

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 624.012.45

ЛАЗОВСКИЙ
Егор Дмитриевич

УСИЛЕНИЕ ИЗГИБАЕМЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗОНЕ СРЕЗА

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.23.01 – строительные конструкции,
здания и сооружения

Минск, 2014

Работа выполнена в учреждении образования «Полоцкий государственный университет»

Научный руководитель

Пецольд Тимофей Максимович,
заслуженный деятель науки Республики Беларусь, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Белорусского национального технического университета, г. Минск

Официальные оппоненты:

Пастушков Геннадий Павлович,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Мосты и тоннели» Белорусского национального технического университета, г. Минск

Кондратчик Александр Аркадьевич,
кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Строительные конструкции» учреждения образования «Брестский государственный технический университет», г. Брест

Оппонирующая организация

Республиканское унитарное предприятие «Институт БелНИИС», г. Минск

Защита состоится 22 мая 2014 года в 13⁰⁰ часов на заседании Совета по защите диссертаций Д 02.05.09 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: г. Минск, проспект Независимости, 150, корпус № 15, ауд. 808; e-mail: nrak@bntu.by; тел./факс 8 (017) 265-96-97.

Отзывы в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, следует направлять на имя ученого секретаря совета по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корпус 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 18 апреля 2014 года.

Учёный секретарь
совета по защите диссертаций



Рак Н. А.

© Лазовский Е. Д., 2014
© БНТУ, 2014

ВВЕДЕНИЕ

Реконструкция зданий и сооружений – одно из главных направлений строительной отрасли. В условиях интенсивно развивающейся экономики Республики Беларусь большое внимание уделяется модернизации и техническому перевооружению действующих промышленных предприятий и гражданских объектов. При этом в ряде случаев возникает необходимость в усилении строительных конструкций, в том числе изгибаемых железобетонных элементов в зоне среза, где кроме комбинации изгибающих моментов и продольных усилий действуют значительные поперечные усилия.

Совершенствование методов расчета усиленных строительных конструкций играет важную роль в повышении надежности и экономичности принимаемых решений. Перспективным направлением совершенствования методов расчета железобетонных конструкций является переход от эмпирических подходов с рассмотрением комбинации из одного-двух видов внутренних усилий к физическим моделям, учитывающим полную комбинацию действующих внутренних усилий.

Изгибаемые железобетонные элементы, усиленные в зоне среза, имеют ряд особенностей деформирования и конструирования, заключающихся в наличии в железобетонных элементах при усилении начального напряженно-деформированного состояния от действия собственного веса, постоянных и временных нагрузок, различных по физико-механическим свойствам основной и дополнительной поперечной арматуры, основного и дополнительного бетона, предварительного напряжения поперечной арматуры, которые не учитываются современными методиками расчета, что ведет к перерасходу материалов или недостаточной надежности усиленных элементов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Работа выполнялась в соответствии с программой Министерства образования Республики Беларусь и учреждения образования «Полоцкий государственный университет» ГБ № 3511 «Совершенствование методов расчета несущих строительных конструкций с новыми видами армирования, разработка теоретических основ оценки технического состояния и усиления конструкций эксплуатируемых сооружений», ГБ № 2811 «Усиление изгибаемых железобетонных элементов в зоне среза».

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы состоит в разработке и экспериментальной проверке научно обоснованной методики расчета изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза, на основе модифицированной теории полей сжатия и общей деформационной модели. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- проведен анализ экспериментальных и теоретических исследований изгибаемых железобетонных элементов, методов их усиления в зоне среза и основных особенностей их работы под нагрузкой;

- выполнены экспериментально-теоретические исследования напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза;

- разработана методика расчета изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза;

- на базе результатов проведенных исследований разработаны алгоритмы автоматизированного расчета прочности и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза;

- результаты исследования внедрены в практику проектирования усиления в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов.

Объектом исследования являются изгибаемые железобетонные элементы, усиленные в зоне среза путем установки дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры и путем наращивания поперечного сечения со стороны боковых граней дополнительным армированным бетоном.

Предметом исследования является напряженно-деформированное состояние зоны среза изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в этой зоне путем установки дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры и путем наращивания поперечного сечения со стороны боковых граней дополнительным армированным бетоном.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты впервые проведенного экспериментально-теоретического исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза путем установки дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры, а также путем наращивания поперечного сечения со стороны боковых граней балок дополнительным бетоном с установкой дополнительной поперечной арматуры;

- методика расчета изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза, основанная на положениях модифицированной теории полей сжатия и общей деформационной модели, учитывающая в расчетах разность напряженно-деформированных состояний основного и дополнительного бетона и арматуры после усиления и использующая в расчетах диаграммы деформирования материалов для плоского напряженно-деформированного состояния;

- алгоритмы автоматизированного расчета прочности и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза путем установки дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры, а также путем наращивания поперечного сечения дополнительным бетоном с установкой дополнительной поперечной арматуры.

Личный вклад соискателя

Автором лично под руководством научного руководителя сформулированы цель и задачи, получены научные результаты, приведенные в диссертации, заключающиеся в проведении экспериментально-теоретических исследований, разработке методики расчета изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза путем установки дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры, а также путем наращивания поперечного сечения дополнительным бетоном и поперечной арматурой.

Разработка и реализация на ЭВМ алгоритмов автоматизированного расчета предложенной автором под руководством научного руководителя методики расчета прочности и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза, выполнены автором совместно с кандидатом технических наук Д. О. Глуховым, инженерами Т. М. Глуховой, Г. А. Самощенко, И. В. Лазовской.

Апробация результатов диссертации

Основные положения диссертации доложены и обсуждены на следующих конференциях и семинарах: XVI международном научно-методическом семинаре «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь» (Гродно, 2010 г.); III международном симпозиуме «Проблемы современного бетона и железобетона» (Минск, 2011 г.); II–V научно-практических конференциях «European and National dimension in research» (Новополоцк, 2010, 2011, 2012, 2013 гг.); XVIII международном научно-методическом семинаре «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь» (Полоцк, 2012 г.).

Опубликованность результатов диссертации

По теме диссертации опубликовано 11 работ, из них 4 статьи в научных изданиях, соответствующих перечню ВАК Республики Беларусь, общим объемом 1,46 авторского листа; 7 статей в сборниках научных трудов конференций и семинаров.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, основной части, представленной четырьмя главами, заключения, библиографического списка из 159 наименований.

Общий объем диссертации содержит 129 страниц, в том числе 55 рисунков на 47 страницах; 6 таблиц на 6 страницах, 5 приложений на 9 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В первой главе сделан аналитический обзор методов расчета прочности и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов в зоне среза.

Вопросам сопротивления изгибаемых железобетонных элементов воздействию поперечных сил посвящены работы В. Н. Байкова, Т. И. Барановой, В. М. Баташева, И. К. Белоброва, В. М. Бондаренко, М. С. Боришанского, Ю. А. Булая, П. И. Васильева, А. А. Гвоздева, А. Б. Гольшева, Л. А. Дорошкевича, Э. В. Егинова, В. Ф. Залого, А. С. Залесова, Х. А. Зиганшина, Н. И. Карпенко, Ю. А. Климова, А. И. Колтунова, В. И. Колчунова, А. А. Кондратчика, А. М. Крыгиной, А. П. Кудзиса, В. А. Лобанова, А. Т. Лобанова, Р. Е. Мигаль, П. П. Польского, В. В. Родевича, О. А. Рочняка, Э. Е. Сигалова, А. С. Силантьева, В. В. Тура, P. Adebar, A. Belarbi, E. W. Bennet, M. P. Collins, T. T. C. Hsu, H. Kupfer, F. Leonhardt, E. Mörsch, X. B. Pang, P. Regan, F. J. Vecchio, J. C. Walraven, R. Walter, F. Watanabe и других авторов.

