

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 624.072.232:539.413

**ГИЛЬ**  
**Артур Иванович**

**СОПРОТИВЛЕНИЕ ИЗГИБУ НЕРАЗРЕЗНЫХ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С КОМБИНИРОВАННЫМ  
АРМИРОВАНИЕМ РАСТЯНУТОЙ ЗОНЫ  
НАД ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ОПОРОЙ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности  
05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения

Брест, 2023

Научная работа выполнена в учреждении образования «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой».

Научный  
руководитель

**ЛАЗОВСКИЙ Егор Дмитриевич,**  
кандидат технических наук, доцент

Официальные  
оппоненты:

**ЛЕОНОВИЧ Сергей Николаевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой строительных материалов  
и технологии строительства Белорусского националь-  
ного технического университета, г. Минск

**ШАЛОБЫТА Николай Николаевич,**  
кандидат технических наук, доцент,  
проректор по научной работе учреждения  
образования «Брестский государственный  
технический университет», г. Брест

Оппонирующая  
организация

Республиканское унитарное предприятие  
«Институт БелНИИС», г. Минск

Защита состоится 2 ноября 2023 года в 11:30 на заседании совета Д 02.09.01 по защите диссертаций при учреждении образования «Брестский государственный технический университет» по адресу: 224017, г. Брест, ул. Московская, 267, ауд. 1/323. Телефон ученого секретаря +375 297203961, e-mail: pavlinna@tut.by.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, следует направлять по адресу: 224017, Республика Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 267 на имя ученого секретаря совета Д 02.09.01 по защите диссертаций.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Брестский государственный технический университет».

Автореферат разослан 26 сентября 2023 г.

Ученый секретарь совета  
Д 02.09.01 по защите диссертаций  
кандидат технических наук, доцент



И.П. Павлова

## ВВЕДЕНИЕ

Современная строительная отрасль Республики Беларусь требует непрерывного роста эффективности производства строительных изделий, снижения трудоемкости и экономических затрат, применения новых прогрессивных материалов и конструкций. Одной из задач по совершенствованию строительных конструкций является расширение области применения композитной неметаллической стержневой арматуры (далее композитная арматура) в изгибаемых железобетонных конструкциях.

Композитная арматура имеет ряд достоинств по сравнению со стальной: высокое сопротивление растяжению, коррозионную стойкость, устойчивость к воздействиям отдельных видов кислот, щелочей, солей и сернистых газов, диэлектрическую проницаемость, малый удельный вес. Однако, ее повышенная деформативность ограничивает применение данного вида армирования в изгибаемых железобетонных конструкциях.

Одним из решений названной проблемы является применение комбинированного армирования изгибаемых железобетонных элементов – установка в растянутой зоне, кроме композитной арматуры, некоторого количества стальной арматуры. Применение комбинированного армирования позволяет эффективно использовать композитную арматуру в неразрезных изгибаемых железобетонных элементах в растянутой зоне над промежуточной опорой с установленной степенью перераспределения усилий под нагрузкой.

Ограничивающими факторами для применения в строительной отрасли Республики Беларусь данного вида армирования являются отсутствие методики расчета конструкций, армированных композитными и стальными стержнями, верифицированной экспериментальными исследованиями, и условий ее применения в комбинированном армировании растянутой зоны над промежуточной опорой неразрезных железобетонных балок.

Таким образом, разработка научно обоснованной методики расчета неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием композитной и стальной арматурой растянутой зоны над промежуточной опорой с учетом нелинейной работы материалов, позволяющей учесть перераспределение усилий между пролетами и опорой на любой стадии их работы, установление условий применения композитной арматуры в комбинированном армировании является актуальной задачей строительной науки и практики.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Работа выполнялась в соответствии с Программой Министерства образования Республики Беларусь и учреждения образования «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой» в рамках тем «Совершенствование методов расчета несущих строительных конструкций, оснований и фундаментов, разработка теоретических основ оценки технического состояния и усиления конструкций эксплуатируемых сооружений» (№ ГР 20162587 от 28.06.2016 г., ГУ «БелИСА») и «Новые методы расчета строительных конструкций и оснований зданий и сооружений, совершенствование их конструктивных решений и усиление» (№ ГР 20220381 от 28.03.2022 г., ГУ «БелИСА»).

### **Цель, задачи, объект и предмет исследования**

Целью диссертационного исследования является разработка и экспериментальная проверка научно обоснованной методики расчета сопротивления изгибу неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием композитной и стальной арматурой растянутой зоны над промежуточной опорой, основанной на положениях общей деформационной и блочной моделях сопротивления железобетонного элемента, учитывающей нелинейную работу материалов и позволяющей получить распределение изгибающих моментов по длине неразрезных балок.

Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи:

– выполнен анализ теоретических и экспериментальных исследований физико-механических характеристик композитной арматуры, ее совместной работы с бетоном и опыта ее применения в составе комбинированного армирования растянутой зоны железобетонных изгибаемых элементов;

– разработана методика расчета сопротивления изгибу неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием композитной и стальной арматурой растянутой зоны над промежуточной опорой, основанная на положениях общей деформационной и блочной моделях сопротивления изгибу железобетонного элемента, позволяющая учитывать особенности их работы в зависимости от соотношения предельных усилий в композитной и стальной арматуре;

– разработана научно обоснованная расчетная модель неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием композитной и стальной арматурой растянутой зоны над промежуточной опорой, учитывающая нелинейную работу материалов и позволяющая рассчитать значения параметрических точек зависимости «опорный изгибающий момент – угол поворота» для вычисления распределения изгибающих моментов по длине балок;

– проведены экспериментальные исследования и получены новые данные по характеру перераспределения внутренних усилий между пролетами

и промежуточной опорой в неразрезных балках с учетом выявленных особенностей деформирования при воздействии кратковременной статической нагрузки;

– получена экспериментальная картина трещинообразования, деформирования, распределения осредненных деформаций и разрушения неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой;

– сопоставлены опытные и теоретические зависимости «опорный изгибающий момент – угол поворота» для поперечных сечений над промежуточной опорой неразрезных железобетонных балок при воздействии кратковременной статической нагрузки.

Объект исследования: неразрезные железобетонные балки с комбинированным армированием композитной и стальной арматурой растянутой зоны над промежуточной опорой.

Предмет исследования: напряженно-деформированное состояние в поперечных сечениях неразрезных балок в зоне над промежуточной опорой и распределение изгибающих моментов по длине неразрезных балок с учетом их перераспределения между промежуточной опорой и пролетами.

### **Научная новизна**

1. Разработана научно обоснованная методика для расчета сопротивления изгибу неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием композитной и стальной арматурой растянутой зоны над промежуточной опорой, основанная на методах строительной механики, общей деформационной модели для поперечного сечения с трещиной нормального отрыва и блочной модели сопротивления железобетонного элемента для поперечных сечений между трещинами нормального отрыва.

2. Предложена расчетная модель неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием композитной и стальной арматурой растянутой зоны над промежуточной опорой, которая позволяет получить параметры пластического шарнира в поперечных сечениях с трещиной нормального отрыва над промежуточной опорой в зависимости от соотношения предельных усилий в композитной и стальной арматуре в составе комбинированного армирования в виде зависимости «опорный изгибающий момент – угол поворота».

3. Получены опытные данные по деформированию под нагрузкой, трещинообразованию и разрушению неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой с различным соотношением предельных усилий в композитной и стальной арматуре и сопоставлены с теоретическими данными.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Методика расчета сопротивления изгибу неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием композитной и стальной арматурой растянутой зоны над промежуточной опорой, основанная на положениях общей деформационной модели, использующей в расчетах нелинейные диаграммы деформирования материалов, и блочной модели сопротивления железобетонного элемента на основе зависимостей «касательные напряжения – взаимное проскальзывание» для композитной и стальной арматуры с бетоном, позволяющая учитывать особенности их работы в зависимости от соотношения предельных усилий в композитной и стальной арматуре и критерий разрушения в виде предельного угла поворота поперечного сечения над промежуточной опорой неразрезной балки.

