

СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 624.072.232

**АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НЕРАЗРЕЗНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С КОМБИНИРОВАННЫМ АРМИРОВАНИЕМ КОМПОЗИТНОЙ И СТАЛЬНОЙ АРМАТУРОЙ РАСТЯНУТОЙ ЗОНЫ НАД ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ОПОРОЙ**

**А. И. Гиль<sup>1</sup>, Е. Д. Лазовский<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Магистр технических наук, старший преподаватель кафедры строительных конструкций

УО «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой», Новополоцк, Беларусь, e-mail: a.hil@psu.by

<sup>2</sup> К. т. н., доцент, доцент кафедры строительных конструкций УО «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой», Новополоцк, Беларусь, e-mail: y.lazowski@psu.by

**Реферат**

В статье представлены результаты экспериментальных исследований неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием композитной и стальной арматурой растянутой зоны над промежуточной опорой с различным соотношением предельных растягивающих усилий в композитной и стальной арматуре. Получена картина трещинообразования в зоне над промежуточной опорой и в пролете опытных балок, определен характер их разрушения, особенности деформирования, построены опытные зависимости «пролетный изгибающий момент – прогиб». Выявлены особенности деформирования растянутой зоны над промежуточной опорой балок, построены опытные зависимости «опорный изгибающий момент – угол поворота». Получены графики изменения растягивающих усилий в стальных и композитных стержнях в растянутой зоне над промежуточной опорой.

**Ключевые слова:** неразрезные балки, железобетон, композитная арматура, комбинированное армирование, изгиб, экспериментальные исследования.

**ANALYSIS OF THE RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF CONTINUOUS REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH COMBINED REINFORCEMENT WITH COMPOSITE AND STEEL REINFORCEMENT OF THE STRETCHED ZONE ABOVE THE INTERMEDIATE SUPPORT**

**A. I. Hil, Y. D. Lazowski**

**Abstract**

The article presents the results of experimental studies of continuous reinforced concrete beams with combined reinforcement of composite and steel reinforcement of the stretched zone above the intermediate support with a different ratio of the ultimate tensile forces in composite and steel reinforcement. A picture of cracking in the zone above the intermediate support and in the span of experimental beams is obtained, the nature of their destruction, deformation features are determined, experimental dependencies "span bending moment – deflection" are constructed. The features of deformation of the stretched zone above the intermediate support of the beams are revealed, experimental dependences "support bending moment – angle of rotation" are constructed. Graphs of changes in tensile forces in steel and composite rods in the stretched zone above the intermediate support are obtained.

**Keywords:** continuous beams, reinforced concrete, composite reinforcement, combined reinforcement, bending, experimental studies.

**Введение**

На современном этапе развития строительной отрасли Республики Беларусь требуется непрерывный рост эффективности производства строительных материалов и изделий, снижение трудоемкости и экономических затрат. Одной из задач по совершенствованию строительных конструкций является расширение области применения композитной неметаллической стержневой арматуры (далее композитная арматура) в изгибаемых железобетонных конструкциях. Композитная арматура (англ. FRP Rebar – Fiber Reinforced Polymer Rebar) имеет ряд достоинств по сравнению со стальной: высокое сопротивление растяжению, коррозионную стойкость, устойчивость к воздействиям отдельных видов кислот, щелочей, солей и сернистых газов, диэлектрическую проницаемость, малый удельный вес. Однако следует отметить и ее недостатки: более низкий модуль упругости, хрупкое разрушение при растяжении, низкая огнестойкость [1; 2].

Применение данного вида армирования в изгибаемых железобетонных конструкциях, как правило, приводит к хрупкому разрушению элемента, что ограничивает его применение. Одним из решений названной проблемы является применение комбинированного армирования композитной и стальной арматурой

растянутой зоны железобетонного изгибаемого элемента. Впервые применение такого вида армирования [3] позволило получить пластическую форму разрушения образцов, а в их работе выделить более протяженную стадию пластического деформирования, чем в аналогах с эквивалентным (по предельному растягивающему усилию) стальным армированием.

