

УДК 624.072.232

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗГИБУ
СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК
С КОМБИНИРОВАННЫМ АРМИРОВАНИЕМ РАСТЯНУТОЙ ЗОНЫ ОПОРНОГО СЕЧЕНИЯ****А.И. ГИЛЬ***(Полоцкий государственный университет)*ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5627-1438>

В материале статьи приведены результаты верификационных экспериментальных исследований сопротивления изгибу двухпролетных статически неопределимых железобетонных балок с различными вариантами комбинированного армирования металлическими и композитными (на основе стеклянного волокна) стержнями растянутой зоны центрального опорного сечения. Была разработана методика проведения экспериментальных верификационных исследований, изготовлены и испытаны опытные образцы двухпролетных статически неопределимых железобетонных балок. Экспериментально установлено, что наиболее эффективное применение комбинированного армирования в рассматриваемых балках достигается при количестве композитного составляющего армирования не менее 20% к общему количеству стержневой арматуры в растянутой зоне сечения. Определены максимальные углы поворота экспериментальных образцов балок, которые не превышают предельно допустимых значений.

Ключевые слова: *стеклопластиковая стержневая арматура, металлическая арматура, угол поворота, трещинообразование, перераспределение моментов.*

Введение. Современная строительная отрасль в Республике Беларусь требует непрерывного роста эффективности производства строительных изделий, снижения экономических затрат, применения новых материалов, конструкций и конструктивных систем. Одним из таких материалов является композитная неметаллическая арматура на основе различных высокопрочных волокон (стекло, базальт, арамид, углерод). Данная арматура имеет ряд положительных физико-механических характеристик по сравнению с металлическим аналогом: не подвержена коррозии, устойчива к воздействиям отдельных видов кислот, щелочей, солей и сернистых газов, является диэлектриком, имеет малый удельный вес. Однако, наряду с преимуществами, у нее имеются и отрицательные свойства, а именно: низкий модуль упругости и низкая огнестойкость [1; 2].

Одним из решений расширения области применения композитной стержневой арматуры в железобетонных элементах является применение комбинированного армирования – введение в растянутую зону, армированную неметаллическими композитными стержнями, изгибаемого железобетонного элемента некоторого количества металлической стержневой арматуры. Согласно экспериментальным исследованиям [3], при применении такого вида армирования в растянутой зоне изгибаемых железобетонных балок была получена пластическая форма разрушения образцов, а в их работе выделялась более протяженная стадия пластического деформирования, чем в аналогах с эквивалентным (по предельному растягивающему усилию) металлическим армированием.

Результаты исследований [3] позволили эффективно применить неметаллическую композитную стержневую арматуру в изгибаемых железобетонных элементах без предварительного напряжения и предположить, что комбинированное армирование может иметь наиболее полезный эффект при применении в растянутой зоне сечений на промежуточных опорах статически неопределимых железобетонных балок, где за счет более протяженной стадии пластического деформирования будет происходить более рациональное перераспределение усилий между пролетными и опорными зонами элемента.

Целью исследования являлось получение опытных схем разрушения экспериментальных образцов балок, общей картины трещинообразования в опорных и пролетных сечениях балок, зависимостей «опорный изгибающий момент – угол поворота опорного сечения», характера распределения изгибающих моментов в опорном и пролетных сечениях на различных стадиях загрузки, влияния соотношения композитного и металлического армирования в растянутой зоне опорного сечения на перераспределение внутренних изгибающих моментов, изменения усилий в стержнях металлической и композитной арматуры, параметров напряженно-деформированного состояния образцов балок.

Применение неметаллической композитной стержневой арматуры без предварительного напряжения в составе комбинированного армирования растянутой зоны сечений на опорах изгибаемых статически неопределимых железобетонных балок значительно расширит область применения данного вида армирования и позволит более рационально использовать ее физико-механические характеристики.