2. Расчетная модель неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием композитной и стальной арматурой растянутой зоны над промежуточной опорой, позволяющая получать параметры пластического шарнира над промежуточной опорой в зависимости от соотношения предельных усилий в композитной и стальной арматуре в составе комбинированного армирования в виде зависимости «опорный изгибающий момент – угол поворота».

3. Алгоритм вычисления параметров напряженно-деформированного состояния поперечных сечений с трещинами нормального отрыва и между ними неразрезных железобетонных балок на всех стадиях работы, в зависимости от соотношения предельных усилий в композитной и стальной арматуре в составе комбинированного армирования растянутой зоны над промежуточной опорой.

4. Результаты впервые проведенного экспериментально-теоретического исследования сопротивления изгибу неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием композитной и стальной арматурой растянутой зоны над промежуточной опорой.

### **Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации**

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, приведенные в диссертационной работе, были получены соискателем самостоятельно при консультации научного руководителя кандидата технических наук, доцента Лазовского Е.Д., который определял основные направления научных исследований и принимал непосредственное участие в обсуждении и анализе полученных результатов.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные результаты диссертации доложены и обсуждены на следующих конференциях и семинарах:

– XX Международный научно-методический семинар «Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров», Гродно, 17-19 февраля 2016 г.

– I Международная научная конференция «Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации», Новополоцк, 5-6 апреля 2018 г.;

– X научно-практическая конференции «European and National dimension in research», Новополоцк, 10-11 мая 2018 г.;

– Международная научная конференция «Актуальные проблемы архитектуры Белорусского Подвинья и сопредельных регионов», Новополоцк, 18-19 октября 2018 г.;

– XXI Международный научно-методический семинар «Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров», Брест, 25-26 октября 2018 г.;

– II Международная научная конференция «Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации», Новополоцк, 28-29 ноября 2019 г.;

– III Международная научная конференция «Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации», Новополоцк, 29-30 апреля 2021 г.;

– II Международная научно-практическая онлайн-конференция «Environmental protection 2021», Киев (Украина), 7 июня 2021 г.

– III Международная научная конференция «Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации», Новополоцк, 20-21 апреля 2022 г.;

– Международная конференция «Проблемы современного строительства», Минск, БНТУ, 24 мая 2022 г.

Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс и научно-исследовательскую деятельность Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой.

#### **Опубликованность результатов диссертации**

По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, из них: 5 статей в рецензируемых научных изданиях, отвечающих требованиям пункта 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, общим объемом 3,0 авторских листа; 8 статей в сборниках научных трудов семинаров и материалов конференций общим объемом 2,0 авторских листа.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация содержит разделы: «Содержание», «Введение», «Общая характеристика работы», 4 главы основной части, «Заключение», «Список использованных источников», «Приложения». Общий объем диссертационной работы с приложениями составляет 142 страницы, включая 64 иллюстрации, 14 таблиц, библиографический список из 171 использованного источника (116 на русском и 55 на английском языках), 13 публикаций соискателя.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**Первая глава** содержит аналитический обзор научно-технической литературы, посвященной особенностям и физико-механическим свойствам композитной арматуры, ее применению в изгибаемых железобетонных элементах, особенностям перераспределения усилий в неразрезных железобетонных балках и их расчету.

Проанализированы исследования физико-механических свойств композитной арматуры на основе высокопрочных волокон и ее работы в изгибаемых железобетонных элементах. По результатам анализа были определены основные преимущества (высокая прочность при растяжении и устойчивость к химическим воздействиям) и недостатки (низкий модуль упругости по отношению к стальной арматуре, низкая огнестойкость, хрупкое разрушение при растяжении) композитной арматуры.

Применение композитной арматуры в растянутой зоне изгибаемых железобетонных конструкций является возможным за счет достаточной прочности сцепления стержня с бетоном. Сцепление обеспечивается за счет адгезии полимерной матрицы стержня и бетона, периодического профиля стержня. Однако, область применения композитной арматуры на основе высокопрочных волокон в изгибаемых железобетонных конструкциях ограничена, т.к. у конструкций отмечены высокая деформативность, низкая трещиностойкость (арматура практически не влияет на появление трещин нормального отрыва, но существенно влияет на их раскрытие). Отмечена возможность хрупкого разрушения конструкций, армированных композитной арматурой.

Целесообразным является использование композитной арматуры на основе высокопрочных волокон в растянутой зоне изгибаемых железобетонных конструкций совместно со стальной арматурой (комбинированное армирование). Применение данного вида армирования позволяет получить пластическую форму разрушения изгибаемого железобетонного элемента и более протяженную стадию пластического деформирования, чем в элементах с эквивалентным (по предельному растягивающему усилию) стальным армированием, что может быть наиболее эффективно при применении в неразрезных железобетонных балках.

Выполнен анализ работы и методов расчета неразрезных железобетонных балок. На современном этапе развития науки о железобетоне работу железобетонных конструкций под нагрузкой описывают нелинейными моделями. Наиболее широко применяются деформационная модель поперечных сечений с трещинами нормального отрыва с использованием диаграмм деформирования бетона и арматуры и блочная модель сопротивления поперечных сечений элемента между трещинами нормального отрыва, рассматривающая



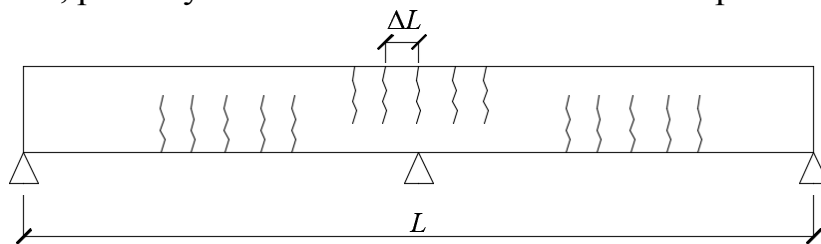
совместную работу арматуры с бетоном с учетом зависимостей «касательные напряжения – взаимное проскальзывание».

Несмотря на обширные исследования в области работы неразрезных железобетонных элементов, отсутствуют исследования неразрезных балочных элементов с комбинированным армированием композитной и стальной арматурой в растянутой зоне над промежуточной опорой и научно обоснованная методика определения их сопротивления изгибу, которая позволит достоверно учесть и определить допустимую степень перераспределения усилий между пролетами и промежуточной опорой, с учётом нелинейной работы материалов, зависимостей взаимного деформирования арматуры и окружающего бетона.

**Вторая глава** посвящена методике расчета сопротивления изгибу неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой, которая учитывает особенности их напряженно-деформируемого состояния в поперечных сечениях над промежуточной (неразрезной) опорой на основе методов строительной механики и параметров зависимости «опорный изгибающий момент – угол поворота».