Дальнейшие исследования в этой области были направлены на применение комбинированного армирования в неразрезных железобетонных балках в растянутой зоне над промежуточной опорой [4; 5].

Целью настоящего исследования является анализ экспериментальных данных и выявление особенностей работы неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой с различным соотношением предельных усилий в композитной и стальной арматуре [4; 5].

**Экспериментальные исследования**

Экспериментальные исследования проводились в испытательной лаборатории учреждения образования «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой» [5].

Программа исследований включала испытания опытных образцов бетонных призм на сжатие для получения фактических значений прочности бетона на осевое сжатие и модуля упругости; опытных стальных стержней на растяжение для получения фактических значений условного предела текучести, предельной прочности при разрыве, модуля упругости и построения диаграммы деформирования стальной арматуры; опытных композитных стержней на основе стеклянных волокон с использованием

стандартных испытательных муфт на растяжение [6] для получения фактических значений предельной прочности, модуля упругости, относительного удлинения при разрыве стержня и построения диаграммы деформирования; неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой с различным соотношением предельных усилий в композитной и стальной арматуре [5; 7].

Характеристики опытных балок представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики опытных балок

Маркировка балок	Размеры поперечного сечения $b \times h$ , мм	Армирование растянутой зоны над промежуточной опорой	Площадь арматурных стержней, мм <sup>2</sup>		Коэффициент армирования, %		$\frac{N_{ult,f}}{N_{ult,s}}$
			$A_s$	$A_f$	$\rho_s$	$\rho_f$	
Б1Э	120x190	2Ø12 S500	226	–	0,99	–	–
Б2Э		2Ø10FRP <sup>1)</sup>	–	133,3	–	0,58	–
Б3		2Ø10 S500, Ø8FRP	157	40	0,69	0,175	0,42
Б4		2Ø8 S500, Ø10FRP	101	66,7	0,44	0,29	1,03
Б5		2Ø6 S500, Ø12FRP	57	94,3	0,25	0,41	3
Б6		2Ø6 S500, 2Ø10FRP	57	133,3	0,25	0,58	4,2

Примечания: <sup>1)</sup> FRP – композитная арматура на основе стеклянных волокон;  $N_{ult,f}$  – предельное растягивающее усилие в композитной арматуре, Н;  $N_{ult,s}$  – предельное растягивающее усилие в стальной арматуре, Н.

**Анализ экспериментальных исследований**

При испытаниях опытных балок была получена картина трещинообразования в зоне над промежуточной опорой и в пролете. Установлено, что образование первых трещин нормального отрыва в растянутой зоне над промежуточной опорой и в пролете во всех опытных балках происходило при внешней нагрузке, равной 10–15 % от разрушающей. Анализ результатов свидетельствует, что при увеличении соотношения предельных усилий в композитной и стальной арматуре комбинированного армирования над промежуточной опорой возрастает длина первых трещин при их образовании, происходит их более интенсивное удлинение и развитие при увеличении внешней нагрузки. Четкой зависимости влияния данного соотношения на количество и шаг трещин в зоне над промежуточной опорой, исходя из результатов эксперимента, не выявлено.

Общий вид зоны над промежуточной опорой и пролете опытных балок после разрушения с отмеченными трещинами представлены в таблице 2.

Разрушение всех опытных балок происходило по растянутой зоне одного из пролетов при достижении стальной арматурой величины растягивающего усилия, соответствующего временному сопротивлению. Характер разрушения всех опытных балок был одинаков. Критическая трещина нормального отрыва образовывалась в левом или правом пролете в зоне действия максимального изгибающего момента под силой, приложенной на расстоянии 1200 мм от оси промежуточной опоры. Предельная внешняя нагрузка всех опытных балок при разрушении соответствовала пролетному изгибающему моменту от 22,23 кНм до 25,97 кНм.