Программа экспериментальных исследований. Для получения новых экспериментальных данных по характеру работы изгибаемых статически неопределимых железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны опорного сечения балки при загрузке была разработана программа верификационных экспериментальных исследований, включающая проектирование опытных образцов балок, технологию изготовления и испытания.

Были изготовлены и испытаны 4 опытных образца в виде балок прямоугольного поперечного сечения шириной (b) 120 мм, высотой (h) 190 мм, длиной (l) 4000 мм с различным соотношением металлического и композитного стержневого армирования в растянутой зоне и 2 эталонных образца с полностью металлическим и композитным армированием растянутой зоны опорного сечения соответственно. Характеристики опытных образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Характеристики опытных образцов балок

Обозначения балок	Длина l , мм	Размеры поперечного сечения $b \times h$, мм	Армирование растянутой зоны опорного сечения
БЭ1	4000	120x190	2Ø12 S500
БЭ2			2Ø10FRP1100 ¹⁾
Б3			2Ø10 S500, Ø8GFRP
Б4			2Ø8 S500, Ø10GFRP
Б5			2Ø6 S500, Ø12GFRP
Б6			2Ø6 S500, 2ØG10FRP

Опытные образцы балок были испытаны как двухпролетные неразрезные, загруженные четырьмя сосредоточенными силами, расположенными симметрично относительно центральной опоры на расстоянии 600 мм и 1200 мм соответственно [4].

Трещиностойкость опытных образцов. Момент трещинообразования опытных образцов определялся визуально. Первые трещины нормального отрыва в образцах балок Б1Э, Б3, Б4 появились в растянутой зоне центрального опорного сечения. В образцах балок Б6 и Б2Э трещины образовались одновременно в опорном и пролетных сечениях. В образце балки Б5 первые трещины образовались в пролетном сечении в зоне действия максимального изгибающего момента. Образование опорных трещин нормального отрыва для образцов Б1Э, Б2Э, Б3, Б6 происходило при внешней нагрузке равной 0,1–0,15 от разрушающей. Для образцов Б4, Б5 трещины появились при нагрузке 0,24 от разрушающей. Приложенная нагрузка при образовании трещин в рассматриваемых пролетных и опорных сечениях соответствовала значениям изгибающих моментов трещинообразования. При дальнейшем увеличении нагрузки (в пределах на 0,05 от разрушающей) трещины нормального отрыва образовывались в пролетных сечениях образцов балок Б1Э, Б3, Б4 и в центральном опорном сечении балки Б5.

Длина первых трещин опорного сечения в эталонном образце Б1Э была минимальной, едва доходила до центра тяжести растянутой арматуры и составляла 25 мм. Первые трещины во втором эталонном образце Б2Э после образования сразу достигали половины высоты сечения балки, их длина составила 90 мм. В опытных образцах длина первых трещин в опорном сечении составила соответственно в Б3 – 36 мм, Б4 – 50 мм, Б5 – 60 мм, Б6 – 50 мм. На следующем этапе загрузки (при увеличении нагрузки на 0,025 от разрушающей) происходило значительное увеличение длины трещин в опытных образцах и составляло уже в Б3 – 100 мм, Б4 – 100 мм, Б5 – 120 мм, Б6 – 100 мм, причем при появлении новых трещин их длина сразу составляла порядка 100 мм.

Для образца балки Б1Э увеличение длины трещины было схожим по характеру с отмеченным в опытных балках Б3–Б6: после образования трещины на последующих этапах загрузки ее длина достигала порядка 100 мм. Дальнейшее удлинение трещин происходило равномерно и незначительно, пока не была достигнута сжатая зона бетона.

Характер удлинения трещин для образца балки Б2Э отличался от остальных образцов. На этапе загрузки, следующим непосредственно после момента трещинообразования, длина трещин сразу достигла сжатой зоны бетона и составила 150 мм.

