

УДК 624.042.12

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ
ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ,
УСИЛЕННЫХ В ЗОНЕ СРЕЗА УСТАНОВКОЙ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ АРМАТУРЫ**

Е.Д. ЛАЗОВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)

Представлены результаты экспериментально-теоретических исследований прочности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза установкой дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры. Выполнено сопоставление результатов эксперимента с данными, полученными в результате расчета по предлагаемой разработанной автором методике, основанной на положениях общей деформационной модели и положениях модифицированной теории полей сжатия.

Для получения новых опытных данных о характере работы усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов и проверки предлагаемой методики расчета [1; 2] были проведены экспериментально-теоретические исследования, включающие испытание опытных балок, усиленных в зоне среза установкой дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры, в том числе под нагрузкой.

Методика испытания. Исследования проводились на опытных образцах в виде балок прямоугольного поперечного сечения 175 мм (b) $\times$ 400 мм (h) длиной 3 м, усиленных под нагрузкой, и в ненагруженном состоянии. В качестве варьируемых факторов при проведении эксперимента были выбраны пролет среза (варьировался от $1,5d$ до $2,5d$) и степень нагружения опытных балок при усилении (от начального уровня, определяемого их собственным весом и весом испытательного оборудования, до значения нагрузки, составляющей 71 % от разрушающей).

В ходе экспериментальных исследований всего было испытано три серии балок, по 3 балки в каждой серии. Первые балки в каждой из серий испытывались при различных пролетах без усиления в качестве эталонных. Вторые и третьи балки – с усилением их при начальном напряженном состоянии и под нагрузкой.

Испытание опытных балок I серии проводилось с пролетом среза $1,5d$, II серии – $2d$, III серии – $2,5d$. В качестве метода усиления опытных балок был выбран метод установки дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры.

Фактические размеры поперечного сечения опытных балок, характеристики поперечного армирования до и после усиления, а также пролеты среза и степень нагружения опытных балок при усилении приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики опытных балок

Серия	Шифр балки	Размеры поперечного сечения до усиления, мм	Поперечное армирование до усиления, шаг	Дополнительная поперечная арматура, шаг	Предварительное напряжение дополнительной поперечной арматуры, МПа	Нагрузка при усилении	Пролет среза
I	Б-I-1	175 $\times$ 401	2 $\varnothing$ 6,5 S240, $s = 150$	–	–	–	1,5d
	Б-I-2	176 $\times$ 400		1 $\varnothing$ 12 S240, $s_{ad} = 150$	97,2 МПа	$V = 0$	
	Б-I-3	176 $\times$ 400		1 $\varnothing$ 12 S240, $s_{ad} = 150$	114,3 МПа	$V = 0,71V_R$	
II	Б-II-1	176 $\times$ 399		–	–	–	2d
	Б-II-2	176 $\times$ 400		1 $\varnothing$ 12 S240, $s_{ad} = 150$	98,1 МПа	$V = 0$	
	Б-II-3	175 $\times$ 399		1 $\varnothing$ 12 S240, $s_{ad} = 150$	98,5 МПа	$V = 0,57V_R$	
III	Б-III-1	176 $\times$ 402		–	–	–	2,5d
	Б-III-2	176 $\times$ 400		1 $\varnothing$ 12 S240, $s_{ad} = 150$	96,5 МПа	$V = 0$	
	Б-III-3	174 $\times$ 401		1 $\varnothing$ 12 S240, $s_{ad} = 150$	108,4 МПа	$V = 0,49V_R$	

В процессе испытания для получения данных о напряженно-деформированном состоянии зоны среза испытываемых балок I – III серий производились измерения относительных деформаций основной и дополнительной поперечной арматуры, а также деформации бетона в зоне среза.

Для измерения деформаций поперечной арматуры были использованы линейные тензорезисторы с базой 5 и 10 мм. На основную поперечную арматуру тензорезисторы наклеивались в пазах, полученных после извлечения пенопластовых деталей, привязанных к хомутам, из тела бетона опытных балок.

Ширина раскрытия наклонных трещин измерялась на уровне пересечения их с хомутами поперечной арматуры при помощи отсчетного микроскопа МПБ-2 на каждом этапе.