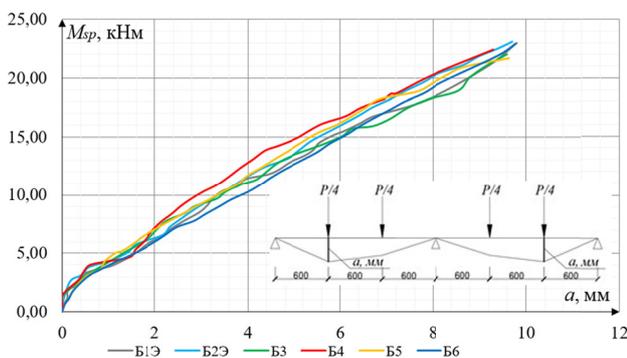


Рисунок 1 – Опытные зависимости «пролетный изгибающий момент – прогиб» для балок

Испытания балок позволили определить особенности их деформирования и построить опытные зависимости «пролетный изгибающий момент – прогиб» (рисунок 1).

На первых этапах нагружения во всех опытных балках отмечалась линейная зависимость увеличения прогибов от приложенной нагрузки (приращение прогибов на каждом этапе нагружения составило в среднем 0,1 мм).

Данная стадия работы продолжалась до образования первых трещин в пролете и над промежуточной опорой. После образования первых трещин в пролете и над промежуточной опорой во всех опытных балках происходило увеличение приращения прогибов на одном этапе нагружения (приращение в среднем составило 0,2 мм). Величина приращения прогибов не зависела от армирования растянутой зоны над промежуточной опорой. Соотношение предельных усилий в композитной и стальной арматуре комбинированного армирования в растянутой зоне над промежуточной опорой не повлияло на деформативность опытных балок в пролете на начальной и конечной стадиях работы, и балка работала аналогично балке с полностью стальным армированием в растянутой зоне над промежуточной опорой.

В результате измерения деформаций в растянутой зоне над промежуточной опорой на уровне центра тяжести растянутой арматуры и в сжатом бетоне на расстоянии 25 мм от нижней грани, были выявлены особенности деформирования рассматриваемой зоны балок и построены зависимости «опорный изгибающий момент – угол поворота» (рисунок 2).

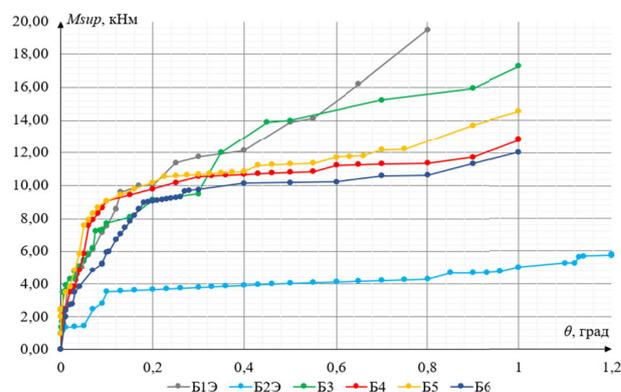
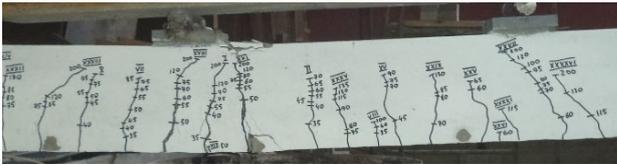
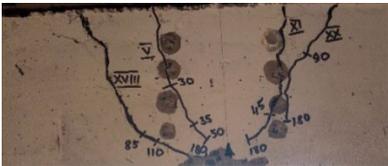
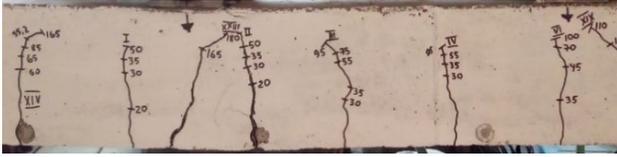
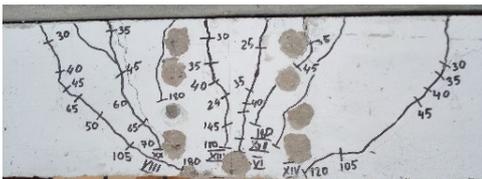
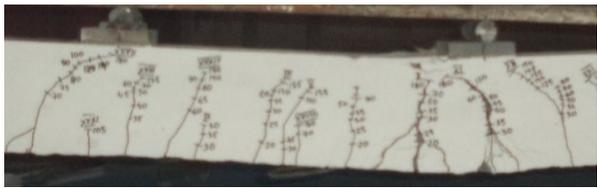
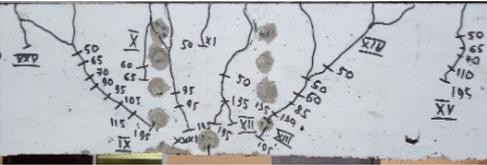
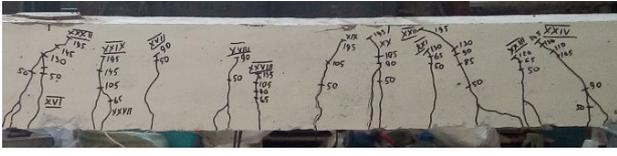
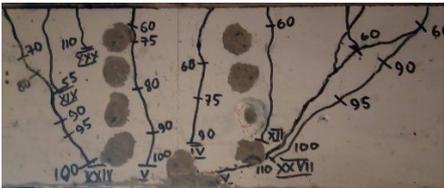
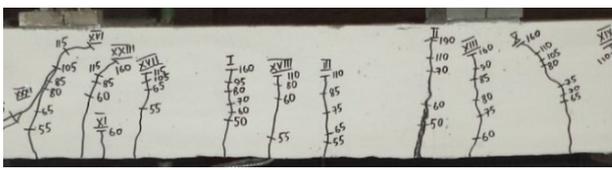
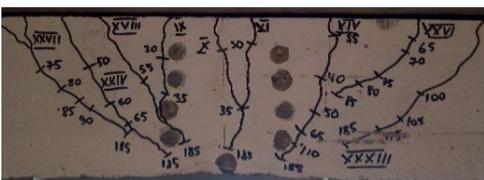
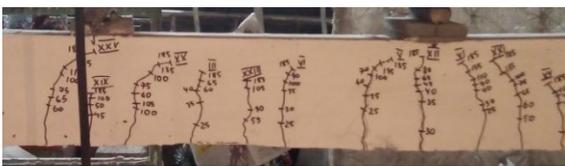