Расстояние между первыми трещинами в центральной опорной зоне составляло для эталонного образца Б1Э 50–80 мм; последующие трещины образовывались на расстоянии 80 мм друг от друга, что соответствовало шагу поперечной арматуры. Всего при испытании в центральной опорной зоне образовалось 9 трещин.

Во втором эталонном образце расстояние между первыми трещинами составило 160 мм, последующими – 80 и 60 мм. Следует отметить, что в зоне центрального опорного сечения отсутствовала ярко выраженная центральная трещина, а всего образовалось 4 трещины.

Расстояние между трещинами в центральной опорной зоне для опытных образцов Б3–Б6 было близким и составляло 100–150 мм. В образце балки Б3 было образовано 8 трещин, в Б4 – 6, в Б5 – 6, в Б6 – 8. Следует отметить, что при нагрузке, близкой к разрушающей, в опытных образцах образовались новые трещины длиной до 50 мм, которые после образования не развивались; это же было отмечено и в образце Б1Э.

Образование и развитие трещин в пролетных сечениях для балок Б1Э, Б3–Б6 происходило практически одинаково: трещины образовывались в зоне действия максимального изгибающего момента при нагрузке, соответствующей моменту трещинообразования; при достижении в сечениях данного момента образовались последующие трещины. Расстояние между трещинами составило 80–100 мм, в одном пролете образовалось от 12 до 15 трещин. В эталонной балке Б2Э образовалось значительно меньше пролетных трещин нормального отрыва (в одном пролете количество трещин составило 8, во втором – 11, расстояние между ними варьировалось от 80 до 160 мм).

Критические трещины нормального отрыва образовались в пролетном сечении в зоне действия максимального изгибающего момента, при дальнейшем увеличении внешней нагрузки трещины раскрывались, достигали сжатой зоны бетона.

Карта трещин по длине всего образца представлена на рисунке 1.