Рассмотрены возможные виды разрушения изгибаемых железобетонных элементов в зоне среза и методы их расчета: метод предельного равновесия, предложенный М. С. Боришанским и получивший развитие в работах А. А. Гвоздева, А. С. Залесова, В. М. Бондаренко, Ю. А. Климова, П. И. Васильева, О. А. Рочняка и других; методы ферменной (арочной) аналогии, предложенные Е. Mörsch и другими учеными и принятые в нормах проектирования ряда стран; методы, предусматривающие статистическую оценку прочности изгибаемых элементов при действии поперечных сил, предложенные А.П. Кудзисом и другими; деформационные методы расчета Н. И. Карпенко, P. Adebar, A. Belarbi, E. W. Bennet, M. P. Collins, F. J. Vecchio и другими исследователями. Подробно рассмотрен деформационный метод расчета прочности изгибаемых железобетонных элементов в зоне среза, основанный на положениях модифицированной теории полей сжатия, предложенный М. P. Collins и F. J. Vecchio. Этот метод расчета получил наибольшее распространение и включен в нормы проектирования Республики Беларусь и других стран. Проанализированы существующие методы расчета образования и раскрытия наклонных трещин в изгибаемых железобетонных элементах в зоне среза.

Проанализированы известные методики расчета прочности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза, которые с помощью эмпирических коэффициентов учитывают выполнение усиления под нагрузкой.

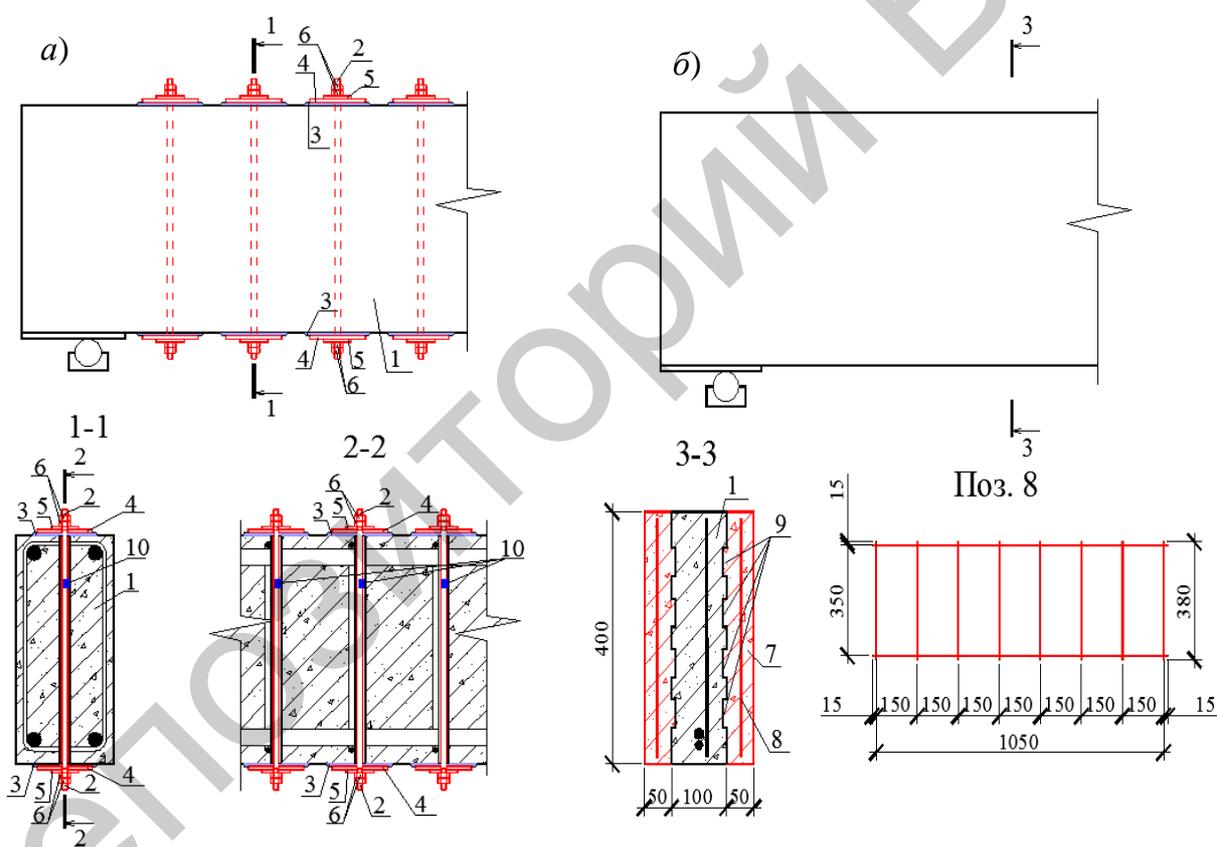
Изучены исследования Г. И. Бердичевского, В. Д. Будюка и А. А. Кондратчика и других ученых о влиянии предварительного напряжения поперечной арматуры на напряженно-деформированное состояние зоны среза изгибаемых железобетонных элементов.

Рассмотрены способы усиления изгибаемых железобетонных элементов в зоне среза, включающие установку в зоне среза дополнительной попе-

речной арматуры в предварительно выполненные сквозные отверстия с созданием предварительного напряжения арматуры различными способами.

В качестве основы для разработки методики расчета изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза, принята модифицированная теория полей сжатия, позволяющая рассчитывать параметры напряженно-деформированного состояния зоны среза изгибаемых железобетонных элементов любой формы поперечного сечения и на любой стадии их работы.

Вторая глава посвящена методике экспериментальных исследований изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза. Опытные образцы изгибаемых железобетонных элементов длиной 3 м испытывались до разрушения по однопролетной шарнирной схеме с приложением статической нагрузки в виде двух сосредоточенных сил с варьируемым расстоянием до опор ($1,5d$, $2d$, $2,5d$; d – рабочая высота сечения). Схемы усиления опытных образцов приведены на рисунке 1.



1 – усиляемый опытный образец; 2 – дополнительная поперечная арматура $\varnothing 12$ мм; 3 – слой гипсового раствора; 4 – стальная распределительная пластина; 5 – стальная пластина-шайба; 6 – гайка и контргайка; 7 – дополнительный бетон; 8 – плоский каркас с дополнительной поперечной арматурой; 9 – шпонки; 10 – линейные тензорезисторы

Рисунок 1 – Схемы усиления опытных образцов I–III серий (а), IV серии (б)

Усиление опытных образцов I–III серий выполнялось путем установки дополнительной поперечной арматуры в предварительно выполненные сквозные отверстия с последующим ее предварительным напряжением. Усиление

опытных образцов IV серии проводилось путем наращивания поперечного сечения со стороны боковых граней дополнительным бетоном с установкой дополнительной поперечной арматуры. Совместная работа элементов усиления с опытными образцами IV серии обеспечивалась бетонными шпонками, выполняемыми со стороны боковых граней. В каждой серии по одному опытному образцу испытано в качестве эталонного (без усиления), а также с усилением при начальном напряженном состоянии (собственный вес) и под нагрузкой. Опытный образец Б-IV-4 испытывался как эталонный, с размерами и поперечным армированием, соответствовавшими усиленным опытными образцам IV серии. Характеристики опытных образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики опытных образцов