Рисунок 2 – Опытные зависимости «опорный изгибающий момент – угол поворота» для балок

Таблица 2 – Общий вид зоны над промежуточной опорой и пролете опытных балок после разрушения с отмеченными трещинами

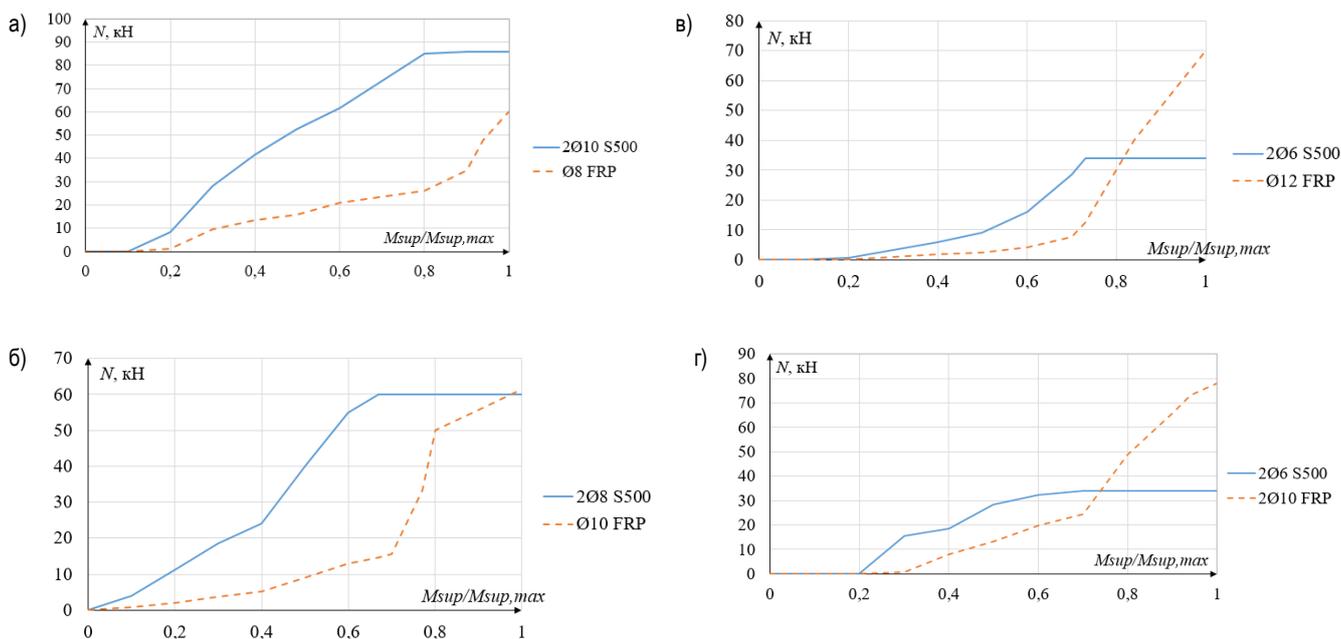
Балка	Опора	Пролет
Б1Э		
Б2Э		
Б3		
Б4		
Б5		
Б6		
Примечание – арабскими цифрами отмечена величина приложенной нагрузки, кН; римскими цифрами отмечены номера трещин.		