Для определения параметров напряженно-деформированного состояния в поперечных сечениях разработана расчетная модель, для которой приняты следующие предпосылки базовой блочной модели сопротивления:

– изгибаемый неразрезной железобетонный элемент представляет собой элемент длиной  $L$ , разделенный на подэлементы конечной длины  $\Delta L$  (рисунок 1), образованные двумя соседними трещинами нормального отрыва, которые возникают в поперечных сечениях, где растягивающие напряжения в бетоне достигают предельных значений. Подэлементы связаны между собой сжатым бетоном, растянутой стальной и композитной стержневой арматурой;

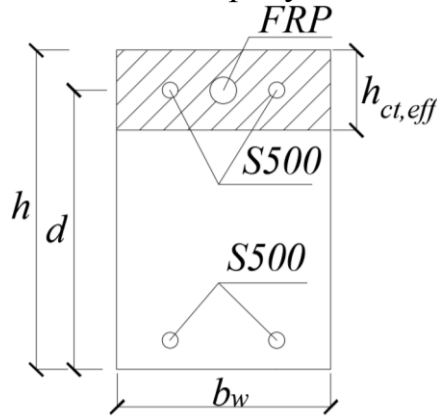


**Рисунок 1.** – Схема разбиения железобетонного элемента на подэлементы

– бетон, композитная и стальная арматура работают совместно в соответствии с принятыми зависимостями «касательные напряжения – взаимное проскальзывание» согласно *Fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Касательные напряжения по площади контакта стального стержня с бетоном и их взаимное проскальзывание связаны по зависимости  $\tau_{bs} = f(s_s)$ , касательные напряжения по площади контакта композитного стержня с бетоном и их взаимное проскальзывание связаны по зависимости  $\tau_{bf} = f(s_f)$ , причем относительные деформации композитной и стальной арматуры в рассматриваемых

поперечных сечениях одинаковы на всех этапах деформирования под нагрузкой;

– растягивающие напряжения в бетоне распределяются по эффективной растянутой площади вокруг стержней. Поперечное сечение балки с комбинированным армированием над промежуточной опорой с эффективной высотой растянутой зоны  $h_{ct,eff}$  представлено на рисунке 2;



**Рисунок 2. – Поперечное сечение балки с комбинированным армированием над промежуточной опорой**

– образование трещин нормального отрыва в растянутой зоне с комбинированным армированием над промежуточной опорой происходит при достижении относительных деформаций бетона на уровне центра тяжести стальной и композитной арматуры значений, соответствующих предельной растяжимости бетона сечения при изгибе;

– в процессе деформирования под нагрузкой выделяют две стадии трещинообразования: неустановившееся трещинообразование, когда появление новых трещин нормального отрыва с увеличением нагрузки возможно, и установившееся – количество трещин с увеличением нагрузки не изменяется;

– ширина раскрытия трещин нормального отрыва  $w_m$  в растянутой зоне над промежуточной опорой неразрезной железобетонной балки обусловлена взаимным проскальзыванием стальных и композитных стержней относительно бетона в уровне их центра тяжести по обе стороны от краев трещины нормального отрыва по длине участка перераспределения растягивающих напряжений.

Напряженно-деформированное состояние в поперечных сечениях неразрезной железобетонной балки с комбинированным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой описывается уравнениями равновесия изгибающих моментов и продольных сил от внешней нагрузки, уравнениями равновесия внутренних усилий в отдельных композитных и стальных стержнях, уравнениями для проскальзывания относительно бетона отдельных стержней, условием распределения относительных

деформаций по высоте поперечного сечения в соответствии с гипотезой плоских сечений Бернулли и зависимостями, описывающими диаграммы деформирования материалов отдельных элементарных площадок бетона, композитной и стальной арматуры. Уравнения напряженно-деформированного состояния представлены в виде следующей системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^k \sigma_{c,i} A_{c,i} (y_0 - y_{c,i}) - \sum_{i=k+1}^m \sigma_{s,i} A_{s,i} (y_0 - y_{s,i}) - \\ - \sum_{i=k+1}^m \sigma_{f,i} A_{f,i} (y_0 - y_{f,i}) - M = 0; \\ \sum_{i=1}^k \sigma_{c,i} A_{c,i} - \sum_{i=k+1}^m \sigma_{s,i} A_{s,i} - \sum_{i=k+1}^m \sigma_{f,i} A_{f,i} = 0; \\ \frac{d\sigma_s(x)}{dx} - \frac{4}{\varnothing_s} \tau_{bs}(x) = 0; \quad \frac{d\sigma_f(x)}{dx} - \frac{4}{\varnothing_f} \tau_{bf}(x) = 0; \\ \frac{ds_s(x)}{dx} - \varepsilon_y(x) = 0; \quad \frac{ds_f(x)}{dx} - \varepsilon_f(x) = 0; \\ \varepsilon_{c,i} = \frac{1}{r_c} (y_0 - y_{c,i}); \quad \varepsilon_{y,i} = \frac{1}{r_c} (y_0 - y_{s,i}); \quad \varepsilon_{f,i} = \frac{1}{r_c} (y_0 - y_{f,i}); \\ \sigma_{c,i} = f(\varepsilon_{c,i}); \quad \sigma_{s,i} = f(\varepsilon_{y,i}); \quad \sigma_{f,i} = f(\varepsilon_{f,i}); \\ \tau_{bs} = f(s_s); \quad \tau_{bf} = f(s_f), \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $\sigma_{c,i}$ ,  $\sigma_{f,i}$ ,  $\sigma_{s,i}$  – соответственно нормальные напряжения в  $i$ -й элементарной площадке бетона, композитной и стальной арматуры, МПа;

$\varepsilon_{c,i}$ ,  $\varepsilon_{f,i}$ ,  $\varepsilon_{y,i}$  – соответственно относительные деформации в  $i$ -й элементарной площадке бетона, композитной стальной арматуры;

$A_{c,i}$ ,  $A_{f,i}$ ,  $A_{s,i}$  – соответственно площадь поперечного сечения  $i$ -й элементарной площадки бетона композитной и стальной арматуры, мм<sup>2</sup>;

$y_{c,i}$ ,  $y_{f,i}$ ,  $y_{s,i}$  – соответственно расстояние от выбранной оси до центра тяжести  $i$ -й элементарной площадки бетона, композитной стальной арматуры, мм;

$1/r_c$  – кривизна балки в рассматриваемом сечении от действия изгибающего момента, рад<sup>-1</sup>;

$\tau_{bf}$ ,  $\tau_{bs}$  – соответственно касательные напряжения от сил сцепления продольной рабочей композитной и стальной арматуры с бетоном в рассматриваемом сечении, МПа;

$s_f$ ,  $s_s$  – соответственно величина взаимного проскальзывания композитной и стальной арматуры с бетоном, мм;

В первой итерации в зоне центрального опорного сечения с комбинированным армированием при действии изгибающего момента  $\Delta M = M_{sup}$ , равному моменту образования трещин нормального отрыва  $M_{cr}$  (при условии образования двух и более трещин), рассматривается положение подэлемента (либо двух подэлементов) образовавшихся слева или справа на расстоянии  $\Delta L$  от центральной трещины. Значение изгибающего момента в поперечных сечениях над промежуточной опорой от действия внешней нагрузки определяется методами строительной механики.

Из решения системы (1) на каждом этапе нагружения, реализуя итерационный процесс последовательного вычисления положения центра тяжести рассматриваемого поперечного сечения  $y_0$ , кривизны элемента в данном сечении  $1/r_c$ , относительных деформаций стальной и композитной арматуры, нормальных напряжений, модулей деформаций в элементарных площадках бетона, стальной и композитной арматуры, получаем параметры напряженно-деформированного состояния неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой. Окончание процесса последовательных приближений на каждом этапе нагружения определяется заданной точностью решения исходных уравнений.

Для определения относительных деформаций композитной и стальной арматуры в растянутой зоне по длине подэлемента на основе принятых предпосылок и зависимостей между касательными напряжениями и взаимными проскальзываниями композитных и стальных стержней с бетоном, выделяется участок бетона со стороны центральной трещины нормального отрыва высотой равной высоте эффективной растянутой зоны поперечного сечения (площадью  $A_{ct,eff} = h_{ct,eff} b_w$ ) с площадью поперечного сечения композитных стержней  $A_f$ , стальных  $A_s$ , длиной  $dx$  (рисунок 3).