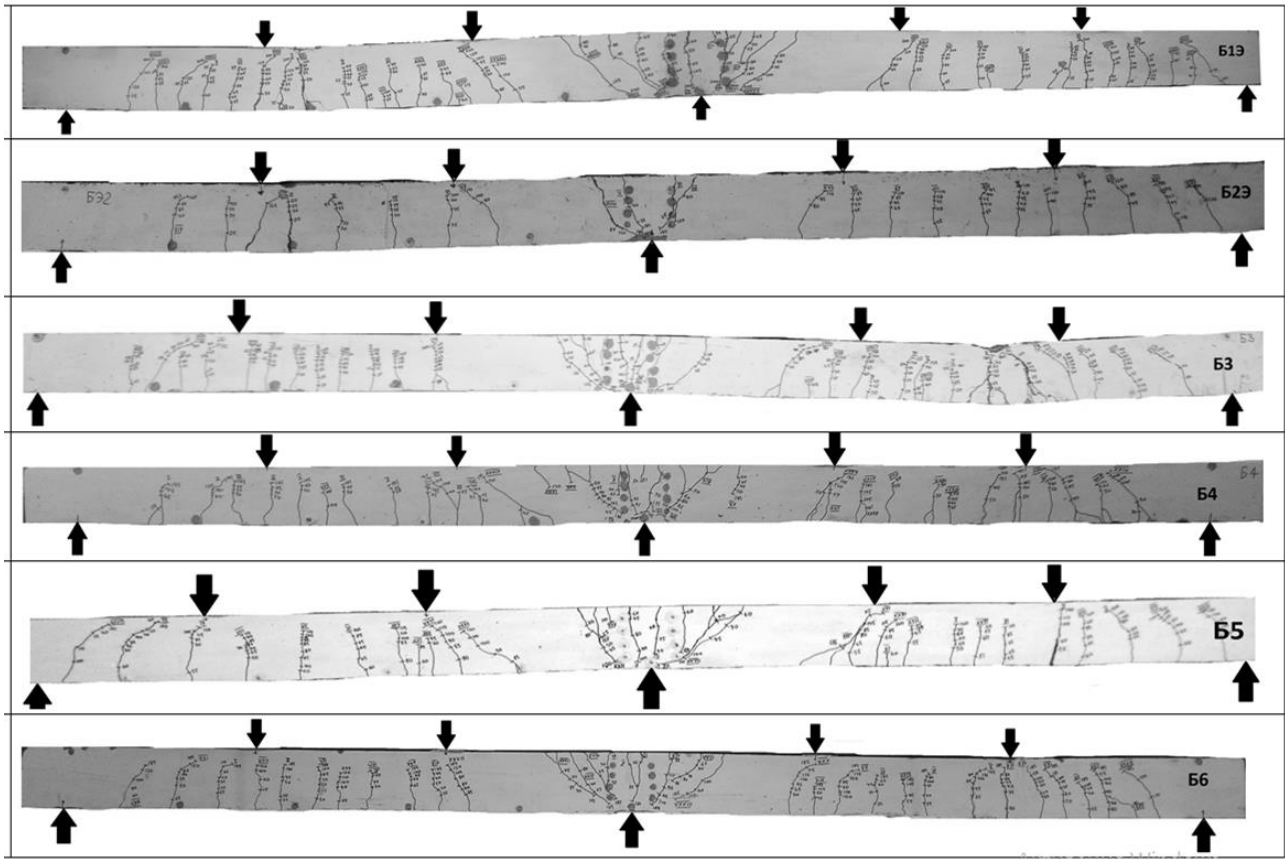


Рисунок 1. – Карта трещин опытных образцов балок

Деформативность и прочность образцов балок. В результате измерения прогибов от приложенной нагрузки в центре пролета исследуемых образцов балок были получены экспериментальные зависимости «нагрузка – прогиб» (рисунок 2).

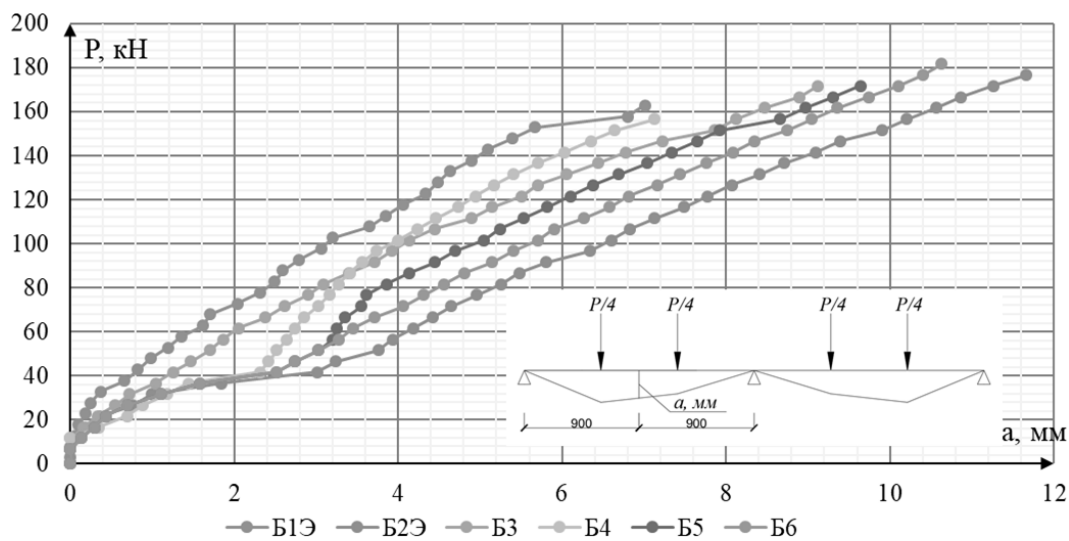


Рисунок 2. – Зависимости «нагрузка – прогиб»

На первых этапах загрузки во всех образцах балок отмечается линейная зависимость прогибов от нагрузки, данная стадия работы продолжается вплоть до образования первых трещин в пролетном сечении.