Серия	Шифр образца	Размеры поперечного сечения до усиления, мм	Размеры поперечного сечения после усиления, мм	Поперечное армирование до усиления, s – шаг, мм	Дополнительная поперечная арматура, s_{ad} – шаг, мм	Предварительное напряжение дополнительной поперечной арматуры с учетом потерь, МПа	Поперечное усилие при усилении	Пролет среза
I	Б-1-1	175×401	175×401	2Ø6,5 S240, $s = 150$	–	–	–	1,5d
	Б-1-2	176×400	176×400		1Ø12 S240, $s_{ad} = 150$	97,2	$V = 0$	
	Б-1-3	176×400	176×400		–	114,3	$V = 0,71V_R$	
II	Б-II-1	176×399	176×399		1Ø12 S240, $s_{ad} = 150$	–	–	2d
	Б-II-2	176×400	176×400			98,1	$V = 0$	
	Б-II-3	175×399	175×399			98,5	$V = 0,57V_R$	
III	Б-III-1	176×402	176×402		1Ø12 S240, $s_{ad} = 150$	–	–	2,5d
	Б-III-2	176×400	176×400			96,5	$V = 0$	
	Б-III-3	174×401	174×401			108,4	$V = 0,49V_R$	
IV	Б-IV-1	100×400	100×400	1Ø4 S400, $s = 150$	–	–	2d	
	Б-IV-2	100×400	200×400		2Ø4 S400, $s_{ad} = 150$	–		$V = 0$
	Б-IV-3	100×400	200×400	–	–	$V = 0,79V_R$		
	Б-IV-4	200×400	200×400	3Ø4 S400, $s = 150$	–	–		

V_R – поперечное усилие, соответствующее прочности эталонного опытного образца для серии.

При испытании в опытных образцах на каждом этапе нагружения измерялись относительные деформации основной и дополнительной поперечной арматуры, прогиб в середине пролета, ширина раскрытия наклонных трещин в местах их пересечения со стержнями поперечной арматуры. Для измерения относительных деформаций бетона зоны среза применялись прямоугольные тензометрические розетки, составленные из линейных тензорезисторов. Определение физико-механических характеристик бетона и арматуры опытных образцов производилось путем испытания призм с размерами 100×100×400 мм и отрезков стержней арматуры, которой были армированы опытные образцы.

В третьей главе приведена методика расчета изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза, основанная на модифицированной теории полей сжатия и общей деформационной модели.

При работе под нагрузкой изгибаемого железобетонного элемента, усиленного в зоне среза, характерно две стадии:

- первая стадия – работа усиливаемого элемента до усиления;
- вторая стадия – работа усиленного элемента после его усиления.

Расчетное поперечное сечение зоны среза изгибаемого железобетонного элемента в соответствии с общей деформационной моделью рассматривается как совокупность элементарных площадок, напряжения в которых распределены равномерно, а деформации равны среднему значению по площади. При этом напряженно-деформированное состояние каждой элементарной площадки рассматривается отдельно, а условия равновесия проверяются для всего сечения. Кроме того, на первой стадии расчета принимаются следующие предпосылки модифицированной теории полей сжатия и общей деформационной модели:

- предпосылка о совпадении направлений главных напряжений и максимальных относительных деформаций в бетоне зоны среза изгибаемого железобетонного элемента;

- при увеличении внешней нагрузки и сохранении соотношения составляющих внутренних усилий ориентация главных напряжений на стадии до образования трещин не изменяется;

- угол наклона трещин θ (рад) и сжатых бетонных полос между наклонными трещинами на произвольном этапе после образования наклонных трещин совпадает с углом наклона главных напряжений, значение которого изменяется при нагружении;

- средние напряжения, а также средние относительные деформации в железобетонном элементе, находящемся в условиях плоского напряженного состояния, взаимосвязаны теорией прочности (круг О. К. Мора);

- главные растягивающие напряжения изменяются по ширине сжатой бетонной полосы от нуля в сечении с трещиной, до некоторого максимума в середине расстояния между трещинами. В расчетах используют средние величины главных растягивающих напряжений, рассматривая их как функцию от средних растягивающих относительных деформаций бетона для элемента с наклонными трещинами;

- в сечении, проходящем вдоль наклонной трещины, действуют касательные напряжения, вызванные зацеплением по берегам трещины;

- гипотеза плоских сечений (Я. Бернулли) для распределения относительных деформаций по высоте сечения усиливаемого элемента до усиления в постановке В. И. Мурашова – Я. М. Немировского.

На первой стадии работы параметры напряженно-деформированного состояния усиленного железобетонного элемента (рисунок 2) в момент усиления определяются из решения системы уравнений (1).

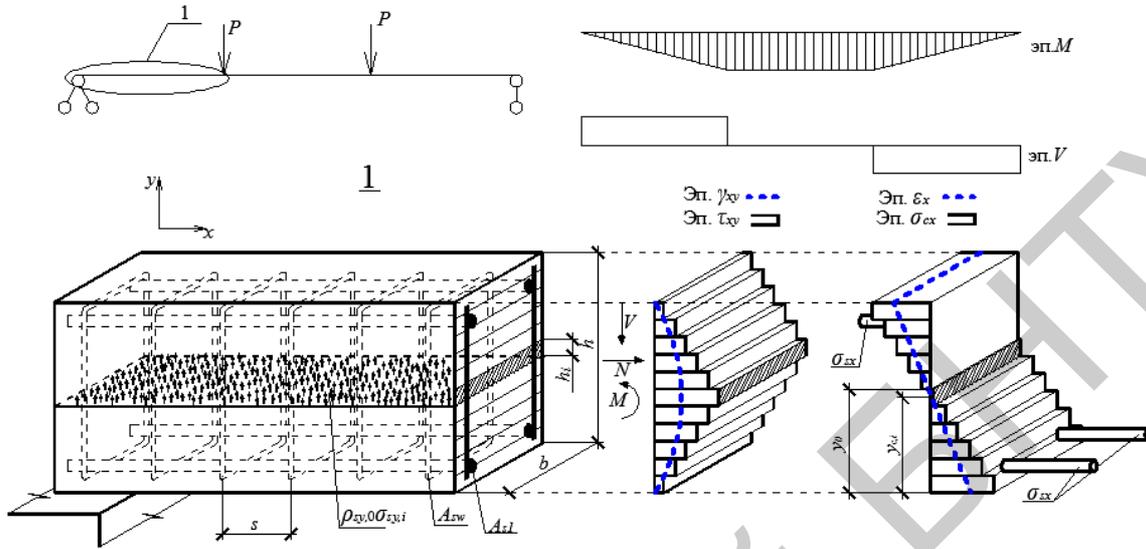


Рисунок 2 – Распределение касательных и нормальных относительных деформаций и напряжений в изгибаемом железобетонном элементе на первой стадии работы (при усилении)

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \sum_{i=1}^m \sigma_{cx,i} b_i h_i + \sum_{i=m+1}^n \sigma_{sx,i} A_{s,i} = N; \\
 \sum_{i=1}^m \sigma_{cx,i} b_i h_i (y_{c,i} - y_0) + \sum_{i=m+1}^n \sigma_{sx,i} A_{s,i} (y_{s,i} - y_0) = M; \\
 \sum_{i=1}^m \tau_{xy,i} b_i h_i = V; \\
 \varepsilon_{x,i} = \frac{1}{r} (y_{c,i} - y_0) + \frac{N}{\sum_{i=1}^m E'_{c,i} b_i h_i + \sum_{i=m+1}^n E'_{sx,i} A_{s,i}}; \\
 \sigma_{c1,i} = f(\varepsilon_{c1,i}); \quad \sigma_{c2,i} = f(\varepsilon_{c2,i}); \quad \sigma_{sx,i} = f(\varepsilon_{sx,i}); \quad \sigma_{sy,i} = f(\varepsilon_{sy,i}); \\
 \varepsilon_{x,i} = \varepsilon_{c2,i} \cos^2 \theta_i + \varepsilon_{c1,i} \sin^2 \theta_i; \\
 \varepsilon_{y,i} = \varepsilon_{c2,i} \sin^2 \theta_i + \varepsilon_{c1,i} \cos^2 \theta_i; \\
 \sigma_{cy,i} = \sigma_{c2,i} \sin^2 \theta_i + \sigma_{c1,i} \cos^2 \theta_i + \rho_{sy,0} \sigma_{sy,i}; \\
 \tau_{xy,i} = (-\sigma_{c2,i} + \sigma_{c1,i}) \sin \theta_i \cos \theta_i; \\
 \sigma_{cx,i} = \sigma_{c1,i} - \tau_{xy,i} / \tan \theta_i,
 \end{array} \right. \quad (1)$$