Помимо перечисленного, на каждом этапе фиксировался прогиб балки, замеренный прогибомером часового типа 6ПАО с ценой деления 0,01 мм, установленным с учетом подвижности основания испытательной установки в центре пролета образца на специальной рамке.

При работе с тензорезисторами использовался автоматический измеритель деформаций АИД-4. За нулевые отсчеты приборов принимались отсчеты с учетом собственного веса балки. Для измерения деформаций бетона зоны среза применялись прямоугольные тензометрические розетки, составленные из линейных тензорезисторов с базой 50 мм.

Схема расположения тензометрических розеток на боковой поверхности опытных балок приведена на рисунке 2.

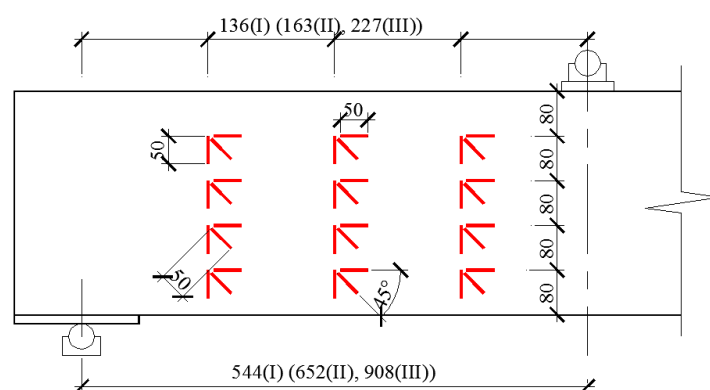


Рис. 2. Схема расположения тензометрических розеток на боковой поверхности опытных образцов-балок серий I – III

Усиление опытных балок проводилось в начальном напряженном состоянии или под нагрузкой, составляющей 49 – 71 % от разрушающей. Усиление опытных балок I – III серий выполнялось установкой дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры в следующей последовательности:

1) со стороны нижней грани усиливаемых балок напротив хомутов поперечной арматуры просверливались сквозные отверстия диаметром 14 мм посередине ширины элемента снизу вверх, количество отверстий определялось количеством хомутов поперечной арматуры, попадающих в зону среза опытных балок при конкретном пролете среза;

2) в просверленные отверстия устанавливались стержни дополнительной поперечной арматуры длиной 500 мм, диаметром 12 мм класса S240 с предварительно нарезанной по концам резьбой M12 и заранее наклеенными линейными тензорезисторами с базой 10 мм;

3) стержни дополнительной поперечной арматуры закреплялись на усиливаемых балках путем установки распределительных пластин-шайб и закручивания гаек;

4) стержни дополнительной поперечной арматуры перед дальнейшим загрузением балок предварительно напрягались путем закручивания гаек по концам. Величина предварительного напряжения задавалась одинаковой для всех стержней и контролировалась при помощи полученной при испытании дополнительной поперечной арматуры на растяжение зависимости по показаниям деформаций линейных тензорезисторов;

5) на стержни дополнительной предварительно напряженной арматуры накручивались контргайки.

Необходимо отметить, что установка дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры при усилении опытных балок проводилась в выполненные отверстия с диаметром, превышающим диаметр дополнительной поперечной арматуры, а пространство в отверстиях между арматурой и бетоном усиливаемых элементов ничем не заполнялось. Таким образом, дополнительная предварительно напряженная арматура работала без сцепления с бетоном по длине.

Для более равномерной передачи усилий обжатия балки дополнительной предварительно напряженной поперечной арматурой распределительные пластины укладывались на слой гипсового раствора толщиной 2 – 3 мм.

Схема усиления образцов представлена на рисунке 3.