На первых этапах нагружения (до образования первых трещин) рост относительных деформаций в сжатой и растянутой зонах над промежуточной опорой происходил прямо пропорционально увеличению опорного изгибающего момента (на одном этапе нагружения в растянутой зоне приращение относительных деформаций составило 0,05 %, в сжатой – 0,01 %). После появления первых трещин отмечен рост относительных деформаций в растянутой и сжатой зонах. Величина приращения относительных деформаций при равном приращении изгибающих моментов зависела от соотношения предельных усилий в композитной и стальной арматуре комбинированного армирования в растянутой зоне над промежуточной опорой и составила в балке Б1Э – 0,11 %, в Б2Э – 0,96 %, в Б3 – 0,11 %, в Б4 – 0,12 %, в Б5 – 0,15 %, в Б6 – 0,17 %.

Следует отметить, что для опытных балок Б3-Б6 выделена стадия работы, при которой рост величины приращения относительных деформаций в растянутой зоне над промежуточной опорой происходил без изменения величины действующего изгибающего момента.

В Б3 данная стадия начиналась при достижении относительных деформаций 2,15 %, в Б4 – 2,11 %, в Б5 – 2,1 %, в Б6 – 2,07 %. Таким образом, чем выше значение соотношения предельных усилий в композитной и стальной арматуре комбинированного армирования в растянутой зоне над промежуточной опорой, тем на более ранних этапах нагружения в этой зоне начинаются пластические деформации. Изменение данного соотношения дает возможность регулировать изгибную жесткость растянутой зоны балок над промежуточной опорой.

В результате определения относительных деформаций (по результатам измерения относительных деформаций растянутой зоны над промежуточной опорой на уровне центра тяжести арматуры) стальных и композитных стержней опытных балок Б3-Б6 были получены графики изменения растягивающих усилий в стальных и композитных стержнях (рисунок 3), которые подтвердили включение в работу композитной арматуры после достижения текучести стальной арматуры.



а) – Б3; б) – Б4; в) – Б5; г) – Б6;

Рисунок 3 – Изменение растягивающих усилий в стальных и композитных стержнях в опытных балках

Анализ графиков (рисунок 3) показал, что до достижения стальной арматурой текучести, растягивающие усилия в композитной арматуре не достигали больших значений: в опытной балке Б3 при начале текучести стальной арматуры усилия в композитной арматуре составили всего 19% от предельного растягивающего усилия, в Б4 – 22%, в Б5 – 11%, Б6 – 17%. После начала текучести стальной арматуры в балках Б4-Б6 на дальнейших этапах нагружения, растягивающие усилия в композитной арматуре начинали более интенсивно возрастать и воспринимать все большую долю внешних растягивающих усилий. В балке Б3 основную долю растягивающих усилий воспринимала стальная арматура, а при достижении текучести стальной арматурой было достигнуто предельное состояние (разрушение в пролете). К моменту разрушения опытных балок растягивающие усилия в композитной арматуре достигли в опытной балке Б3 – 68 % от предельного усилия, в Б4 – 88 %, в Б5 – 52%, в Б6 – 56 %. При этом, растягивающее усилие в композитной арматуре в балке Б3 к моменту разрушения было на 30 % ниже чем в стальной, в Б4 усилия практически выровнялись, в Б5 и Б6 усилие в композитной арматуре превысило усилие в стальной арматуре на 50 % и 56 % соответственно.