Где $\sigma_{cx,i}$, $\sigma_{sx,i}$ – проекция на продольную ось элемента нормальных напряжений соответственно в i -й элементарной площадке бетона, стержне продольной арматуры, МПа; b_i , h_i – поперечные размеры i -й элементарной площадки бе-

тона, мм; $A_{s,i}$ – площадь поперечного сечения i -го стержня продольной арматуры, мм²; $y_{c,i}$, $y_{s,i}$ – расстояние от выбранной оси до центра тяжести соответственно i -й элементарной площадки бетона, стержня продольной арматуры, мм; y_0 – расстояние от выбранной оси до центра тяжести сечения элемента, мм; $\tau_{xy,i}$ – касательные напряжения в i -й элементарной площадке бетона, МПа; $1/r$ – кривизна элемента, 1/мм; $\varepsilon_{x,i}$, $\varepsilon_{y,i}$ – проекция относительных деформаций соответственно на продольную, поперечную оси элемента мм/мм; $E'_{c,i}$, $E'_{sx,i}$ – секущий модуль деформаций соответственно i -й элементарной площадки бетона, стержня продольной арматуры, МПа; θ_i – угол наклона к продольной оси главных напряжений в i -й элементарной площадке бетона, рад; $\varepsilon_{c1,i}$, $\varepsilon_{c2,i}$ – относительные деформации по направлению соответственно главных растягивающих, главных сжимающих напряжений в элементарных площадках бетона, мм/мм; $\sigma_{c1,i}$, $\sigma_{c2,i}$ – соответственно главные растягивающие, главные сжимающие напряжения в элементарных площадках, МПа; $\sigma_{sx,i}$, $\sigma_{sy,i}$ – нормальные напряжения соответственно в продольной, поперечной арматуре, МПа; $\rho_{sy,0}$ – степень поперечного армирования усиляемого элемента до усиления, мм²/мм²; N , M , V – соответственно продольное усилие (Н), изгибающий момент (Н·мм), поперечное усилие (Н), действующие при усилении.

На второй стадии работы принимаются следующие предпосылки расчета напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза:

- условие совместной работы усиляемого и усиливающего элементов по контакту в продольном и поперечном направлениях при восприятии внешней нагрузки, прикладываемой к усиленному элементу;

- неизменность сдвиговых модулей бетона усиляемого и усиливающего элементов при суммировании сдвиговых относительных деформаций и касательных напряжений;

- гипотеза плоских сечений для распределения относительных деформаций по высоте сечения элементов усиления, а также для приращений относительных деформаций основного сечения элемента после усиления в постановке В. И. Мурашова – Я. М. Немировского;

- угол наклона к продольной оси главных напряжений от приращения нагрузки, приложенной к элементу после усиления, принимается равным углу наклона главных напряжений от полной нагрузки, приложенной к усиленному элементу;

- гипотеза о равномерности распределения вертикальных напряжений обжатия от дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры по длине усиленной зоны среза изгибаемого железобетонного элемента.

На второй стадии напряженно-деформированное состояние изгибаемого железобетонного элемента, усиленного в зоне среза, от нагрузки, прило-

женной к элементу после усиления, предлагается определять из решения следующей системы уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^m \sigma_{cx,i} b_i h_i + \sum_{j=1}^k \sigma_{cx,ad,j} b_{ad,j} h_{ad,j} + \sum_{i=m+1}^n \sigma_{sx,i} A_{s,i} + \sum_{j=k+1}^l \sigma_{sx,ad,j} A_{s,ad,j} = N + \Delta N; \\
 & \sum_{i=1}^m \sigma_{cx,i} b_i h_i (y_{c,i} - y_{0,ad}) + \sum_{j=1}^k \sigma_{cx,ad,j} b_{ad,j} h_{ad,j} (y_{c,ad,j} - y_{0,ad}) + \\
 & + \sum_{i=m+1}^n \sigma_{sx,i} A_{s,i} (y_{s,i} - y_{0,ad}) + \sum_{j=k+1}^l \sigma_{sx,ad,j} A_{s,ad,j} (y_{s,ad,j} - y_{0,ad}) = M + \Delta M; \\
 & \sum_{i=1}^n (\tau_{xy,i[\square]} + \tau_{xy,ad,i}) b_i h_i + \sum_{j=1}^l \tau_{xy,ad,j} b_{ad,j} h_{ad,j} = V + \Delta V; \\
 & \varepsilon_{x,i} = \varepsilon_{x,i[\square]} + \varepsilon_{x,ad,i}; \quad \varepsilon_{y,i} = \varepsilon_{y,i[\square]} + \varepsilon_{y,ad,i}; \\
 & \varepsilon_{x,ad,i} = \frac{1}{r_{ad}} (y_{c,i} - y_{0,ad}) + \frac{\Delta N}{\sum_{i=1}^m E'_{c,i} b_i h_i + \sum_{i=m+1}^n E'_{sx,i} A_{s,i} + \sum_{j=1}^k E'_{c,ad,j} b_{ad,j} h_{ad,j} + \sum_{j=k+1}^l E'_{sx,ad,j} A_{s,ad,j}}; \\
 & \varepsilon_{x,ad,j} = \frac{1}{r_{ad}} (y_{c,ad,j} - y_{0,ad}) + \frac{\Delta N}{\sum_{i=1}^m E'_{c,i} b_i h_i + \sum_{i=m+1}^n E'_{sx,i} A_{s,i} + \sum_{j=1}^k E'_{c,ad,j} b_{ad,j} h_{ad,j} + \sum_{j=k+1}^l E'_{sx,ad,j} A_{s,ad,j}}; \quad (2) \\
 & \sigma_{c1,i} = f(\varepsilon_{c1,i}); \quad \sigma_{c2,i} = f(\varepsilon_{c2,i}); \quad \sigma_{sx,i} = f(\varepsilon_{x,i}); \quad \sigma_{sy,i} = f(\varepsilon_{y,i}); \\
 & \sigma_{c1,ad,j} = f(\varepsilon_{c1,ad,j}); \quad \sigma_{c2,ad,j} = f(\varepsilon_{c2,ad,j}); \quad \sigma_{sx,ad,j} = f(\varepsilon_{x,ad,j}); \quad \sigma_{sy,ad,j} = f(\varepsilon_{y,ad,j}); \\
 & \varepsilon_{x,i} = \varepsilon_{c2,i} \cdot \cos^2 \theta_i + \varepsilon_{c1,i} \cdot \sin^2 \theta_i; \quad \varepsilon_{y,i} = \varepsilon_{c2,i} \cdot \sin^2 \theta_i + \varepsilon_{c1,i} \cdot \cos^2 \theta_i; \\
 & \varepsilon_{x,ad,i} = \varepsilon_{c2,ad,i} \cdot \cos^2 \theta_i + \varepsilon_{c1,ad,i} \cdot \sin^2 \theta_i; \quad \varepsilon_{x,ad,j} = \varepsilon_{c2,ad,j} \cdot \cos^2 \theta_j + \varepsilon_{c1,ad,j} \cdot \sin^2 \theta_j; \\
 & \varepsilon_{y,ad,i} = \varepsilon_{c2,ad,i} \cdot \sin^2 \theta_i + \varepsilon_{c1,ad,i} \cdot \cos^2 \theta_i; \quad \varepsilon_{y,ad,j} = \varepsilon_{c2,ad,j} \cdot \sin^2 \theta_j + \varepsilon_{c1,ad,j} \cdot \cos^2 \theta_j; \\
 & \sigma_{cy,ad,i} = \sigma_{c2,ad,i} \sin^2 \theta_i + \sigma_{c1,ad,i} \cos^2 \theta_i + \rho_{sy,0,ad} \sigma_{sy,ad,i} + \rho_{sy,ad} \sigma_{sy,ad,j}; \\
 & \sigma_{cy,ad,j} = \sigma_{c2,ad,j} \sin^2 \theta_j + \sigma_{c1,ad,j} \cos^2 \theta_j + \rho_{sy,0,ad} \sigma_{sy,ad,i} + \rho_{sy,ad} \sigma_{sy,ad,j}; \\
 & \tau_{xy,ad,i} = (-\sigma_{c2,ad,i} + \sigma_{c1,ad,i}) \cdot \sin \theta_i \cos \theta_i; \quad \tau_{xy,ad,j} = (-\sigma_{c2,ad,j} + \sigma_{c1,ad,j}) \cdot \sin \theta_j \cos \theta_j; \\
 & \sigma_{cx,i} = \sigma_{c1,i} - (\tau_{xy,i[\square]} + \tau_{xy,ad,i}) / \tan \theta_i; \quad \sigma_{cx,ad,j} = \sigma_{c1,ad,j} - \tau_{xy,ad,j} / \tan \theta_j,
 \end{aligned} \right.$$