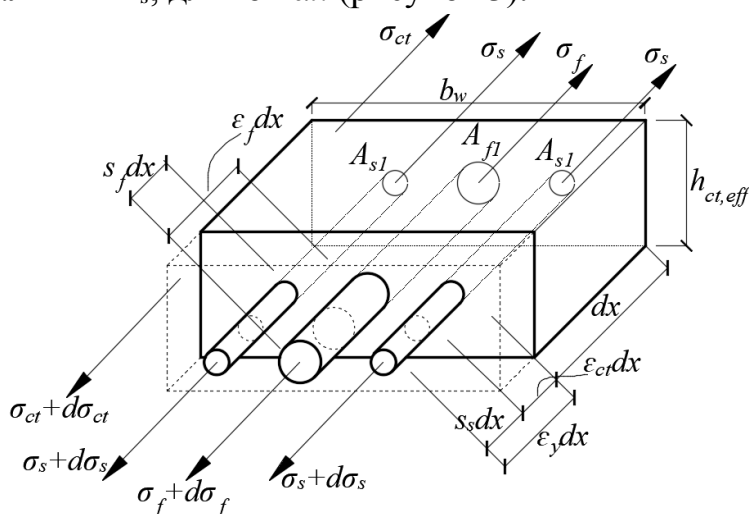


Рисунок 3. – Выделенный участок бетона со стороны центральной трещины

Для решения задачи получения распределения относительных деформаций композитной и стальной арматуры бетонный подэлемент, образованный центральной и ближайшей от нее трещинами нормального отрыва в растянутой зоне над промежуточной опорой, высотой  $h_{ct,eff}$  разделяется  $n$  поперечными сечениями на  $(n-1)$  интервалов длиной  $\Delta x$ . Разделение на интервалы производят таким образом, чтобы их границы на концах бетонного подэлемента совпадали с расположением трещин нормального отрыва рассматриваемой балки. Уравнения равновесия и совместности деформаций для подэлемента, выделенного трещинами нормального отрыва, представляются в виде системы:

$$\begin{cases} \frac{d}{dx} s_s = \varepsilon_y(\sigma_s) - \varepsilon_{ct} \left( \frac{N - \sigma_s A_s}{A_{ct,eff}} \right); & \frac{d}{dx} s_f = \varepsilon_f(\sigma_f) - \varepsilon_{ct} \left( \frac{N - \sigma_f A_f}{A_{ct,eff}} \right); \\ \frac{d}{dx} \sigma_s = \frac{4}{\varnothing} \tau_{bs}(s_s); & \frac{d}{dx} \sigma_f = \frac{4}{\varnothing} \tau_{bf}(s_f), \end{cases} \quad (2)$$

где  $N$  – суммарное растягивающее усилие в композитной и стальной арматуре на рассматриваемом этапе нагружения, Н;

Для решения системы (2) разработан алгоритм, по которому определяют распределение относительных деформаций композитной и стальной арматуры и вычисляют значение кривизны в  $i$ -м сечении по длине рассматриваемого подэлемента:

$$\frac{1}{r_{c,i}} = \frac{\varepsilon_{y(f),i}}{d - x_{c,i}}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{y(f),i}$  – относительные деформации стальной и композитной арматуры;  $d$  – рабочая высота сечения балки, мм;  $x_{c,i}$  – высота сжатой зоны бетона в  $i$ -м сечении, мм.

Для дальнейших расчетов по определению прочности изгибаемого элемента в целом, необходимо получить зависимость «опорный момент – угол поворота» на всех этапах нагружения. При этом угол поворота  $\theta$  можно определить из следующего интегрального уравнения (при известном распределении кривизны по длине участка балки  $l_p$ , включающего один или несколько подэлементов, с началом у центральной трещины нормального отрыва справа или слева):

$$\theta = \int_{l_p} \frac{1}{r_c}(x) dx. \quad (4)$$

Для расчёта неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой предполагается применение метода сосредоточенных деформаций, с учётом полученных зависимостей «изгибающий момент – угол поворота».

**В третьей главе** представлена методика экспериментальных исследований сопротивления изгибу неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой.

Методика экспериментальных исследований включала в себя:

- испытание опытных образцов бетонных призм на сжатие и изгиб для получения фактических значений прочности на осевое сжатие и растяжение, модуля упругости;
- испытание опытных стальных стержней на растяжение для получения диаграммы деформирования;
- испытание опытных композитных стержней на основе стеклянных волокон с использованием стандартных испытательных муфт на растяжение [19] для получения фактических значений предельной прочности, модуля упругости, относительного удлинения при разрыве стержня и построения диаграммы деформирования;
- экспериментальные исследования сопротивления изгибу неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой с различным соотношением предельных усилий в композитной и стальной арматуре.

Исследования проводились на опытных балках прямоугольного поперечного сечения шириной ( $b$ ) 120 мм, высотой ( $h$ ) 190 мм, длиной ( $l$ ) 4000 мм. В качестве варьируемого параметра выбрано соотношение предельного растягивающего усилия композитных стержней к суммарной величине предельного растягивающего усилия комбинированного армирования в растянутой зоне над промежуточной опорой. Были запроектированы и изготовлены шесть опытных неразрезных двухпролетных (величина одного пролета 1800 мм) железобетонных балок с различным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой: эталонная балка Б1Э – стальное, эталонная балка Б2Э – композитное, балки Б3-Б4 – комбинированное композитной и стальной арматурой.

Для раскрытия статической неопределимости в качестве промежуточной опоры использовался образцовый динамометр ДОР-50. Значение угла поворота опорного поперечного сечения возле центральной трещины относительно горизонтальной оси определялось электронными инклинометрами, которые были установлены на верхней грани опытных балок на расстоянии  $0,6h$  от оси промежуточной опоры. Для определения прогибов балки были установлены прогибомеры 6ПАО (цена деления 0,01 мм) по длине пролетов под приложенными силами. Возможные осадка опорных конструкций и деформирование опорных зон опытных балок контролировались прогибомерами 6ПАО, установленными на всех опорах. Ширина раскрытия трещин определялась отсчетным микроскопом МПБ-2 (цена деления 0,05 мм). Относительные деформации по высоте центральной зоны над промежуточной опорой опреде-

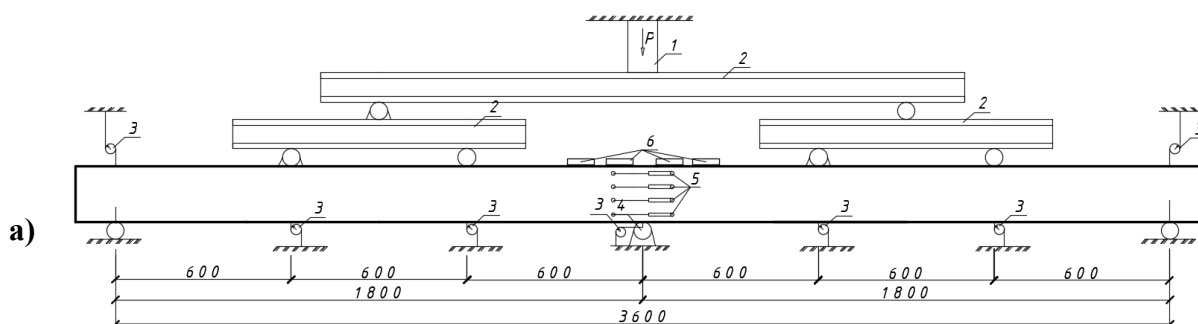
лялись при помощи четырёх датчиков деформаций (цена деления 0,001 мм), подключенных к системе комплексного мониторинга «Терем – 4».

Характеристики опытных балок представлены в таблице 1, схема расстановки приборов и внешний вид опытной балки при испытании представлен на рисунке 4.

Таблица 1. – Характеристики опытных балок

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

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



1 – гидравлический домкрат; 2 – распределительная траверса; 3 – прогибомер БПАО;  
 4 – образцовый динамометр ДОР-50; 5 – датчики деформаций системы «Терем-4»;  
 6 – электронный инклинометр.