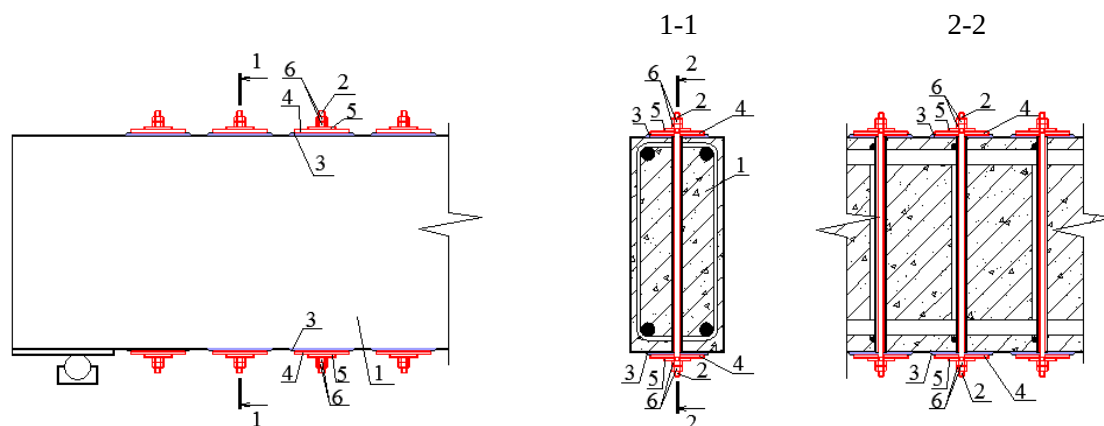


Рис. 3. Схема усиления опытных балок:

- 1 – усиливаемый образец; 2 – дополнительная поперечная арматура $\varnothing 12$ мм;
3 – слой гипсового раствора толщиной 2 – 3 мм; 4 – стальная распределительная пластина $100 \times 100 \times 5$ мм;
5 – стальная пластина-шайба $50 \times 50 \times 5$ мм; 6 – гайка и контргайка M12

Физико-механические характеристики бетона и арматуры. Определение физико-механических характеристик бетона опытных образцов-балок производилось непосредственно после их испытания на образцах-призмах с размерами $100 \times 100 \times 400$ мм, выполненных из бетона тех же замесов, что и опытные образцы-балки, в соответствии с [3; 4].

В ходе испытания образцов-призм при помощи индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм, установленных на базе 200 мм, измерялись деформации на каждой грани. Величина прикладываемой нагрузки определялась по силоизмерителю прессы.

Прочностные характеристики бетона опытных балок представлены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики бетона опытных балок

Шифр балки	Призменная прочность f'_c , Па	Модуль упругости E_c , МПа
Б-I-1	25,3	31210
Б-I-2	24,3	30900
Б-I-3	23,9	30825
Б-II-1	23,9	31230
Б-II-2	24,4	31120
Б-II-3	24,3	31135
Б-III-1	24,5	30280
Б-III-2	26,1	30710
Б-III-3	24,9	30565

Для определения физико-механических характеристик арматуры опытных образцов-балок испытывались отрезки арматуры тех же партий, что и использовались при изготовлении каркасов, в соответствии с [5]. Площадь поперечного сечения профилированной и гладкой арматуры определялась взвешиванием.

Для определения деформаций использовались индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм и тензорезисторы. Физико-механические характеристики арматуры приведены в таблице 3.

Таблица 3

Физико-механические характеристики арматуры

Диаметр, класс арматуры	Средняя площадь поперечного сечения, мм ²	Предел текучести f_y , МПа	Временное сопротивление f_t , МПа	Модуль упругости E_s , МПа
Ø28, S500	621,2	618,4	633,3	$2,02 \cdot 10^5$
Ø6,5, S240	33,1	348,3	543,1	$2,11 \cdot 10^5$
Ø12, S240	113,1	345,1	490,2	$2,12 \cdot 10^5$