После образования первых трещин в балках Б2Э, Б4–Б6 отчетливо выделяется зона пластического деформирования, происходит резкое возрастание прогибов без существенного увеличения нагрузки. Этого эффекта не наблюдается в эталонной балке Б1Э и опытном образце Б3, что объясняется полностью металлическим армированием и максимальным количеством металлического составляющего в составе комбинированного армирования, и при образовании трещин нормального отрыва арматура в силу малых деформаций предопределяет раскрытие и развитие нормальных трещин в опорном сечении и перераспределение внутренних усилий не происходит.

На этапе загрузки, соответствующем моменту трещинообразования и первому перераспределению усилий между опорными и пролетными сечениями за счет первичного раскрытия трещин (резкий рост прогиба в пролетном сечении), количество композитного составляющего комбинированного армирования влияет на деформативность пролетного сечения. Таким образом, количество композитного составляющего менее 20% к площади комбинированного армирования не будет иметь существенного влияния на деформативность пролетного сечения, и элемент будет работать аналогично элементу с полностью металлическим армированием растянутой зоны опорного сечения.

После первого перераспределения усилий прогибы в пролетном сечении продолжают развиваться практически линейно. Максимальный прогиб в центре пролетного сечения при нагрузке, соответствующей разрушающей, зафиксирован в эталонном образце балки Б2Э, минимальный – в образце балки Б1Э. Это объясняется тем, что в балке Б2Э за счет быстрого раскрытия трещин в центральном опорном сечении и раннего перераспределения усилий между опорными и пролетными сечениями происходило более интенсивное раскрытие пролетных трещин и развитие деформаций растянутой пролетной арматуры. В эталонном образце Б1Э пластичность в опорном сечении не была достигнута и не был полностью использован потенциал пластического деформирования сечения, за счет этого развитие деформаций в пролетном и опорном сечении происходило более равномерно. Опытные образцы балок Б3–Б6 при нагрузке, соответствующей разрушающей, имели практически одинаковый прогиб, который составил 7–10 мм. Следует отметить, что при нагрузке 0,5 и 0,9 от разрушающей, все экспериментальные образцы показали схожие по величине прогибы в центре пролетного сечения и составили соответственно 4–6 мм и 7–9 мм.

Анализ зависимостей на рисунке 2 позволяет сделать вывод, что комбинированное армирование растянутой зоны промежуточного сечения повлияет на деформативность пролетных сечений на этапах загрузки, соответствующих моменту трещинообразования, при этом на глобальную деформативность конструкции при дальнейшем загрузке не окажет существенного влияния (таблица 2).

Таблица 2. – Результаты испытаний образцов балок

Балка	Параметры трещинообразования		Прогибы, мм			Предельные изгибающие моменты	
	$M_{cr, sup}$, кНм	$M_{cr, sp}$, кНм	$a_{0,5}$	a_{sf}	$a_{0,9}$	$M_{Ru, sup}$, кНм	$M_{Ru, sp}$, кНм
Б1Э	3,67	4,46	3,95	–	7,17	19,48	23,93
Б2Э	2,82	2,77	6,6	–	8,56	5,80	26,06
Б3	2,45	2,55	4,14	3,71	8,47	17,27	22,23
Б4	3,65	6,52	4	4,46	7,83	12,81	25,97
Б5	7,95	5,21	5,05	5,05	8,97	14,54	24,92
Б6	3,47	3,07	5,71	5,15	9,36	12,07	24,72

Примечание. M_{cr} , M_{Ru} – соответственно момент трещинообразования и предельный момент в пролетном либо опорном сечении; $a_{0,5}$, a_{sf} , $a_{0,9}$ – соответственно прогибы от нагрузки: 0,5 от разрушающей нагрузки; соответствующей началу текучести стальной арматуры в составе комбинированного армирования и 0,9 от предельной.