Рисунок 4. – Схема расстановки приборов (а)  
 и внешний вид опытной балки при испытании (б)

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований и их анализ.

Испытания опытных балок позволили установить картину трещинообразования в зоне над промежуточной опорой и в пролете. Образование первых трещин в растянутой зоне над промежуточной опорой и в пролете во всех опытных балках происходило при внешней нагрузке, равной 10-15% от разрушающей. Анализ результатов свидетельствует, что при увеличении соотношения предельных усилий в композитной и стальной арматуре комбинированного армирования над промежуточной опорой увеличивается ширина раскрытия первых трещин при их образовании, происходит их более интенсивное развитие при увеличении внешней нагрузки. Расстояние между трещинами в зоне над промежуточной опорой, исходя из результатов эксперимента, практически не зависело от соотношения предельных усилий в композитной и стальной арматуре комбинированного армирования над промежуточной опорой.


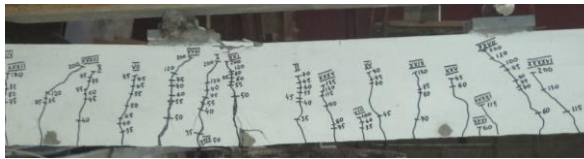
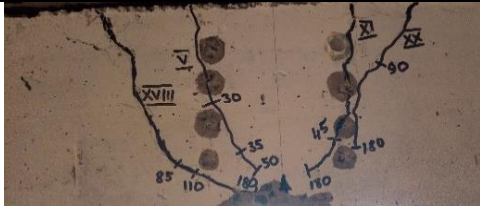
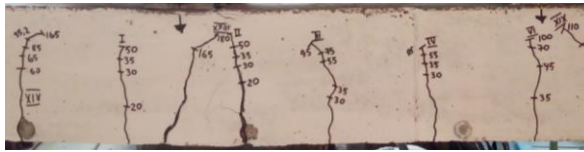
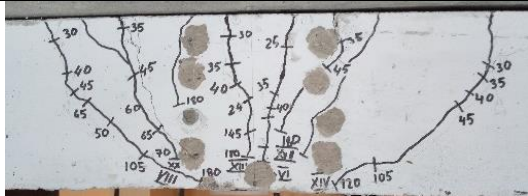
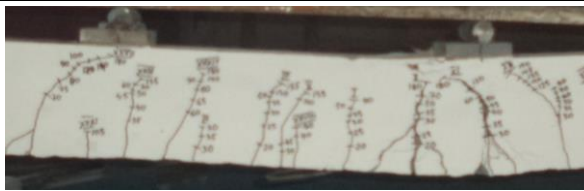

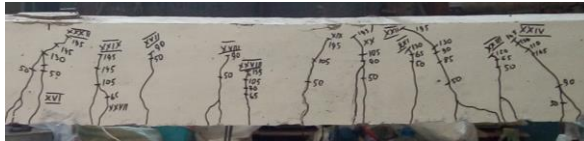
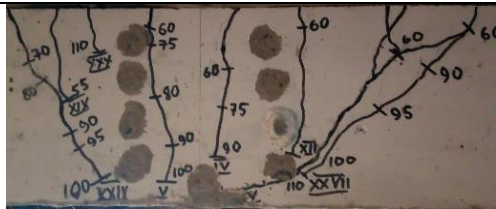
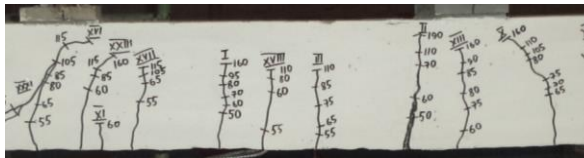

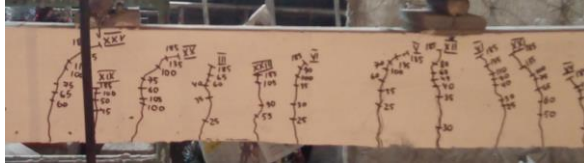
Общий вид зоны над промежуточной опорой и пролете опытных балок после разрушения с отмеченными трещинами представлены в таблице 2.

Разрушение всех опытных балок происходило по растянутой зоне в пролетах при достижении стальной арматурой величины растягивающего усилия, превышающего ее предел текучести. Характер разрушения всех опытных балок не зависел от армирования и ничем не отличался. Критическая трещина образовывалась в пролетах балок в зоне действия максимального изгибающего момента под сосредоточенной силой вблизи крайних опор. Предельная внешняя нагрузка всех опытных балок при разрушении соответствовала пролетному изгибающему моменту от 22,23 кНм до 25,97 кНм.

Испытания балок позволили определить особенности их деформирования. На первых этапах нагружения во всех опытных балках отмечалась линейная зависимость увеличения прогибов от приложенной нагрузки (приращение прогибов на каждом этапе нагружения составило в среднем 0,1 мм). Данная стадия работы продолжалась до образования первых трещин в пролете и над промежуточной опорой. После образования первых трещин в пролете и над промежуточной опорой во всех опытных балках происходило увеличение приращения прогибов на одном этапе нагружения (приращение в среднем составило 0,2 мм). Величина приращения прогибов не зависела от армирования растянутой зоны над промежуточной опорой. Соотношение предельных усилий в композитной и стальной арматуре комбинированного армирования в растянутой зоне над промежуточной опорой не повлияло на деформативность опытных балок в пролете на начальной (до образования трещин) и конечной (стальная арматура в пролетах переходила в стадию упрочнения) стадиях работы, и балка работала аналогично балке с полностью стальным армированием в растянутой зоне над промежуточной опорой.



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

Балка	Опора	Пролет
Б1Э		
Б2Э		
Б3		
Б4		
Б5		
Б6		

Примечание: арабскими цифрами отмечена величина приложенной нагрузки, кН; римскими цифрами отмечены номера трещин.

В результате измерения деформаций в растянутой зоне над промежуточной опорой, были выявлены особенности деформирования рассматриваемой зоны балок. На первых этапах нагружения (до образования первых трещин) рост относительных деформаций в сжатой и растянутой зонах над промежуточной опорой происходил прямо пропорционально увеличению опорного изгибающего момента (на одном этапе нагружения в растянутой зоне приращение относительных деформаций составило 0,05‰, в сжатой – 0,01‰). После появления первых трещин отмечен рост относительных деформаций в растянутой и сжатой зонах. Величина

приращения относительных деформаций при равном приращении изгибающих моментов зависела от соотношения предельных усилий в композитной и стальной арматуре комбинированного армирования в растянутой зоне над промежуточной опорой и составила в балке Б1Э – 0,11‰, в Б2Э – 0,96‰, в Б3 – 0,11‰, в Б4 – 0,12‰, в Б5 – 0,15‰, в Б6 – 0,17‰.

Следует отметить, что для опытных балок Б3-Б6 выделена стадия работы, при которой рост величины приращения относительных деформаций в растянутой зоне над промежуточной опорой происходил без изменения величины действующего изгибающего момента. В Б3 данная стадия начиналась при достижении относительных деформаций 2,15‰, в Б4 – 2,11‰, в Б5 – 2,1‰, в Б6 – 2,07‰. Таким образом, при увеличении соотношения предельных усилий в композитной и стальной арматуре комбинированного армирования пластические деформации в балке более интенсивно развивались на ранних этапах нагружения. Изменение данного соотношения дает возможность регулировать изгибную жесткостью растянутой зоны балок над промежуточной опорой.