Трещинообразование и формы разрушения. На начальных этапах нагружения опытные неусиленные (эталонные) балки Б-I-1, Б-II-1, Б-III-1 вели себя примерно одинаково. Вначале образовывались нормальные трещины в сечениях с постоянной величиной изгибающего момента (в зоне чистого изгиба). С увеличением нагрузки трещины развивались, рядом появлялись другие, менее развитые трещины. Затем в зоне среза появлялись наклонные трещины в виде развивающихся от одной из нормальных трещин (I тип) или образовавшиеся самостоятельно в средней зоне по высоте балки (II тип). При этом I тип наклонных трещин появлялся в опытных балках с пролетами среза, равными $2,5d$ и $2d$; II тип – с пролетом среза $1,5d$. Наклонные трещины появлялись в бетоне зоны среза как между поперечной арматурой, так и по оси арматуры. Расстояния между наклонными трещинами в зоне среза у всех эталонных балок были близки по величине и составили 110 – 160 мм. Угол наклона критической наклонной трещины в зоне среза был близок к углу наклона линии, соединяющей грань опорной площадки с гранью пластины, через которую передавалась действующая нагрузка. При дальнейшем нагружении критическая наклонная трещина развивалась, достигая сжатой зоны балки, и в итоге происходило ее разрушение от среза. До появления наклонных трещин в опытных балках с большим пролетом среза образовалось больше нормальных трещин с большей шириной раскрытия.

Характер работы опытных балок Б-I-2, Б-II-2, Б-III-2, усиленных в зоне среза установкой дополнительной предварительно напряженной арматуры в исходном напряженно-деформированном состоянии (под воздействием собственного веса), отличался от работы эталонных балок. Наклонные трещины появлялись при значительно больших усилиях от действующей нагрузки, а ширина их раскрытия при одном и том же усилии, действующем в зоне среза, уменьшалась. При этом положительное влияние дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры на уменьшение ширины раскрытия наклонных трещин возрастало с увеличением пролета среза. Для балок с пролетами среза $2,5d$ и $2d$ изменилось образование наклонных трещин с I на II тип. Кроме того, наклонные трещины появлялись в бетоне зоны среза в средней части по высоте балок между стержнями основной и дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры.

В балках Б-II-2 и Б-III-2 с пролетами среза $2d$ и $2,5d$ увеличился по сравнению с эталонными угол наклона к продольной оси трещин в зоне среза, а в балке Б-I-2 с пролетом среза $1,5d$ угол наклона был близок к углу наклона трещины в соответствующей эталонной балке Б-I-1. Расстояния между наклонными трещинами в зоне среза у балок Б-I-2, Б-II-2, Б-III-2 уменьшились по сравнению с соответствующими эталонными и составили 80 – 120 мм, а количество наклонных трещин в зоне среза увеличилось. Это объясняется наличием в зоне среза дополнительной предварительно напряженной арматуры усиления, установленной сосредоточенно в одном поперечном сечении с основной поперечной арматурой. Разрушение усиленных балок происходило по одной из наклонных трещин, которая в процессе нагружения выделялась в критическую, с последующим срезом сжатой зоны.

Характер трещинообразования опытных балок Б-I-3, Б-II-3, Б-III-3, усиленных под нагрузкой, составляющей соответственно 71, 57, 49 % от прочности соответствующих эталонных балок, на начальных этапах до усиления аналогичен характеру неусиленных балок Б-I-1, Б-II-1, Б-III-1. После установки и предварительного напряжения дополнительной поперечной арматуры ширина раскрытия наклонных трещин не изменилась. При дальнейшем увеличении нагрузки развитие критических наклонных трещин по их длине и ширине не происходило на протяжении ряда этапов. В это время появлялись соседние наклонные, а также развивались нормальные трещины, увеличивалось их количество и уменьшалось расстояние между ними. На этапах, предшествующих разрушению, возобновлялось развитие наклонных трещин (увеличивались ширина их раскрытия и длина). Расстояние между наклонными трещинами в зоне среза у опытных балок Б-I-3, Б-II-3, Б-III-3 составляло 90 – 150 мм. Разрушение происходило от среза по наклонной трещине, угол наклона которой по отношению к продольной оси оставался неизменным с момента появления трещины до усиления балок, что подтверждает принятую гипотезу о том, что *при усилении элемента после образования наклонных трещин расстояние между ними после усиления равно расстоянию между наклонными трещинами элемента до усиления*. Зависимости ширины раскрытия критической наклонной трещины от поперечного усилия в опытных балках показаны на рисунках 4 – 6.