Экспериментальная зависимость «изгибающий момент – угол поворота» для центрального опорного сечения. В результате измерения углов поворота центрального опорного сечения при загрузке внешней нагрузкой опытных образцов балок были получены экспериментальные зависимости «опорный изгибающий момент – угол поворота» (рисунок 3).

Анализ графиков зависимостей на рисунке 3 показывает, что при достаточно близком значении предельного опорного изгибающего момента, соответствующего максимальной приложенной нагрузке для всех балок (за исключением образца балки Б1Э), опытные образцы Б3–Б6 имели более протяженную ветвь пластического деформирования, чем образец Б1Э с полностью металлическим армированием. Это говорит об эффективности применения комбинированного армирования в растянутой зоне промежуточной опоры, с помощью которого будет достигнуто более рациональное перераспределение моментов.

На зависимостях рисунка 3 можно выделить характерные стадии работы центрального опорного участка образцов с комбинированным армированием растянутой зоны на всех этапах загрузки. На первом этапе работы

до появления первых трещин нормального отрыва наблюдается линейная зависимость угла поворота от величины опорного изгибающего момента, увеличение происходит незначительно. Первый этап завершается при появлении первых трещин и начале их развития, на графике появляется небольшой скачок увеличения угла поворота. Далее идет равномерное раскрытие трещин и удлинение составляющих комбинированной арматуры, на графике эта стадия представлена практически линейным участком.

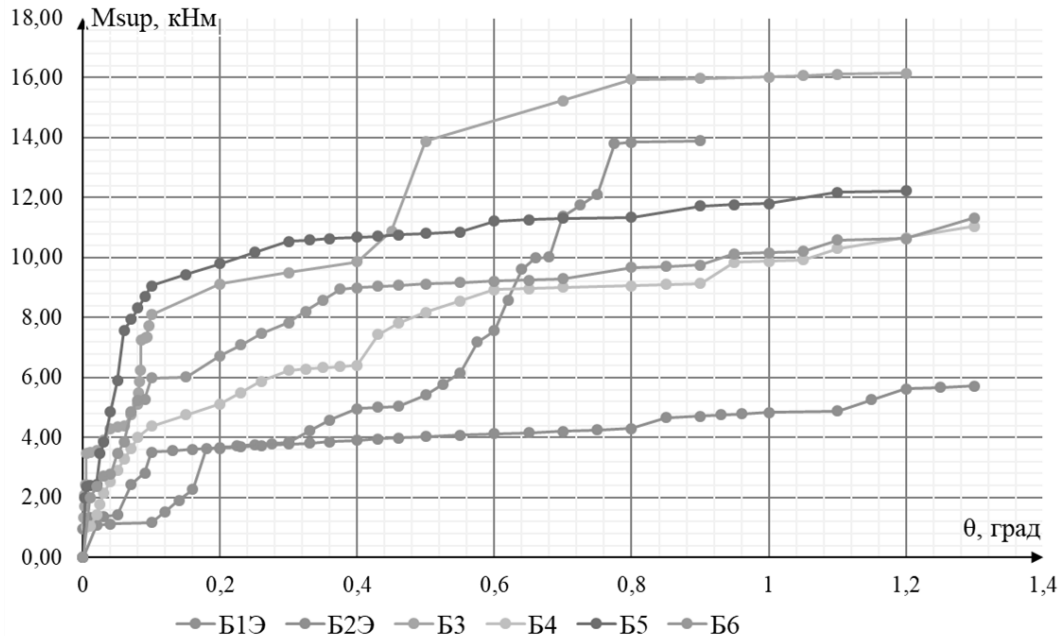


Рисунок 3. – Зависимости «изгибающий момент – угол поворота» для центрального опорного сечения

При дальнейшем нагружении происходит резкое изменение угла наклона кривой зависимости «опорный изгибающий момент – угол поворота» к горизонтальной оси, что свидетельствует об изменении изгибной жесткости элемента. В этот момент в образцах балок Б3–Б6 стальная составляющая комбинированного армирования достигает предела текучести, и начинается стадия пластического деформирования.