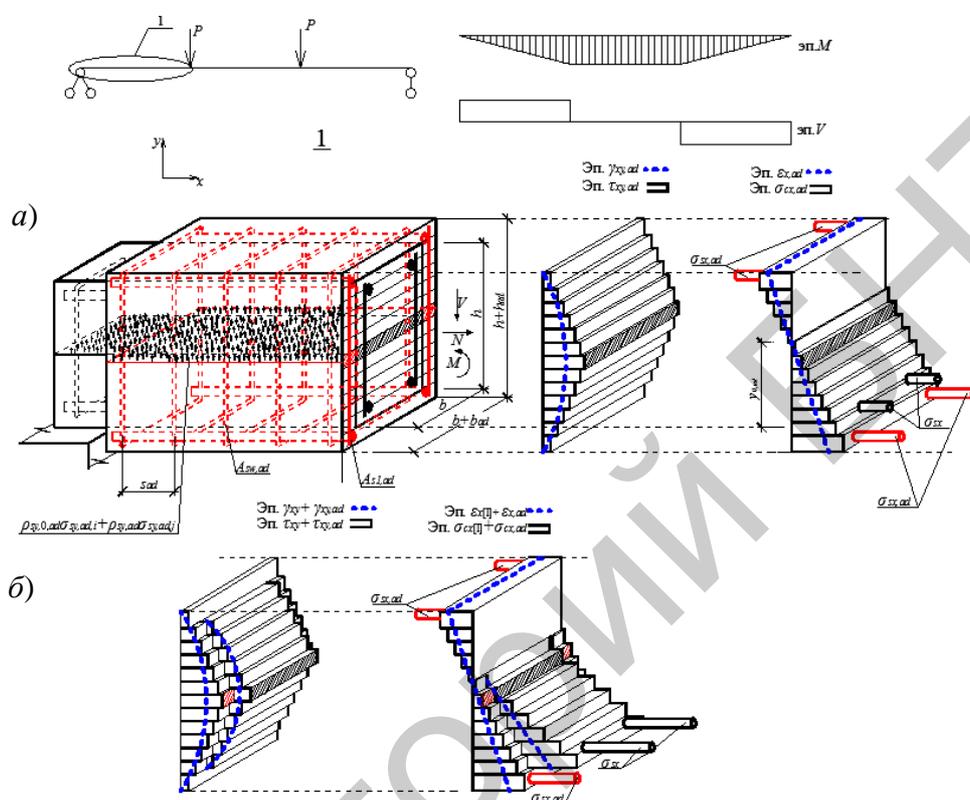
где $\sigma_{cx,ad,j}$, $\sigma_{sx,ad,j}$ – соответственно проекция на продольную ось усиленного элемента нормальных напряжений в j -й элементарной площадке дополнительного бетона, нормальные напряжения в j -м арматурном стержне дополнительной продольной арматуры, МПа; $b_{ad,j}$, $h_{ad,j}$ – соответственно ширина, высота j -й элементарной площадки дополнительного бетона, мм; $A_{s,ad,j}$ – площадь поперечного сечения j -го стержня дополнительной продольной арматуры, мм²; $y_{c,ad,j}$, $y_{s,ad,j}$ – расстояние от выбранной оси соответственно до центра тяжести j -й элементарной площадки дополнительного бетона, j -го стержня

дополнительной продольной арматуры, мм; $y_{0,ad}$ – расстояние от выбранной оси до центра тяжести сечения усиленного элемента, мм; ΔN , ΔM , ΔV – приращения внутренних усилий в изгибаемом железобетонном элементе от приращения нагрузки, приложенной после его усиления, Н, Н·мм, Н; $1/r_{ad}$ – кривизна элемента, усиленного в зоне среза, от приращения внутренних усилий, 1/мм; $\tau_{xy,ad,i}$, $\tau_{xy,ad,j}$ – касательные напряжения соответственно в бетоне i -й элементарной площадки основного бетона, в j -й элементарной площадке дополнительного бетона от приращения комбинации внутренних усилий, МПа; $\tau_{xy,i[I]}$, $\varepsilon_{x,i[I]}$, $\varepsilon_{y,i[I]}$ – соответственно касательные напряжения, проекция относительных деформаций на продольную ось элемента в i -й элементарной площадке бетона или в i -м стержне продольной арматуры, проекция относительных деформаций на поперечную ось элемента в i -й элементарной площадке основного бетона с учетом поперечной арматуры, полученные на первой стадии расчета, МПа, мм/мм; $\varepsilon_{x,ad,i}$, $\varepsilon_{x,ad,j}$ – проекции относительных деформаций на продольную ось элемента соответственно в i -й элементарной площадке основного бетона или в i -м стержне основной продольной арматуры, в j -й элементарной площадке дополнительного бетона или в j -м стержне дополнительной продольной арматуры от приращения внутренних усилий, мм/мм; $\varepsilon_{c1,ad,i}$, $\varepsilon_{c1,ad,j}$ – относительные деформации по направлению главных растягивающих напряжений соответственно в i -й элементарной площадке основного бетона, в j -й элементарной площадке дополнительного бетона от приращения внутренних усилий, мм/мм; $\varepsilon_{c2,ad,i}$, $\varepsilon_{c2,ad,j}$ – относительные деформации по направлению главных сжимающих напряжений соответственно в i -й элементарной площадке основного бетона, в j -й элементарной площадке дополнительного бетона от приращения внутренних усилий, мм/мм; $E'_{sx,ad,y}$, $E'_{sy,ad,j}$, $A'_{s,ad,j}$ – соответственно секущие модули деформаций дополнительной продольной и поперечной арматуры, площадь поперечного сечения j -го стержня дополнительной продольной арматуры, МПа, мм²; θ_j – угол наклона главных напряжений по отношению к продольной оси в j -й элементарной площадке дополнительного бетона после усиления, рад.