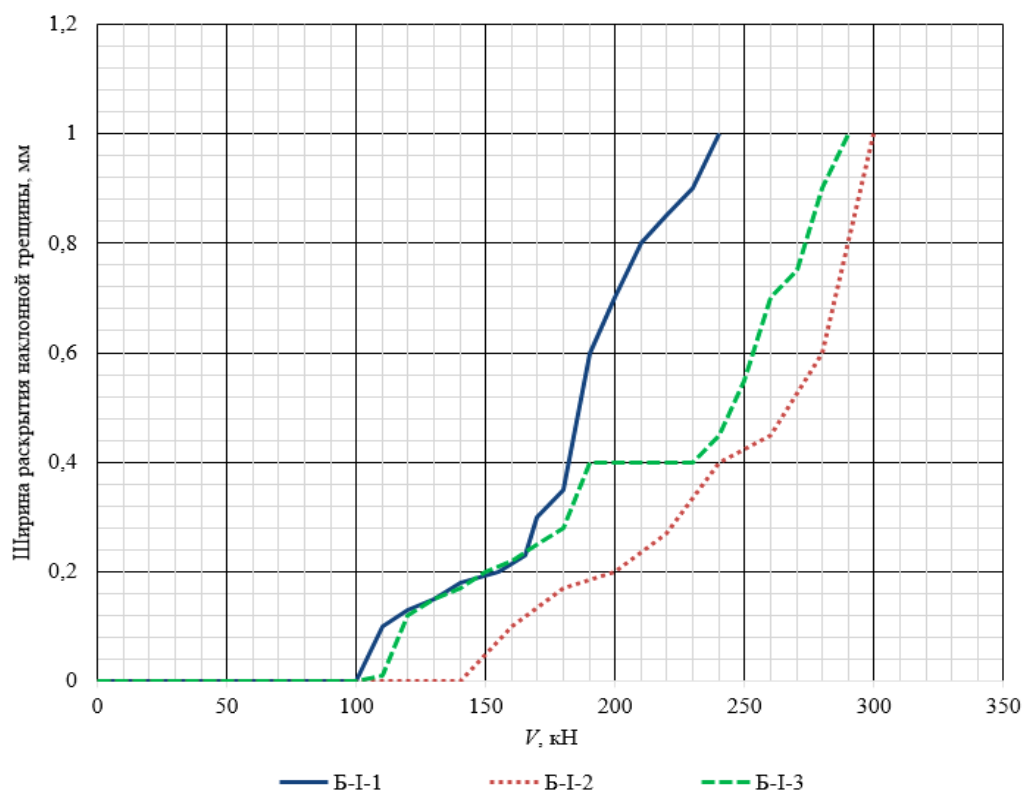


Рис. 4. Зависимость ширины раскрытия критической наклонной трещины от поперечной силы для опытных балок I серии