Следует отметить, что на кривой зависимости «опорный изгибающий момент – угол поворота» для образца балки Б1Э не наблюдается резкого увеличения угла наклона, что подтверждает недостижение предела текучести стальной арматуры. В образце балки Б2Э также выделяются стадии работы без трещин, образование и развитие трещин, пластическое деформирование, однако следует отметить, что пластические деформации начались уже на начальных этапах нагружения и характеризовались ранним развитием больших углов поворота.

В опытных образцах балок Б3–Б6 после достижения текучести стальной составляющей происходило активное включение в работу композитных стержней, и начиналось перераспределение растягивающих усилий между ними; при этом, растянутая зона центрального опорного сечения имела достаточный потенциал пластического деформирования. Это обуславливалось тем, что композитные стержни при достижении больших деформаций в сечении начали воспринимать все большие растягивающие усилия, которые возрастали прямо пропорционально приложенной нагрузке. На этом этапе композитная составляющая оказывала «поддерживающий» эффект стальным стержням и не позволяла достичь ей предельных растягивающих усилий, что в целом для растянутой зоны опорного сечения выразилось в повышении пластической деформативности.

Полученные зависимости (см. рисунок 3) показывают, что пластичность растянутой зоны центрального опорного сечения зависит от соотношения композитного и металлического составляющего комбинированного армирования, что в дальнейшем позволит задавать параметры пластического шарнира в рассматриваемом сечении.

Анализ результатов экспериментальных исследований. Результаты экспериментальных исследований позволили определить механизм деформирования, трещинообразования, перераспределения усилий и разрушения в опытных образцах.

В работе исследуемых образцов балок можно выделить несколько основных этапов:

– 1-ый этап: работа системы без образования трещин, соответствующая работе при малых нагрузках. Увеличение изгибающих моментов в сечении на центральной опоре и в пролете проходит равномерно, практически линейно. Этап продолжается до достижения значений изгибающего момента, соответствующих трещинообразованию в опорном или пролетном сечении;

– 2-ой этап: работа системы после образования трещин. В процессе нагружения образцов балок первые нормальные трещины, как правило, образуются в растянутой зоне центрального опорного сечения в зоне действия максимального изгибающего момента, а затем (либо практически одновременно) – в пролетном сечении в зоне

максимального изгиба под крайней сосредоточенной силой. После образования первых трещин при последующем нагружении увеличение опорного изгибающего момента замедляется, при этом развитие пролетного момента практически не изменяется;

– 3-ий этап характеризуется работой системы с сечениями, в которых комбинированная арматура достигла неупругих деформаций (образование пластического шарнира). В процессе и после образования над центральной опорой пластического шарнира, образование которого обусловлено достижением текучести стальной составляющей комбинированного армирования, происходит перераспределение усилий с увеличением пролетного момента и замедлением возрастания опорного момента, что отчетливо наблюдается в образцах балок Б4–Б6. Данный этап заканчивается исчерпанием несущей способности системы.

В ходе экспериментальных исследований были получены значения предельных углов пластического поворота центрального опорного сечения, а также соотношения высоты сжатой зоны бетона после перераспределения усилий (x_u) к рабочей высоте опорного сечения (d). Полученные значения углов поворота и соотношения (x_u/d) сравнивались с установленными допускаемыми значениями по [5] (рисунок 4). Превышения предельных значений угла пластического поворота в опытных образцах балок не происходило.