На рисунке 3 представлено распределение касательных и нормальных относительных деформаций и напряжений в изгибаемом железобетонном элементе, усиленном в зоне среза, на второй стадии работы.

При усилении изгибаемого железобетонного элемента в зоне среза путем установки дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры между первой и второй стадиями работы вводится промежуточная стадия, на которой напряженно-деформированное состояние изгибаемого железобетонного элемента, усиленного в зоне среза, определяется воздействием внешней нагрузки в момент усиления и усилием обжатия дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры. При усилении изгибаемого железобетонного элемента в зоне среза путем увеличения поперечного се-

чения с установкой дополнительной поперечной арматуры без предварительного напряжения расчет выполняется согласно системе уравнений (2), учитывая проекции относительных деформаций на продольную и поперечную оси элемента, а также касательные напряжения $\varepsilon_{x,i[II]} = \varepsilon_{xp,i}$, $\varepsilon_{y,i[II]} = \varepsilon_{yp,i}$, $\tau_{xy,i[II]} = \tau_{xyp,i}$ в каждой элементарной площадке, полученные на этой промежуточной стадии расчета.



а – от приращения нагрузки после усиления; б – от полной нагрузки после усиления

Рисунок 3 – Распределение касательных и нормальных относительных деформаций и напряжений в изгибаемом железобетонном элементе, усиленном в зоне среза, на второй стадии работы (после усиления)

Последовательно увеличивая внутренние усилия в их комбинации, действующие в расчетном сечении, устанавливают значение, соответствующее образованию трещин в бетоне в зоне среза. Нагрузка, при которой относительные деформации ε_{c1} по направлению главных растягивающих напряжений в бетоне хотя бы в одной элементарной площадке основного или дополнительного бетона достигают значения, соответствующего его прочности при растяжении по принятым диаграммам деформирования, соответствует началу образования трещин.

Максимальное значение нагрузки, при которой выполняются все условия системы уравнений (2), соответствует прочности изгибаемого железобетонного элемента, усиленного в зоне среза. Для поиска наиболее опасного сечения в зоне среза рассматриваются несколько сечений по длине зоны среза элемента с различным сочетанием внутренних усилий $N + \Delta N$, $M + \Delta M$, $V + \Delta V$. При этом для бетона зоны среза принимаются зависимости, описывающие диа-

граммы деформирования для двухосного напряженного состояния сжатия-растяжения. Для продольной и поперечной арматуры используются зависимости, описывающие напряженно-деформированное состояние в условиях одноосного растяжения или сжатия.

Для каждой стадии работы изгибаемого железобетонного элемента, усиленного в зоне среза, разработаны алгоритмы расчета, которые реализованы [1] в виде программы на ЭВМ.

В четвертой главе приведены особенности деформирования под нагрузкой, картина трещинообразования и формы разрушения опытных образцов, усиленных в зоне среза, а также сравнение теоретических и опытных данных, полученных в результате эксперимента.

Наклонные трещины в опытных образцах Б-I-2, Б-II-2, Б-III-2 появлялись при значительно больших усилиях от действующей нагрузки (в 1,37–1,85 раза), а ширина их раскрытия при одной и той же комбинации внутренних усилий, действующей в зоне среза, уменьшилась по сравнению с эталонными образцами Б-I-1, Б-II-1, Б-III-1 (до 6 раз). Наклонные трещины появлялись в бетоне зоны среза в средней части по высоте опытных образцов между стержнями основной и дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры. При этом положительное влияние дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры на уменьшение ширины раскрытия наклонных трещин возрастало с увеличением пролета среза. Расстояния между наклонными трещинами в зоне среза опытных образцов Б-I-2, Б-II-2, Б-III-2 уменьшились, а количество наклонных трещин в зоне среза увеличилось по сравнению с соответствующими эталонными образцами.

Характер трещинообразования опытных образцов Б-I-3, Б-II-3, Б-III-3, усиленных под нагрузкой, на начальных этапах до усиления аналогичен характеру работы эталонных образцов. После установки и предварительного напряжения дополнительной поперечной арматуры ширина раскрытия наклонных трещин не изменялась. При дальнейшем увеличении нагрузки развитие критических наклонных трещин по их длине и ширине не происходило на протяжении ряда этапов нагружения, но в это время появлялись соседние наклонные трещины. На этапах, предшествующих разрушению, возобновлялось развитие критических наклонных трещин. Расстояние между наклонными трещинами в зоне среза опытных образцов Б-I-3, Б-II-3, Б-III-3 больше, чем в опытных образцах Б-I-2, Б-II-2, Б-III-2. Угол наклона к продольной оси критических наклонных трещин оставался неизменным с момента их образования на стадии работы до усиления.

Характер работы стержней поперечной арматуры в опытных образцах Б-I-2, Б-II-2, Б-III-2 в основном совпадает с характером работы стержней поперечной арматуры в эталонных образцах. Отличием является менее интенсивное увеличение относительных деформаций в основной поперечной арма-

туре с увеличением внешней нагрузки, связанное с положительным влиянием дополнительной предварительно напряженной арматуры.

Распределения относительных сдвиговых деформаций бетона по высоте поперечного сечения опытного образца Б-II-2, полученные в результате обработки измеренных относительных деформаций бетона с помощью тензOMETРИЧЕСКИХ РОЗЕТОК на стадиях до образования наклонных трещин, близки с расчетными (рисунок 4).

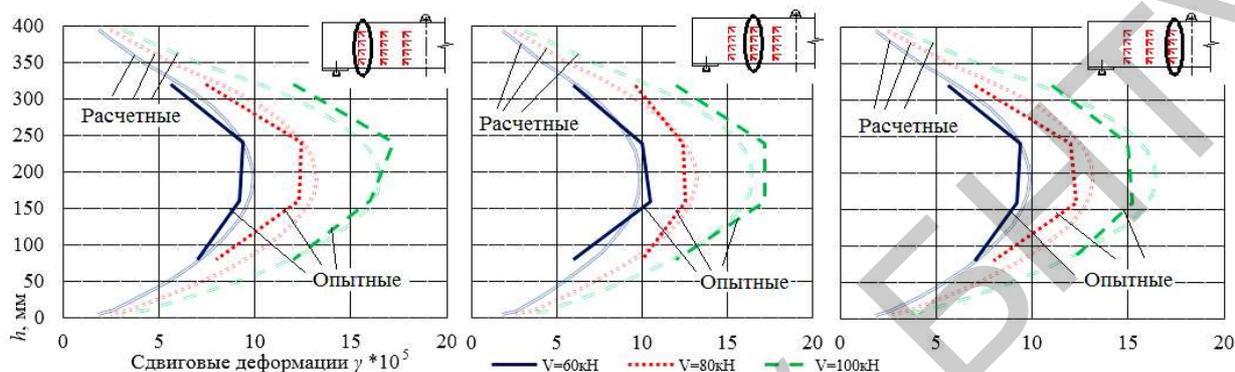


Рисунок 4 – Распределение по высоте поперечного сечения относительных сдвиговых деформаций в бетоне опытного образца Б-II-2 (опытные и расчетные значения)

После усиления опытных образцов Б-IV-2 и Б-IV-3 с наклонными трещинами соответственно с предварительной разгрузкой и под нагрузкой начало наклонной трещины и угол ее наклона совпадали с имеющимися наклонными трещинами в усиливаемых образцах перед усилением. При деформировании под нагрузкой отмечено более позднее появление критической наклонной трещины в бетоне усиливающих частей и более стремительное ее развитие для опытного образца Б-IV-3, усиленного под нагрузкой, по сравнению с образцом Б-IV-2, усиленного после разгрузки. При разрушении нарушения контакта между бетоном усиливаемых опытных образцов Б-IV-2 и Б-IV-3 и дополнительными усиливающими элементами не наблюдалось.