В результате измерения углов поворота центрального опорного поперечного сечения при нагружении внешней нагрузкой неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой были получены опытные зависимости «опорный изгибающий момент – угол поворота». Анализ результатов позволил выделить характерные стадии работы опорного участка неразрезных балок: работа без трещин (практически упругая стадия), работа с трещинами (стадия первичного трещинообразования) и последующая стадия пластического деформирования с развитием уже имеющихся трещин. В стадии пластического деформирования, при начале текучести стальной арматуры в составе комбинированного армирования, происходит увеличение угла поворота сечения над промежуточной опорой, а композитная арматура начинает воспринимать все большие растягивающие усилия, используя потенциал пластического деформирования зоны над промежуточной опорой, и способствует достижению дополнительного перераспределения изгибающих моментов между пролетами и промежуточной опорой и восприятию дополнительной внешней нагрузки.

В результате измерения относительных деформаций по высоте поперечного сечения над промежуточной опорой опытных балок при нагружении внешней нагрузкой была подтверждена гипотеза плоских сечений для части балки, включающего трещины и участки между ними.

В ходе исследований были получены значения предельных углов пластического поворота поперечного сечения над промежуточной опорой и их зависимость от соотношения значений высоты сжатой зоны бетона после перераспределения усилий ( $x_u$ ) к значениям рабочей высоты сечения над промежу-

точной опорой ( $d$ ). Полученные зависимости углов поворота от соотношения ( $x_u/d$ ) сравнивались с установленными допускаемыми зависимостями для стальной арматуры в соответствии с СП 5.03.01-2020 «Бетонные и железобетонные конструкции» и с зависимостями для неразрезных балок с соотношением предельных усилий в композитной и стальной арматуре 0,43 (процентное соотношение предельного усилия в композитной арматуре к стальной 30/70), 1 (50/50) и 2,3 (70/30), построенными в соответствии с предлагаемой методикой расчета (рисунок 5).

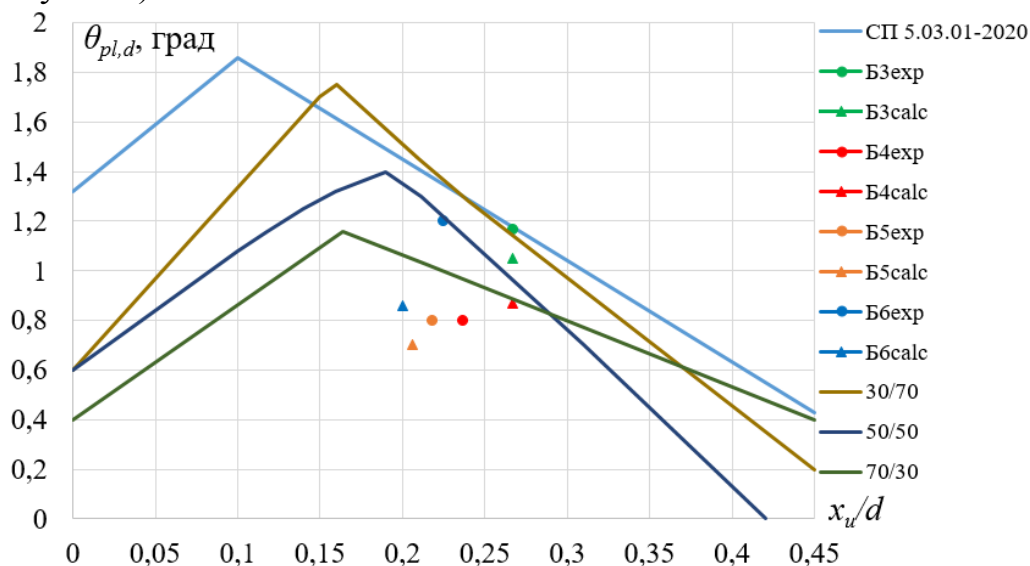


Рисунок 5. – Предельные значения углов пластического поворота сечения над промежуточной опорой опытных балок

Опытные зависимости «опорный изгибающий момент – угол поворота» сопоставлялись с расчетными, определенными по предложенной методике, отмечено их качественное и количественное соответствие (рисунок 6).

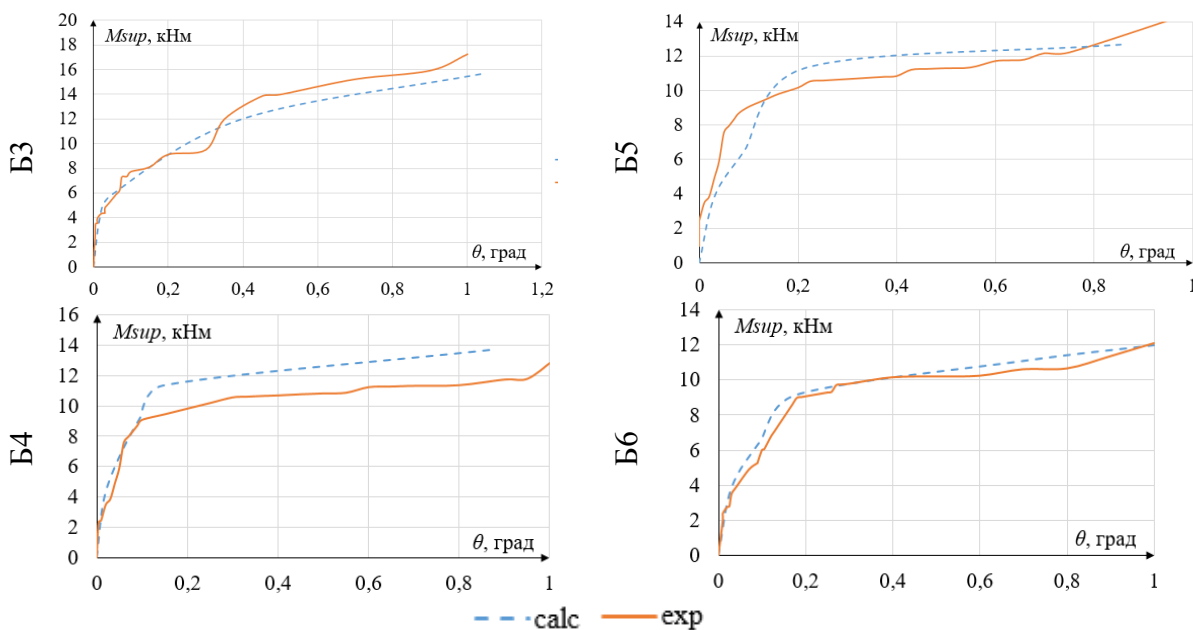


Рисунок 6. – Опытные (exp) и расчетные (calc) зависимости «опорный изгибающий момент – угол поворота» для опытных балок

Результаты сопоставления значения опытного опорного изгибающего момента с расчетным при предельной нагрузке приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Результаты сопоставления опытного значения опорного изгибающего момента при предельной нагрузке с расчетным

Опытная балка	$M_{Ru,sup}^{exp}$ , кНм	$M_{Ru,sup}^{cl}$ , кНм	$M_{Ru,sup}^{exp} / M_{Ru,sup}^{cl}$
Б1Э	20,99	20,0	1,05
Б2Э	5,8	6,8	1,17
Б3	17,27	15,6	1,11
Б4	12,81	13,7	0,94
Б5	13,23	12,7	1,04
Б6	12,07	11,1	1,09

Ширина раскрытия центральной трещины в уровне центра тяжести растянутых стальных и композитных стержней над промежуточной опорой определялась в соответствии с предложенной методикой как сумма взаимного проскальзывания арматуры относительно бетона на длине рассматриваемых подэлементов слева и справа от краев трещины и сопоставлялась с опытными данными (таблица 4).