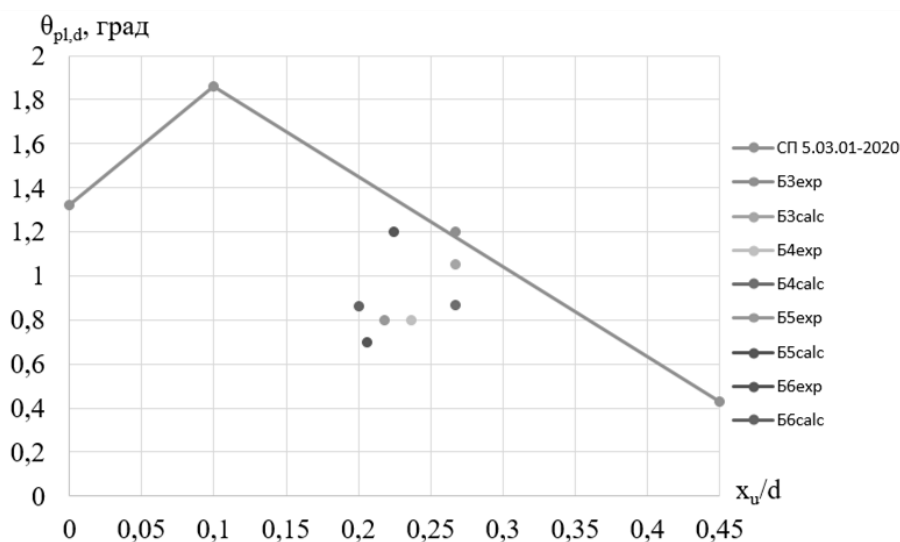


Рисунок 4. – Предельные значения углов пластического поворота центрального опорного сечения опытных образцов балок

Заключение. В результате экспериментальных исследований были получены схемы разрушения статически неопределимых двухпролетных железобетонных балок с различной степенью комбинированного армирования растянутой зоны центрального опорного сечения. Установлено, что наиболее эффективное применение комбинированного армирования достигается при количестве композитного составляющего комбинированного армирования более 20%.

Экспериментально получены зависимости «опорный изгибающий момент – угол поворота» для опытных образцов, определены максимальные углы поворота экспериментальных образцов балок, которые можно использовать в дальнейших исследованиях.

Применение неметаллической композитной стержневой арматуры без предварительного напряжения в составе комбинированного армирования растянутой зоны сечений на опорах изгибаемых статически неопределимых железобетонных балок в значительной степени расширит область применения данного вида армирования, а также позволит более рационально использовать ее физико-механические характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зак, А.Ф. Физико-химические свойства стеклянного волокна / А.Ф. Зак. – М. : Ростехиздат, 1962. – 224 с.
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. Малыха // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. 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. Ф, Стр-во. Прикладные науки. – 2019. – № 16. – С. 59–64.
5. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020 : утв. М-вом архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь 16.09.2020. – Минск, 2020. – 236 с.

Поступила 20.10.2021

**RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF BENDING RESISTANCE
OF STATICALLY INDETERMINATE REINFORCED CONCRETE BEAMS
WITH COMBINED REINFORCEMENT OF THE STRETCHED ZONE OF THE SUPPORT SECTION**

A. HIL

The article presents the results of verification experimental studies of the bending resistance of two-span statically indeterminate reinforced concrete beams with various variants of combined reinforcement with metal and composite (based on glass fiber) rods of the stretched zone of the central support section. A methodology for conducting experimental verification studies was developed, prototypes of two-span statically indeterminate reinforced concrete beams were manufactured and tested. It has been experimentally established that the most effective use of combined reinforcement in the beams under consideration is achieved when the amount of composite component reinforcement is at least 20% of the total number of rod reinforcement in the stretched cross-section zone. The maximum rotation angles of experimental samples of beams that do not exceed the maximum permissible values are determined.

Keywords: *fiberglass rod reinforcement, metal reinforcement, angle of rotation, cracking, redistribution of moments.*