Экспериментальные исследования показали, что опытные образцы, усиленные в зоне среза путем установки дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры, а также путем наращивания поперечного сечения со стороны боковых граней дополнительным поперечно армированным бетоном, разрушились в зоне среза по критической наклонной трещине с достижением в основной и дополнительной поперечной арматуре относительных деформаций, соответствующих пределу текучести.

Для опытных образцов проводили сопоставление опытных и расчетных значений поперечного усилия, соответствующих их прочности, образованию наклонных трещин, ширины их раскрытия на уровне центра тяжести основной и дополнительной поперечной арматуры. Ширина раскрытия наклонных трещин сравнивалась при действии эксплуатационных нагрузок. Величины

этих нагрузок получали путем деления значений расчетных нагрузок на коэффициент безопасности по нагрузке, равный 1,5. Расчетные нагрузки определяли по действующим нормам с использованием расчетных характеристик материалов, т.е. как при реальном проектировании.

Результаты сопоставления опытных данных с результатами расчета прочности опытных образцов по методу предельного равновесия, методике расчета на основе метода предельного равновесия усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов, эмпирически учитывающей выполнение усиления под нагрузкой, методу ферменной аналогии и предлагаемой методике приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Сопоставление результатов расчета поперечного усилия V_{th} , соответствующего прочности опытных образцов в зоне среза, с опытными данными V_{exp}

Шифр образца	V_{exp} , кН	V_{th} , кН ①	$\frac{V_{exp}}{V_{th}}$ ①	V_{th} , кН ②	$\frac{V_{exp}}{V_{th}}$ ②	V_{th} , кН ③	$\frac{V_{exp}}{V_{th}}$ ③	V_{th} , кН ④	$\frac{V_{exp}}{V_{th}}$ ④
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	384	1,2	143,44	3,21	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	344,7	0,97	143,44	2,34	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	316,7	0,93	143,44	2,06	276,4	1,07
Б-IV-1	71,12	72,7	0,98	–	–	12,64	5,63	64,4	1,10
Б-IV-2	127,53	147,2	0,87	92,41	1,38	37,92	3,36	125,6	1,02
Б-IV-3	129,98	147,2	0,88	92,41	1,41	37,92	3,43	121,3	1,07
Б-IV-4*	112,81	159,6	0,71	–	–	37,92	2,97	132,6	0,85

① – метод предельного равновесия; ② – методика расчета на основе метода предельного равновесия усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов, эмпирически учитывающая выполнение усиления под нагрузкой; ③ – метод ферменной аналогии; ④ – предлагаемая методика;
* – отрыв двух стержней поперечной арматуры в месте точечной сварки в каркасе.

Анализ результатов расчета прочности опытных образцов, усиленных в зоне среза, по предлагаемой методике и их сопоставление с экспериментальными данными показывает удовлетворительную сходимость (отклонения теоретических значений поперечной силы, соответствующих прочности элемента от опытных, не превышает 10 %). Рассмотренные методы расчета прочности железобетонных элементов в зоне среза в действующих нормативных документах не учитывают особенности деформирования под нагрузкой усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов, что подтверждается результатами сопоставления с опытными данными (таблица 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана новая научно обоснованная методика расчета прочности и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза при действии полной комбинации внутренних усилий для плоского напряженного состояния. Предлагаемая методика позволяет решать практически любые задачи в области усиления зоны среза изгибаемых железобетонных элементов [2, 9, 11]. Методика позволяет учесть начальное напряженно-деформированное состояние усиливаемых в зоне среза элементов, эффект предварительного напряжения дополнительной поперечной арматуры, различные физико-механические и геометрические характеристики усиливаемой и усиливающей частей элемента [2, 4].

2. На основе деформационной модели и положений модифицированной теории полей сжатия сделано дальнейшее развитие метода расчета напряженно-деформированного состояния зоны среза изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза [2, 4, 9–11].

3. На основе принятых предпосылок получены аналитические уравнения напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза путем установки дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры, а также путем наращивания поперечного сечения дополнительным армированным бетоном, и разработаны алгоритмы автоматизированного расчета [1, 4, 9–11].

4. Получены новые экспериментальные данные о характере разрушения, особенностях деформирования, образования и развития трещин изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза (в том числе под нагрузкой), в результате комплексных испытаний балок при различных способах усиления [6, 7], что подтвердило правильность принятых предпосылок и результатов теоретических исследований [3, 4, 8].

5. Экспериментально подтверждена достоверность предлагаемой методики расчета прочности и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза, при действии комбинации поперечного усилия и изгибающего момента, с учетом начального напряженно-деформированного состояния усиливаемых элементов, предварительного напряжения дополнительной поперечной арматуры, различных физико-механических и геометрических характеристик материалов усиливаемой и усиливающей частей сечения изгибаемых железобетонных элементов [3, 4].

6. Экспериментально подтверждена эффективность усиления в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов путем установки дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры, а также путем на-

ращивания поперечного сечения дополнительным бетоном и поперечной арматурой с обеспечением совместной работы бетона дополнительных усиливающих элементов с бетоном усиливаемых элементов с помощью бетонных шпонок (повышение прочности до 1,83 раза, трещиностойкости по образованию трещин – в 1,85 раза) [3, 5, 8].

7. Анализ результатов расчета прочности и трещиностойкости опытных образцов, усиленных в зоне среза, по предлагаемой методике и их сопоставление с экспериментальными данными показывают лучшую сходимость по сравнению с известными методиками расчета (отклонение теоретических значений поперечной силы, соответствующих прочности и образованию наклонных трещин в зоне среза образцов, от опытных не превышает соответственно 10 и 24 %) [3].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Результаты диссертационной работы [2, 4] могут использоваться в научно-исследовательских и проектных организациях при оценке технического состояния и проектировании усиления эксплуатируемых изгибаемых железобетонных конструкций в зоне среза.

2. Предлагаемая методика расчета [2, 4] прочности и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза, при действии полной комбинации внутренних усилий может быть принята для нормативных и рекомендательных документов в области усиления железобетонных конструкций.

3. Результаты диссертационной работы [1, 2, 4] могут быть использованы в учебном процессе при обучении студентов специальностей 1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство» в дисциплине «Проектирование реконструкции зданий и сооружений».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные издания, включенные в перечень ВАК Республики Беларусь

1. Глухов, Д. О. Применение мягких вычислений для сглаживающей аппроксимации сложных сингулярных зависимостей / Д. О. Глухов, Е. Д. Лазовский, Т. М. Глухова, Г. А. Самощенко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия С. Фундаментальные науки. – 2012. – № 12. – С. 2–5.

2. 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. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2012. – № 16. – С. 40–45.

3. Лазовский, Е. Д. Экспериментально-теоретические исследования прочности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза установкой дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры / Е. Д. Лазовский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2013. – № 16. – С. 51–60.

4. 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. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2013. – № 16. – С. 33–39.

Материалы конференций

5. Лазовский, Е. Д. Усиление изгибаемых железобетонных конструкций в зоне среза / Е. Д. Лазовский // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров : сб. науч. ст. / ГрГУ им. Я. Купалы ; редкол. : Т. М. Пецольт, Е. А. Ровба [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2010. – С. 108–111.