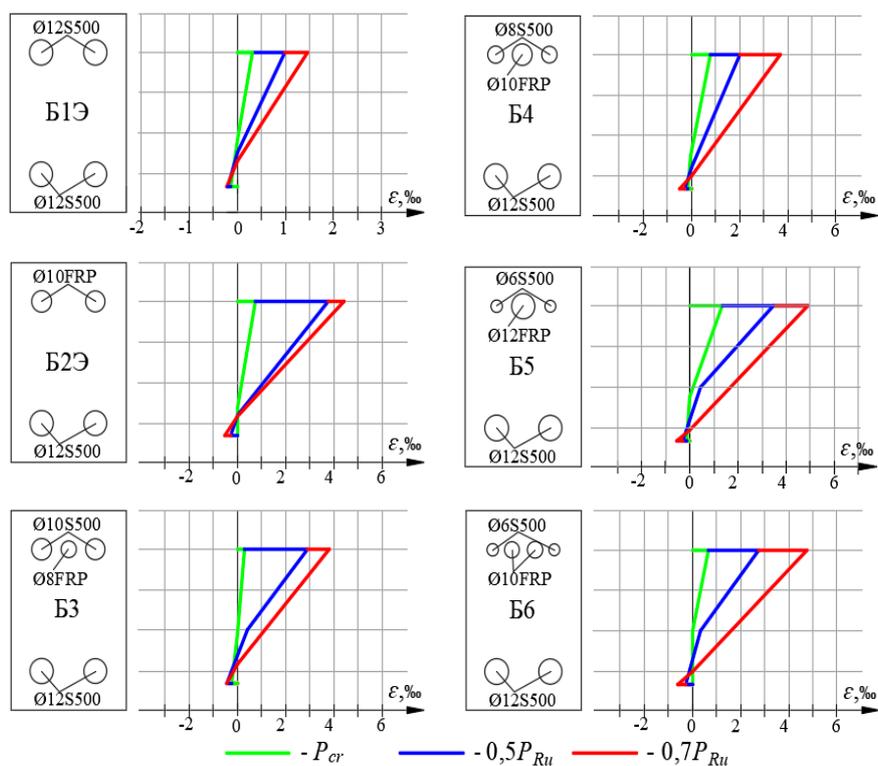
Таким образом, композитная арматура в составе комбинированного армирования над промежуточной опорой оказала «поддерживающий эффект» для стальной арматуры и тем самым продлила пластическую стадию работы всего элемента, что позволило получить дополнительное перераспределение внутренних изгибающих моментов между пролетами и промежуточной опорой опытных балок. Данные результаты совпадают с экспериментальными исследованиями аналогичных разрезных балок пролетом 1800 мм [3, с. 62–63]. Уровень нагружения при начале текучести стальной арматуры и соотношение внутренних усилий в стальных и композитных стержнях при предельной нагрузке представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Уровень нагружения при начале текучести стальной арматуры и соотношение внутренних усилий в стальных и композитных стержнях

Балка	$\frac{N_{ult,f}}{N_{ult,s}}$	Уровень нагружения при начале текучести стальной арматуры, $M_{sup,i}/M_{sup,max}$	Соотношение внутренних усилий в композитных и стальных стержнях при предельной нагрузке, $N_f/N_s$				
			Эксперимент [3, с. 62–63]		Эксперимент [3, с. 62–63]		
			Балка-аналог		Балка-аналог		
Б3	0,42	0,8	И-Б2	0,77	0,71	И-Б2	0,5
Б4	1,03	0,67	И-Б3	0,65	1	И-Б3	1
Б5	3	0,7	И-Б4	0,6	2	И-Б4	1,45
Б6	4,2	0,7	–		2,3	–	

Таким образом, из анализа таблицы 3 и результатов опыта [3, с. 63–63] следует, что композитная арматура эффективна в составе комбинированного армирования в растянутой зоне над промежуточной опорой неразрезных балок при соотношении предельных усилий в композитной и стальной арматуре комбинированного армирования не менее 1. При соотношении ниже 1 не будет наблюдаться «поддерживающий эффект» и основную долю усилий будет воспринимать стальная арматура.