Таблица 4. – Результаты сопоставления опытного значения ширины раскрытия центральной трещины над промежуточной опорой при предельной нагрузке с расчетным

Опытная балка	$w_{sup}^{exp}$ , мм	$w_{sup}^{cl}$ , мм	$w_{sup}^{exp} / w_{sup}^{cl}$
Б1Э	0,21	0,24	1,14
Б2Э	0,54	0,4	1,35
Б3	0,25	0,22	1,14
Б4	0,3	0,27	1,11
Б5	0,35	0,31	1,13
Б6	0,34	0,31	1,1

Сравнение расчетных предельных опорных изгибающих моментов и ширины раскрытия трещин, полученных в результате нелинейного расчета опытных балок с врезанными пластическими шарнирами, параметры которых были заданы при помощи расчетной зависимости «опорный изгибающий момент – угол поворота», с опытными, соответствующими предельному пролетному изгибающему моменту опытных балок, показали их удовлетворительную сходимость (менее 15%).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. На основе общей деформационной и блочной модели сопротивления железобетона, а также методов строительной механики разработана методика нелинейного расчета неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием композитной и стальной арматурой растянутой зоны над промежуточной опорой. Предлагаемая методика позволяет получать распределение изгибающих моментов по длине неразрезных балок на основе зависимости «опорный изгибающий момент – угол поворота» и обоснованно назначать критерий разрушения в виде предельного угла поворота поперечного сечения над промежуточной опорой [4; 8; 9; 11; 12].

2. Подтверждена справедливость гипотезы плоских сечений для осредненных деформаций неразрезных балок с комбинированным армированием композитной и стальной арматурой растянутой зоны над промежуточной опорой, что позволяет использовать общую деформационную модель для вычисления их параметров напряженно-деформированного состояния на любой стадии работы под нагрузкой [4; 5; 8; 9; 11; 12].

3. В рамках разработанной методики расчета, на основе блочной модели сопротивления железобетона, предложена расчетная модель неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой, включающая условия равновесия, условия совместности деформаций, а также зависимости «касательные напряжения – взаимное проскальзывание» для композитной и стальной арматуры по длине участка, выделенного трещинами нормального отрыва в зоне над промежуточной опорой. Предложенная расчетная модель позволяет получать относительные деформации и напряжения композитной и стальной арматуры, а также растянутого бетона по длине железобетонного элемента между трещинами с учетом соотношения предельных усилий в композитной и стальной арматуре и рассчитать значения параметрических точек зависимости «опорный изгибающий момент – угол поворота» для неразрезных балок [4; 8; 9; 11; 12].

4. Экспериментально установлены особенности работы неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой с различным соотношением предельных усилий в композитной и стальной арматуре, заключающиеся в восприятии дополнительной внешней нагрузки в предельном состоянии при начале текучести стальной арматуры в растянутой зоне над промежуточной опорой и последующем дополнительном перераспределении усилий между пролетами и опорой неразрезных балок [1; 2; 3; 5; 6; 7; 10; 13].

5. Экспериментально верифицирована предложенная методика нелинейного расчета неразрезных железобетонных балок с различным соотношением предельных усилий в композитной и стальной арматуре растянутой зоны над промежуточной опорой (расхождение между расчетными и опытными данными не превышает 15%), что позволяет применять композитную арматуру в сочетании со стальной в изгибаемых железобетонных элементах с комбинированным армированием композитной и стальной арматурой растянутой зоны над промежуточной опорой [2; 3; 5; 7; 10].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в научно-исследовательских и проектных организациях при проектировании железобетонных неразрезных многопролётных изгибаемых балочных элементов с комбинированным армированием композитной и стальной арматурой растянутой зоны над промежуточной опорой.

2. Результаты диссертационной работы внедрены:

– в учебный процесс кафедр «Строительные конструкции» и «Строительное производство» при обучении студентов специальности 1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство» в дисциплине «Железобетонные и каменные конструкции» (акт о практическом использовании результатов исследования от 27.07.2022), «Строительное материаловедение» (акт о практическом использовании результатов исследования от 27.07.2022);

– в научно-исследовательскую работу кафедры «Строительные конструкции» по теме «Новые методы расчета строительных конструкций и оснований зданий и сооружений, совершенствование их конструктивных решений и усиление» (акт о практическом использовании результатов исследования от 20.07.2022).

3. Результаты диссертационной работы готовятся для подачи и рассмотрения возможности включения в разрабатываемое Приложение к СП 5.03.01 «Бетонные и железобетонные конструкции», относящееся к проектированию элементов, армированными композитными стержнями.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

1. Гиль, А. И. Стеклопластиковая и углепластиковая арматура в строительстве: преимущества, недостатки, перспективы применения / А. И. Гиль, Е. Д. Лазовский, Е. Н. Бадалова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 19. – С. 48–53.

2. Гиль, А. И. Экспериментальное исследование механических свойств стеклопластиковой арматуры / А. И. Гиль, Е. Д. Лазовский // Проблемы современного бетона и железобетона. – 2017. – № 9. – С. 168–182.

3. 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, Строительство. Прикладные науки. – 2019. – № 16. – С. 59–64.

4. Hil, A. I. Analysis of the bending continuous rc-beams with hybrid reinforcement in the tensile zone under intermedia support / A. I. Hil, Y. D. Lazouski // Вестн. Брест. гос. ун-та. – 2021. – № 3. – С. 5–8.

5. Гиль, А. И. Результаты экспериментальных исследований сопротивления изгибу статически неопределимых железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны опорного сечения / А. И. Гиль // Вестн. Полоцкого государственного университета. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2021. – № 16. – С. 58–64.

6. Гиль, А. И. Композитная арматура для предварительно напряженных железобетонных конструкций / А. И. Гиль, Е. Д. Лазовский // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров : материалы XX междунар. науч.-метод. семинара, Гродно, 17–19 февр. 2016 г. / М-во образования Респ. Беларусь, ГрГУ им. Я. Купалы ; редкол.: В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2016. – С. 30–34.

7. Гиль, А. И. Методика экспериментальных исследований сопротивления изгибу статически неопределимых железобетонных балок с гибридным армированием / А. И. Гиль, Е. Д. Лазовский // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации [Электронный ресурс] : электрон. сб. ст. междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 5–6 апр. 2018 г. / Полоц. гос. ун-т ; под ред. А. А. Бакатовича, Л. М. Парфеновой. – Новополоцк, 2018. – С. 61–66. – 1 электрон. опт. диск (CD-R).

8. Hil, A. Preconditions of computational model of the bending strength of reinforced concrete statically indeterminate beams with hybrid reinforcement / A. Hil, Y. Lazouski // European and National dimension in research. Technology : Electronic collected materials of X Junior Researchers' Conference, Novopolotsk,



May 10–11, 2018 / Polotsk State University ; ed.: D. Lazouski [et al.]. – Novopolotsk, 2018. – P. 24–27.

9. Гиль, А. И. Сопротивление изгибу статически неопределимых железобетонных балок с гибридным армированием / А. И. Гиль, Е. Д. Лазовский // Проблемы современного строительства : материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 30 мая 2018 г. / БНТУ ; редкол.: В. Ф. Зверев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2018. – С. 27–32.

10. Гиль, А. И. Экспериментальные исследования статически неопределимых железобетонных балок с гибридным армированием / А. И. Гиль, Е. Д. Лазовский // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров : сб. науч. ст. XXI Междунар. науч.-метод. семинара, Брест, 25–26 окт. 2018 г. / БрГТУ ; редкол.: Н. Н. Шалобыта [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2018. – Ч. 1. – С. 125–129.

11. Гиль, А. И. Сопротивление изгибу статически неопределимых железобетонных балок с гибридным армированием / А. И. Гиль, Е. Д. Лазовский // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации : электрон. сб. ст. II междунар. науч. конф., Новополоцк, 28–29 нояб. 2019 г. / Полоц. гос. ун-т ; под ред. Л. М. Парфеновой. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. – С. 99–103. – 1 электрон. опт. диск (CD-R).

