforced concrete beams in the tensioned zone of the support section, as well as testing the theory of analysis of such elements. For this purpose, an experimental research program has been developed. The characteristics and designs of prototypes of beams, the methodology for determining the physicomechanical properties of the materials used, and the features of the manufacture of prototypes are presented. For a full-scale experiment, samples of reinforced concrete beams were made using hybrid reinforcement.*

**Keywords:** composite reinforcement, continuous beams, hybrid reinforcement.