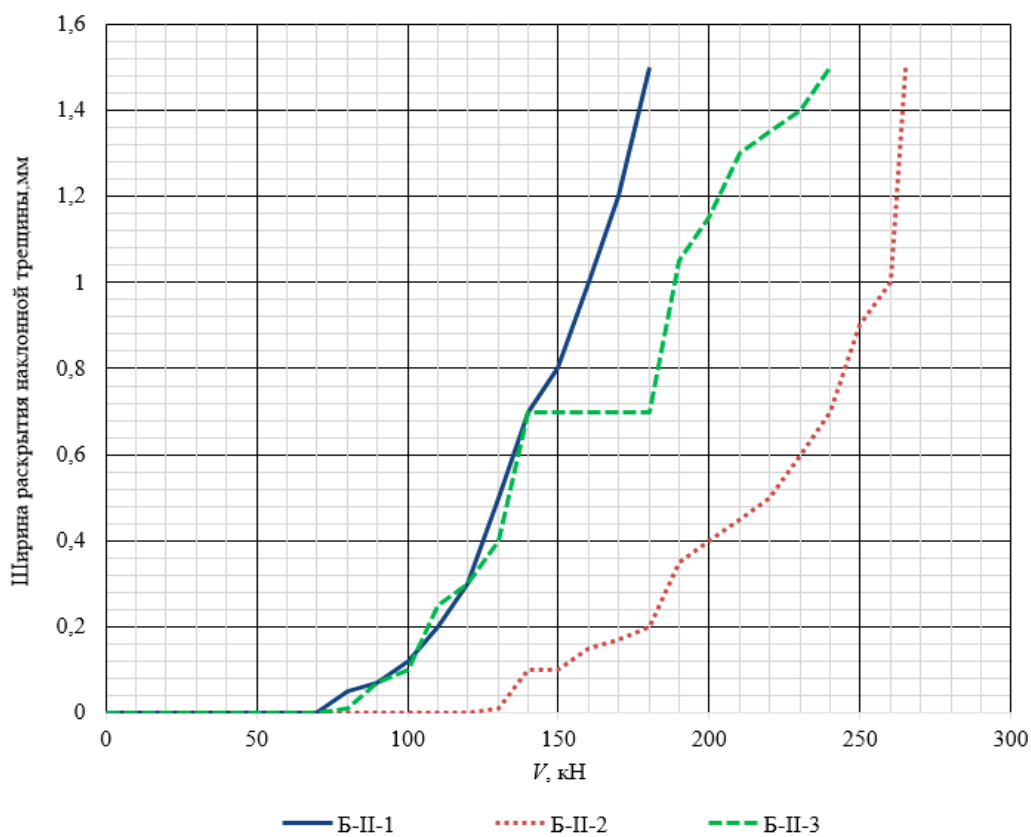


Рис. 5. Зависимость ширины раскрытия критической наклонной трещины от поперечной силы для опытных балок II серии

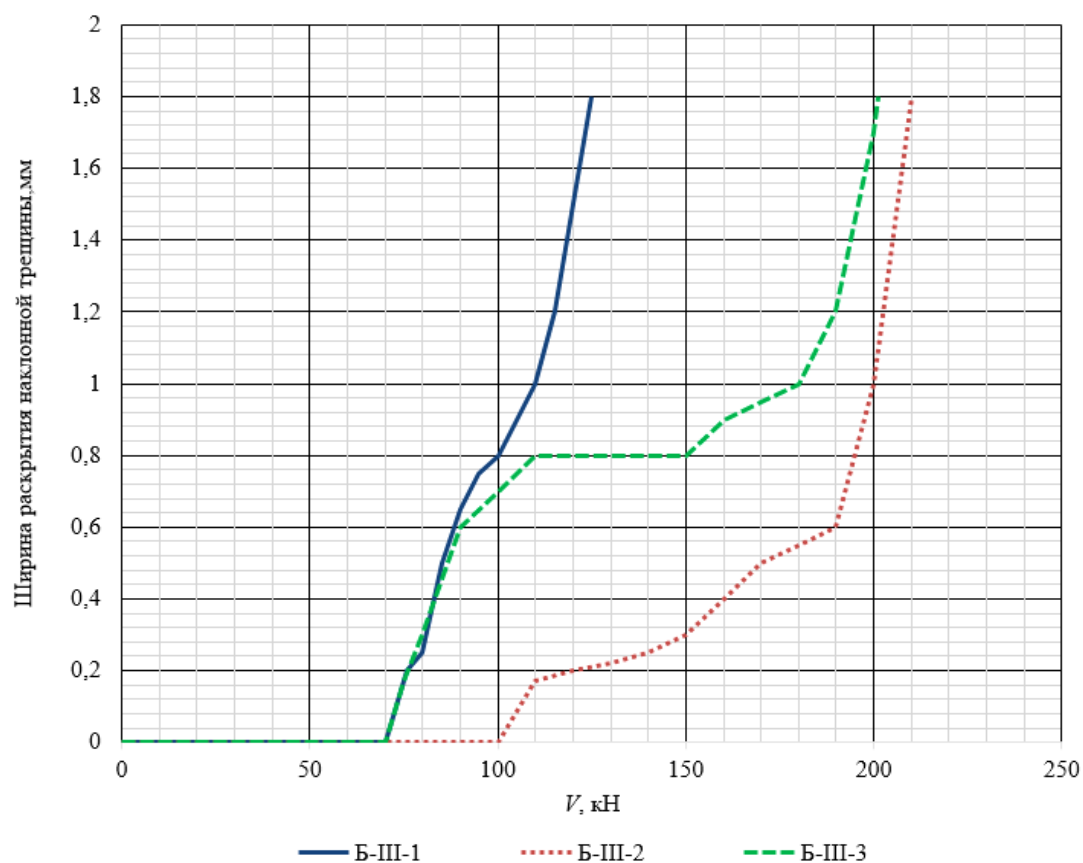


Рис. 6. Зависимость ширины раскрытия критической наклонной трещины от поперечной силы для опытных балок III серии

Общий вид опытных балок после испытаний представлен на рисунках 7 – 9.