6. Lazouski, Y. Shear capacity of strengthened concrete beams / Y. Lazouski, D. Glukhov // National and European dimension in research : Materials of junior researchers' II conference. In 2 parts. Part 2. Technology. – Novopolotsk : PSU, 2010. – P. 17–19.

7. Пецольт, Т. М. Прочность изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза / Т. М. Пецольт, Е. Д. Лазовский // Проблемы современного бетона и железобетона : материалы III междунар. симпоз. : в 2-х т. Т. 1. – Минск: «Минскпроект», 2011. – С. 288–297.

8. Lazouski, Y. Shear capacity of concrete beams, strengthened with the external steel reinforcement and section enlargement / Y. Lazouski, D. Gluhov // National and European dimension in research : Materials of junior researchers' III conference. In 3 parts. Part 3. Economics. Civil Engineering. – Novopolotsk : PSU, 2011. – P. 105–110.

9. Lazouski, Y. The analysis of the existing bending reinforced concrete elements shear zone design procedures / Y. Lazouski, T. Petsold // National and European dimension in research : Materials of junior researchers' IV conference. Polotsk State University. – Novopolotsk : PSU 2012. – P. 33–36.

10. Пецольт, Т. М. Методика расчета изгибаемых железобетонных элементов в зоне среза, основанная на модифицированной теории полей сжатия / Т. М. Пецольт, Е. Д. Лазовский, И. В. Лазовская // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : сб. тр. XVIII междунар. науч.-метод. семинара : в 2-х т. ; под общ. ред. Д. Н. Лазовского, А. И. Колтунова. – Новополоцк : ПГУ, 2012. – Т. I. – С. 30–34.

11. Lazouski, Y. The design procedure for reinforced concrete bending elements, strengthened in shear zone / Y. Lazouski, T. Petsold // National and European dimension in research : Materials of junior researchers' V conference. Polotsk State University. – Novopolotsk : PSU 2013. – P. 68–72.

РЭЗІЮМЭ

Лазоўскі Ягор Дзмітрыевіч

УЗМАЦНЕННЕ ЗГІБАЕМЫХ ЖАЛЕЗАБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАЎ У ЗОНЕ ЗРЭЗУ

Ключавыя словы: згібаемы жалезабетонны элемент, узмацненне ў зоне зрэзу, трываласць, трэшчынастойкасць, методыка разліку, мадыфікаваная тэорыя палёў сціску, агульная дэфармацыйнай мадэль.

Мэта дысертацыйнага даследавання заключаецца ў распрацоўцы і эксперыментальнай праверцы навукова абгрунтаванай методыкі разліку згібаваных жалезабетонных элементаў, узмоцненых у зоне зрэзу, на аснове мадыфікаванай тэорыі палёў сціску і агульнай дэфармацыйнай мадэлі. Мэта дасягаецца шляхам прымянення эксперыментальных і тэарэтычных метадаў даследавання.

У дысертацыі прапануецца методыка разліку трываласці і трэшчынастойкасці згібаваных жалезабетонных элементаў, узмоцненых у зоне зрэзу, пры дзеянні поўнай камбінацыі ўнутраных намаганняў для плоскага напружанага стану. Прапанаваная методыка дазваляе вырашаць практычна любыя задачы ў галіне ўзмацнення зоны зрэзу згібаваных жалезабетонных элементаў. Методыка дазваляе ўлічыць пачатковы напружана-дэфармаваны стан узмоцненых у зоне зрэзу элементаў, эфект папярэдняга напружання дадатковай папярочнай арматуры, розныя фізіка-механічныя і геаметрычныя характарыстыкі ўзмацненых і ўзмацняючых частак элемента.

Атрыманы новыя эксперыментальныя дадзеныя аб характары разбурэння, асаблівасцях дэфармавання, паяўлення і развіцця трэшчын, а таксама аналітычныя ўраўненні напружана-дэфармаванага стану згібаваных жалезабетонных элементаў, узмоцненых у зоне зрэзу шляхам устаноўкі дадатковай папярэдне напружанай папярочнай арматуры, а таксама шляхам нарошчвання папярочнага сячэння дадатковым арміраваным бетонам, у тым ліку пад нагрукай. Распрацаваны алгарытмы аўтаматызаванага разліку.

Вынікі работы могуць быць выкарыстаны пры праектаванні ўзмацнення зоны зрэзу згібаваных жалезабетонных элементаў.

РЕЗЮМЕ

Лазовский Егор Дмитриевич

УСИЛЕНИЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗОНЕ СРЕЗА

Ключевые слова: изгибаемый железобетонный элемент, усиление в зоне среза, прочность, трещиностойкость, методика расчета, модифицированная теория полей сжатия, общая деформационная модель.

Цель диссертационного исследования заключается в разработке и экспериментальной проверке научно обоснованной методики расчета изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза, на основе модифицированной теории полей сжатия и общей деформационной модели. Цель достигается путем применения экспериментальных и теоретических методов исследования.

В диссертации предлагается методика расчета прочности и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза, при действии полной комбинации внутренних усилий для плоского напряженного состояния. Предлагаемая методика позволяет решать практически любые задачи в области усиления зоны среза изгибаемых железобетонных элементов. Методика позволяет учесть начальное напряженно-деформированное состояние усиливаемых в зоне среза элементов, эффект предварительного напряжения дополнительной поперечной арматуры, различные физико-механические и геометрические характеристики усиливаемой и усиливающей частей элемента.

Получены новые экспериментальные данные о характере разрушения, особенностях деформирования, образования и развития трещин, а также аналитические уравнения напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза путем установки дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры, а также путем наращивания поперечного сечения дополнительным армированным бетоном, в том числе под нагрузкой. Разработаны алгоритмы автоматизированного расчета.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании усиления зоны среза изгибаемых железобетонных элементов.

SUMMARY

Lazouski Yahor

STRENGTHENING OF BENDING REINFORCED CONCRETE ELEMENTS IN SHEAR ZONE

Keywords: bending reinforced concrete element, strengthening in shear zone, strength, fracture toughness, calculation method, modified compression field theory, general deformation model

The purpose of the dissertation research is the development and experimentally testing scientific substantiation of a calculation method for bending reinforced concrete elements, strengthened in shear zone, based on a modified compression field theory and general deformation model. The aim is achieved by the use of experimental and theoretical study methods.

The dissertation work proposed method of calculating the flexural strength and fracture toughness of concrete elements, reinforced in the shear zone, considering the action of the full internal forces for plane stress combination. The proposed method can solve almost any bending reinforced concrete elements strengthening in shear zone problem. The method allows to take into account the initial stress-strain state of strengthened element shear zone, the effect of prestressed additional transverse reinforcement, various physico-mechanical and geometrical characteristics of the basic and additional elements.

Obtained new experimental data on the destruction form, deformation features, cracks appearing and development, as well as an analytical equation of stress-strain state of bending reinforced concrete elements, strengthened by installing additional prestressed transverse reinforcement, as well as by increasing the cross-section with additional reinforced concrete ethyl, including strengthening under load. Developed automated calculation algorithms.

The results can be used in the design of shear zone strengthening of bending reinforced concrete elements.

Егор Дмитриевич ЛАЗОВСКИЙ

УСИЛЕНИЕ ИЗГИБАЕМЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗОНЕ СРЕЗА

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.23.01 – строительные конструкции,
здания и сооружения

Подписано в печать 15.04.2014. Бумага офсетная. 60×84¹/₁₆. Ризография.
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,04. Тираж 60. Заказ 594.

Издатель и полиграфическое исполнение :
учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

Лицензия ЛИ № 02330/0548568 от 26.06.2009

Лицензия ЛП № 02330/0494256 от 27.05.2009

211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29