В результате измерения относительных деформаций по высоте поперечного сечения над промежуточной опорой неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой при нагружении внешней нагрузкой были получены эпюры средних относительных деформаций (рисунок 4).



$P_{cr}$  – внешняя нагрузка, соответствующая моменту трещинообразования;  $P_{Ru}$  – предельная внешняя нагрузка

**Рисунок 4** – Эпюры средних относительных деформаций по высоте поперечного сечения над промежуточной опорой

Анализ эпюр на рисунке 4 позволил определить смещение положения нейтральной оси, которое характеризовало напряженно-деформируемое состояние опытных балок при изгибе. Относительные деформации по высоте балок в зоне над промежуточной опорой в зависимости от величины приложенной нагрузки имели практически линейное распределение, что подтвердило гипотезу плоских сечений для осредненных деформаций опытных неразрезных балок.

Экспериментальные исследования позволили определить механизм деформирования, трещинообразования, перераспределения усилий и разрушения неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием композитной и стальной арматурой растянутой зоны над промежуточной опорой.

В работе опытных балок выделены следующие основные этапы:

– 1-й этап: работа системы без трещин. Увеличение изгибающих моментов над промежуточной опорой и в пролете проходит равномерно, практически линейно. Этап продолжается до достижения значений изгибающего момента, соответствующих образованию трещин в растянутой зоне над промежуточной опорой или в пролете;

– 2-й этап: работа системы после образования трещин. После образования первых трещин при последующем нагружении увеличение опорного изгибающего момента замедляется, при этом развитие пролетного момента практически не изменяется. Этап продолжается до достижения стальной арматурой в растянутой зоне над промежуточной опорой неупругих деформаций;

– 3-й этап характеризуется работой системы с зонами, в которых стальная арматура достигла неупругих деформаций (образование пластического шарнира). После образования пластического шарнира в растянутой зоне над промежуточной опорой (достижение текучести стальной арматуры в составе комбинированного армирования) происходит перераспределение усилий между пролетами и промежуточной опорой, увеличение пролетного изгибающего момента и замедление увеличения опорного изгибающего момента. Дальнейшее восприятие внешней нагрузки происходит при наличии

пластических деформаций в растянутой стальной арматуре и «поддерживающего эффекта» композитной арматуры в растянутой зоне над промежуточной опорой за счет роста изгибающего момента в пролете. Данный этап заканчивается исчерпанием несущей способности системы.

Соотношение предельных усилий в композитной и стальной арматуре комбинированного армирования растянутой зоны над промежуточной опорой влияет на характер работы опытных балок под нагрузкой. При минимальном соотношении (0,42 и менее) предельных усилий в композитной и стальной арматуре перераспределение усилий между пролетами и промежуточной опорой происходит как в балке, армированной полностью стальными стержнями. В опытных балках с максимальным соотношением (1 и более) перераспределение усилий начинается при нагрузке, соответствующей 50 % и менее от разрушающей.

#### Заключение

Экспериментально установлены особенности работы и схемы разрушения неразрезных двухпролетных железобетонных балок с различным соотношением предельных растягивающих усилий в композитной и стальной арматуре комбинированного армирования растянутой зоны над промежуточной опорой. Установлено, что дополнительная внешняя нагрузка в предельном состоянии при текучести стальной арматуры и последующее дополнительное перераспределение усилий между пролетами и промежуточной опорой достигается при применении комбинированного армирования с соотношением предельных усилий в композитной и стальной арматуре в составе комбинированного армирования не менее 1.