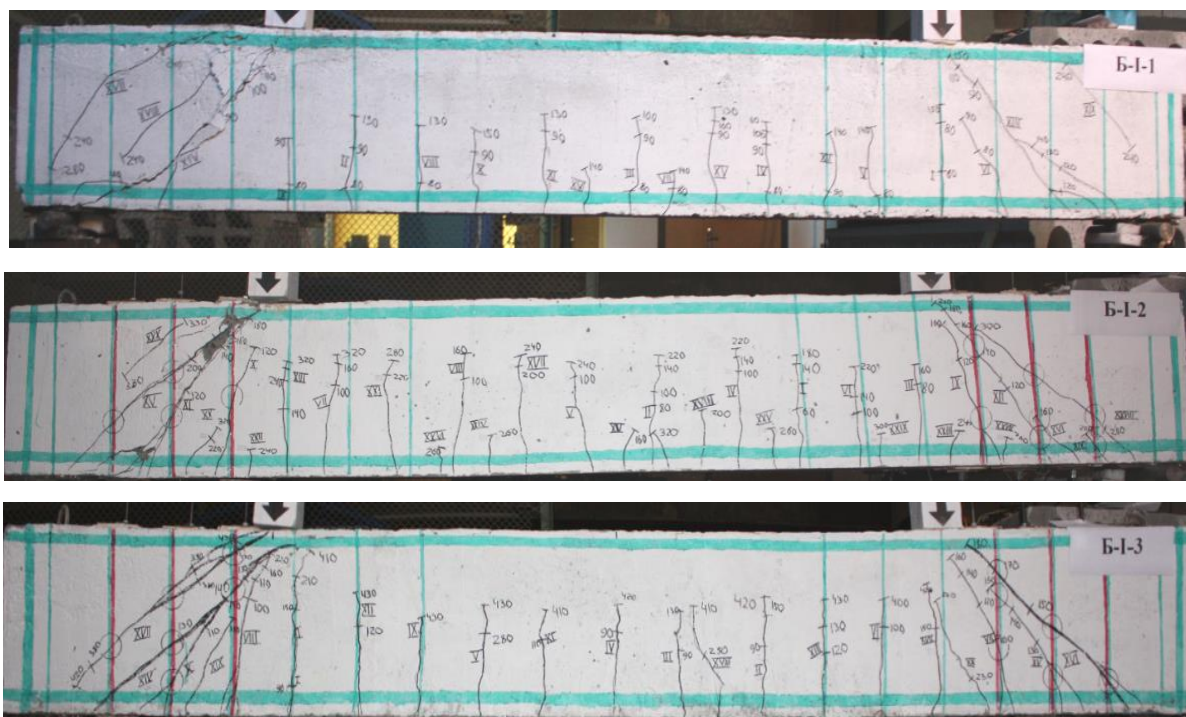


Рис. 7. Общий вид опытных балок I серии после испытаний

Для сопоставления с результатами экспериментальных данных расчет прочности усиленных в зоне среза опытных балок производился по методу предельных равновесий (по наклонной трещине) [6], методу ферменной аналогии [6; 7], методике расчета усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов [8], а также по предлагаемой методике с использованием программы [1; 2; 9].