12. Гиль, А. И. Напряженно-деформированное состояние статически неопределимых балок с гибридным армированием / А. И. Гиль, Е. Д. Лазовский // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации : электрон. сб. ст. III междунар. науч. конф., Новополоцк, 29–30 апр. 2021 г. / Полоц. гос. ун-т ; редкол.: Д. Н. Лазовский (председ.) [и др.]. – Новополоцк : ПГУ, 2021. – С. 68–71. – 1 электрон. опт. диск (CD-R).

13. Гиль, А. И. Неметаллическая композитная стержневая арматура без предварительного напряжения в составе комбинированного армирования изгибаемых железобетонных элементов: перспективы применения / А. И. Гиль, Е. Д. Лазовский // ENVIRONMENTAL PROTECTION – 2021 : зб. наук. праць Міжнар. наук.-практ. онлайн-конф, присв. Всесвітньому дню охорони довкілля, Київ, 5 черв. 2021 р. – Київ : Київ. нац. ун-т будівництва і архітектури, 2021. – Вип. 1. – С. 35–39.





## РЕЗЮМЕ

Гиль Артур Иванович

### **Сопротивление изгибу неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой**

**Ключевые слова:** железобетонные неразрезные элементы, композитная арматура, сопротивление изгибу, сцепление, блочная модель сопротивления железобетона, общая деформационная модель сопротивления железобетона, методика расчета, комбинированное армирование.

**Цель работы:** разработка и экспериментальная проверка научно обоснованной методики нелинейного расчета сопротивления изгибу неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием композитной и стальной арматурой растянутой зоны над промежуточной опорой, основанной на положениях общей деформационной и блочной моделях сопротивления железобетонного элемента, учитывающей нелинейную работу материалов и позволяющей получить распределение изгибающих моментов по длине неразрезных балок.

**Объект исследования:** неразрезные железобетонные балки с комбинированным армированием композитной и стальной арматурой растянутой зоны над промежуточной опорой.

**Методы исследования:** экспериментально-теоретические.

**Полученные результаты и их новизна.** Разработана и экспериментально верифицирована методика нелинейного расчета неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием композитной и стальной арматурой растянутой зоны над промежуточной опорой, которая позволяет получать распределение изгибающих моментов по длине неразрезных балок на основе зависимости «опорный изгибающий момент – угол поворота» и обоснованно назначать критерий разрушения в виде предельного угла поворота поперечного сечения над промежуточной опорой. Экспериментально установлены особенности работы неразрезных балок с различным соотношением предельных усилий в композитной и стальной арматуре.

**Рекомендации по использованию.** Результаты работы могут быть использованы в научно-исследовательских и проектных организациях при проектировании железобетонных неразрезных многопролетных балочных элементов с комбинированным армированием растянутой зоны над промежуточной опорой.

**Область применения:** проектирование неразрезных балок с комбинированным армированием, научно-исследовательская деятельность, учебный процесс.

## SUMMARY

**Hil Arthur**

### **Bending resistance of continuous reinforced concrete beams with combined reinforcement of the tensile zone above the intermediate support**

**Keywords:** reinforced concrete continuous elements, composite reinforcement, bending resistance, coupling, block model of reinforced concrete resistance, general deformation model of reinforced concrete resistance, calculation method, combined reinforcement.

**The purpose of the work:** development and experimental verification of a scientifically based methodology for calculation of bending resistance of continuous reinforced concrete beams with combined reinforcement of a composite and steel reinforcement of a stretched zone over an intermediate support, based on the general deformation and a block models of the resistance of a reinforced concrete element, taking into account the nonlinear work of materials and allowing to obtain the distribution of bending moments along the length of continuous beams.

**Object of research:** continuous reinforced concrete beams with combined reinforcement of composite and steel reinforcement of the stretched zone above the intermediate support.

**Research methods:** experimental and theoretical.

**The results obtained and their novelty.** A method of nonlinear calculation of continuous reinforced concrete beams with combined reinforcement with composite and steel reinforcement of a stretched zone over an intermediate support has been developed and experimentally verified, which makes it possible to obtain a distribution of bending moments along the length of continuous beams based on the dependence "support bending moment - angle of rotation" and reasonably assign a failure criterion in the form of a limiting angle of rotation of the cross section above the intermediate support. The features of the operation of continuous beams with different ratios of marginal forces in composite and steel reinforcement have been experimentally established.

**Recommendations for use:** The results of the work can be used in research and design organizations in the design of reinforced concrete continuous multi-span beam elements with combined reinforcement of the tensile zone above the intermediate support.

**Scope of application:** design of continuous beams with combined reinforcement, research activities, educational process.

## РЭЗЮМЭ

Гіль Артур Іванавіч

### **Супраціўленне выгібу неразрэзных жалезабетонных бэлек з камбінаваным армаваннем расцягнутай зоны над прамежкавай апорай**

**Ключавыя словы:** жалезабетонныя неразрэзныя элементы, кампазітная арматура, супраціўленне выгібу, счাপленне, блокавая мадэль супраціўлення жалезабетону, агульная дэфармацыйная мадэль супраціўлення жалезабетону, методыка разліку, камбінаванае армаванне.

**Мэта працы:** распрацоўка і эксперыментальная праверка навукова абгрунтаванай методыкі разліку супраціву выгібу неразрэзных жалезабетонных бэлек з камбінаваным армаваннем кампазітнай і сталёвай арматурай расцягнутай зоны над прамежкавай апорай, заснаванай на палажэннях агульнай дэфармацыйнай і блокавай мадэлях супраціву жалезабетоннага элемента, якая ўлічвае нелінейную працу матэрыялаў і якая дазваляе атрымаць размеркаванне выгінальных момантаў па даўжыні неразрэзных бэлек.

**Аб'ект даследавання:** неразрэзныя жалезабетонныя бэлькі з камбінаваным армаваннем кампазітнай і сталёвай арматурай расцягнутай зоны над прамежкавай апорай.

**Метады даследавання:** эксперыментальна-тэарэтычныя.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Распрацавана і эксперыментальна верыфікавана методыка нелінейнага разліку неразрэзных жалезабетонных бэлек з камбінаваным армаваннем кампазітнай і сталёвай арматурай расцягнутай зоны над прамежкавай апорай, якая дазваляе атрымліваць размеркаванне выгінальных момантаў па даўжыні неразрэзных бэлек на аснове залежнасці «апорны выгінальны момант – вугал павароту» і абгрунтавана прызначаць крытэр разбурэння ў выглядзе гранічнага вугла павароту папярочнага перасеку над прамежкавай апорай. Эксперыментальна ўстаноўлены асаблівасці працы неразрэзных бэлек з розным суадносінамі гранічных намаганняў у кампазітнай і сталёвай арматуры.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні.** Вынікі працы могуць быць выкарыстаны ў навукова-даследчых і праектных арганізацыях пры праектаванні жалезабетонных неразрэзных шматпалётных бэлечных элементаў з камбінаваным армаваннем расцягнутай зоны над прамежкавай апорай.

**Вобласць ужывання:** праектаванне неразрэзных бэлек з камбінаваным армаваннем, навукова-даследчая дзейнасць, навучальны працэс.

Научное издание

**ГИЛЬ**  
**Артур Иванович**

**СОПРОТИВЛЕНИЕ ИЗГИБУ НЕРАЗРЕЗНЫХ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С КОМБИНИРОВАННЫМ  
АРМИРОВАНИЕМ РАСТЯНУТОЙ ЗОНЫ  
НАД ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ОПОРОЙ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности  
05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения

---

Подписано к печати 26.09.2023 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага «Performer».  
Гарнитура «Times New Roman».  
Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,75. Тираж 70 экз. Заказ № 1024.

---

Отпечатано на ризографе учреждения образования  
«Брестский государственный технический университет».  
224017, г. Брест, ул. Московская, 267.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/235 от 24.03.2014 г.