Экспериментально подтверждена справедливость гипотезы плоских сечений для осредненных деформаций по высоте зоны над промежуточной опорой неразрезных двухпролетных балок с комбинированным армированием композитной и стальной арматурой в растянутой зоне над промежуточной опорой.

**Список цитированных источников**

1. Лешкевич, О. Н. Перспективы применения композитной арматуры / О. Н. Лешкевич // Проблемы современного бетона и железобетона : материалы III международного симпозиума (Минск, 9–11 ноября 2011 г.) : в 2 т. / редкол.: М. Ф. Марковский (гл. ред.) [и др.]. – Т. 1: Бетонные и железобетонные конструкции. – С. 262–268.
2. Коррозионная стойкость стеклянного волокна и стеклопластиковой арматуры для бетона / Ю. В. Кондратьева [и др.] // Стр-во и архитектура Белоруссии. – 1972. – № 2. – С. 39–40.
3. Тур, В. В. Экспериментальные исследования изгибаемых бетонных элементов с комбинированным армированием стальными и стеклопластиковыми стержнями / В. В. Тур, В. В. Мalyха // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия F Строительство. Прикладные науки. – 2013. – № 8. – С. 58–65.
4. Гиль, А. И. Методика экспериментальных исследований неразрезных железобетонных балок с гибридным армированием растянутой зоны центрального опорного сечения / А. И. Гиль, Е. Д. Лазовский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2019. – № 16. – С. 59–64.
5. Гиль, А. И. Результаты экспериментальных исследований сопротивления изгибу статически неопределимых железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны опорного сечения / А. И. Гиль // Вестн. Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2021. – № 16. – С. 58–64.
6. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения физико-механических характеристик: (ГОСТ 32492-2015). – М. : Стандартинформ, 2016. – 19 с.
7. Гиль, А. И. Экспериментальное исследование механических свойств стеклопластиковой арматуры / А. И. Гиль, Е. Д. Лазовский // Проблемы современного бетона и железобетона. – 2017. – № 9. – С. 168–182.

**References**

1. Leshkevich, O. N. Perspektivy primeneniya kompozitnoj armatury / O. N. Leshkevich // Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona: materialy III mezhdunarodnogo simpoziuma (Minsk, 9–11 noyabrya 2011 g.) : v 2 t. / redkol.: M. F. Markovskij (gl. red.) [i dr.]. – T. 1: Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. – S. 262–268.
2. Korrozionnaya stojkost' steklyannogo volokna i stekloplastikovej armatury dlya betona / YU. V. Kondrat'eva [i dr.] // Str-vo i arhitektura Belorussii. – 1972. – № 2. – S. 39–40.
3. Tur, V. V. Eksperimental'nye issledovaniya izgibaemykh betonnykh elementov s kombinirovannym armirovaniem stal'nymi i stekloplastikovymi sterzhnyami / V. V. Tur, V. V. Malyha // Vestnik Polockogo gos. un-ta. Seriya F Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. – 2013. – № 8. – S. 58–65.
4. Gil', A. I. Metodika eksperimental'nykh issledovaniy nerazreznykh zhelezobetonnykh balok s gibridnym armirovaniem rastyanutoj zony central'nogo opornogo secheniya / A. I. Gil', E. D. Lazovskij // Vestn. Poloc. gos. un-ta. Ser. F, Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. – 2019. – № 16. – S. 59–64.
5. Gil', A. I. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy soprotivleniya izgibu staticheski neopredelimykh zhelezobetonnykh balok s kombinirovannym armirovaniem rastyanutoj zony opornogo secheniya / A. I. Gil' // Vestn. Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. – 2021. – № 16. – S. 58–64.
6. Armatura kompozitnaya polimernaya dlya armirovaniya betonnykh konstrukcij. Metody opredeleniya fiziko-mekhanicheskikh harakteristik: (GOST 32492-2015). – M. : Standartinform, 2016. – 19 s.
7. Gil', A. I. Eksperimental'noe issledovanie mekhanicheskikh svojstv stekloplastikovej armatury / A. I. Gil', E. D. Lazovskij // Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona. – 2017. – № 9. – S. 168–182.

*Материал поступил 11.04.2023, одобрен 18.04.2023, принят к публикации 18.04.2023*