Результаты расчета и их сопоставление с опытными данными представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты расчета прочности опытных балок в зоне среза

Шифр балки	V_{exp} , кН	V_{th} , кН, [6]	$\frac{V_{exp}}{V_{th}}$ [6]	V_{th} , кН, [7]	$\frac{V_{exp}}{V_{th}}$ [7]	V_{th} , кН, [8]	$\frac{V_{exp}}{V_{th}}$ [8]	V_{th} , кН, [1; 2]	$\frac{V_{exp}}{V_{th}}$ [1; 2]
Б-I-1	283,3	281,05	1,01	50,34	5,63	–	–	267,3	1,06
Б-I-2	482,8	398,01	1,21	143,44	3,37	–	–	465,5	1,04
Б-I-3	460,8	398,01	1,16	143,44	3,21	384	1,20	445,3	1,03
Б-II-1	244,5	252,5	0,97	50,34	4,86	–	–	236,3	1,03
Б-II-2	351,4	351,74	1,00	143,44	2,45	–	–	363,2	0,97
Б-II-3	335,6	351,74	0,95	143,44	2,34	344,7	0,97	348,5	0,96
Б-III-1	184,8	224,5	0,82	50,34	3,67	–	–	176,3	1,05
Б-III-2	315,6	323,7	0,97	143,44	2,20	–	–	290,9	1,08
Б-III-3	295,4	323,7	0,91	143,44	2,06	316,7	0,93	276,4	1,07

Анализ результатов расчетов и сопоставление с экспериментальными данными показывает удовлетворительную сходимость предлагаемой методики расчета прочности усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов, которая учитывает:

- начальное напряженно-деформированное состояние усиливаемых элементов при усилении;
- предварительное напряжение дополнительной поперечной арматуры;
- различные физико-механические и геометрические характеристики усиливаемой и усиливающей частей усиленного в зоне среза изгибаемого железобетонного элемента [1; 2].
- напрямую учитывает комбинацию внутренних усилий (для опытных балок, кроме поперечной силы – изгибающий момент).

Рассмотренные методы расчета прочности железобетонных элементов в зоне среза в действующих нормативных документах [6 – 8] не учитывают особенности деформирования под нагрузкой усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов, что подтверждается результатами сопоставления с опытными данными (см. табл. 4).

Заключение. В ходе проведенного исследования получены следующие результаты:

- экспериментально подтверждена эффективность усиления в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов установкой дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры, в том числе под нагрузкой;
- выполнены экспериментальные исследования, получены новые экспериментальные данные о характере разрушения, особенностях деформирования, образования, развития и раскрытия трещин усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов (в том числе усиленных под нагрузкой) в результате комплексных испытаний опытных балок;
- результаты экспериментально-теоретических исследований показали удовлетворительную сходимость с опытными данными результатов расчетов по предложенной методике расчета [1; 2] усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пецольд, Т.М. Методика расчета изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза / Т.М. Пецольд, Е.Д. Лазовский, Д.О. Глухов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Прикладные науки. Строительство. – 2012. – № 16. – С. 40 – 45.

2. Лазовский, Е.Д. Предпосылки, методика и программа для расчета напряженно-деформированного состояния усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов / Е.Д. Лазовский, Д.О. Глухов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Прикладные науки. Строительство. – 2013. – № 16. – С. 33 – 39.
3. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180-90. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 45 с.
4. Бетон: ГОСТ 24452-80. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 18 с.
5. Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение: ГОСТ 12004-81. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 45 с.
6. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02 / М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь. – Минск, 2003. – 140 с.
7. ТКП EN 1992-1-1-2009 (02250) Еврокод 2 проектирование железобетонных конструкций. Ч. 1-1. Общие правила и правила для зданий / М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь. – Минск, 2010.
8. Усиление железобетонных конструкций: Пособие П1-98 к СНиП 2.03.01-84* / Минстройархитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 1998. – 189 с.
9. Применение мягких вычислений для сглаживающей аппроксимации сложных сингулярных зависимостей / Д.О. Глухов [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия С. Фундаментальные науки. – 2012. – № 12. – С. 2 – 5.

Поступила 18.11.2013

**EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF STRENGTH
OF STEEL REINFORCED CONCRETE ELEMENTS REINFORCED
THE SLICER AREA INSTALLING ADDITIONAL
PRELIMINARY TENSE TRANSVERSE REINFORCEMENT**

Y. LAZOUSKI

The results of experimental and theoretical research of strength of steel reinforced concrete members reinforced the slicer area installing additional preliminary tense transverse reinforcement are presented. Comparison of the results of the experiment with the data, obtained through the calculation on the proposed methodology developed by the author, based on provisions of the overall deformation model and the modified compression field theory, is carried out.