

На правах рукописи



Обернихина Яна Леонидовна

**ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ НЕРАЗРЕЗНЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК, УСИЛЕННЫХ
ПОЛИМЕРКОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ПОД
НАГРУЗКОЙ**

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2025

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».

Научный руководитель: **Смоляго Геннадий Алексеевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Берлинов Михаил Васильевич**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Железобетонных и
каменных конструкций» ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский
Московский государственный строительный
университет»

Иванов Сергей Ильич
кандидат технических наук, заведующий
лабораторией «Самонапряженных
конструкций и напрягающих бетонов»
НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО НИЦ
«Строительство»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Орловский государственный
университет имени И.С. Тургенева»
(г. Орел)

Защита диссертации состоится «17» апреля 2025 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 75.1.078.01 на базе Акционерного общества «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений - ЦНИИПромзданий», по адресу: 127238, г. Москва, Дмитровское шоссе, д.46, корп. 2., ауд. 21.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте АО «ЦНИИПромзданий», <http://www.cniipz.ru>.

Отзывы на автореферат направлять в диссертационный совет по адресу: 127238, г. Москва, Дмитровское шоссе, д.46, Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений - ЦНИИПромзданий»

Автореферат разослан « » _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Терехов
Иван Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время наряду с увеличением объема строительства новых зданий и сооружений сохраняется достаточно большой объем зданий и сооружений с длительным сроком эксплуатации в условиях силовых и средовых воздействий, приводящих к различным повреждениям и разрушениям железобетонных конструкций. Восстановление их несущей способности связано с проведением их усиления. Несмотря на многообразие различных методов усиления в последнее время увеличивается объем работ по усилению с применением полимеркомпозиционных материалов на основе углеволокна.

В настоящее время проведено множество исследований, изучающих напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций, усиленных полимеркомпозиционными материалами, которые показали, что система внешнего армирования, может эффективно применяться для увеличения прочности и жесткости железобетонных конструкций.

В то же время вопросы совместной работы усиливаемой конструкции и элементов усиления, нелинейной работы материалов, влияния предыстории нагружения конструкции перед ее усилением, особенности перераспределения усилий в связи с изменением жесткости, исследованы недостаточно полно.

Поэтому актуальной является задача разработки методик расчета прочности нормальных сечений и деформативности неразрезных балок, внешне армированных полимеркомпозиционными материалами под нагрузкой, с последующей экспериментальной апробацией.

Степень разработанности темы исследования.

Развитию методик расчета изгибаемых железобетонных элементов, в том числе усиленных полимеркомпозиционными материалами и под нагрузкой, посвящены работы следующих ученых: Астафьева Д.О., Берлинова М.В., Бокарева С.А., Бондаренко В.М., Бондаренко С.В., Голышева А.Б., Залесова А.С., Звездова А.И., Иванова С.И., Кабанцева О.В., Клевцова В.А., Кодыш Э.Н., Колчунова В.И., Колчунова Вл.И., Король Е.А., Крылова С.М., Крылова С.Б., Карпенко Н.И., Маиляна Л.Р., Меркулова С.И., Мирсаяпова И.Т., Морозова В.И., Мухамедиева Т.А., Пецольда Т.М., Римшина В.И., Санжаровского Р.С., Смоляго Г.А., Тамразяна А.Г., Тонких Г.П., Травуша В.И., Трекина Н.Н., Трещева А.А., Федорова В.С., Федоровой Н.В., Шилина А.А. и других.

В последние годы выполнены значительные исследовательские работы по совершенствованию методов расчета усиливаемых железобетонных конструкций и разработке соответствующих нормативных документов. Однако вопросы определения прочности нормальных сечений и деформативности неразрезных железобетонных балок, усиленных полимеркомпозиционными материалами под нагрузкой, не получили должного развития и требуют постановки специальных исследований.

Последнее является серьезным препятствием для расширения области применения систем внешнего армирования для усиления изгибаемых железобетонных элементов.

Научно-техническая гипотеза заключается в предположении влияния уровня нагрузки усиления на прочность нормальных сечений, деформативность и характер перераспределения усилий в неразрезных железобетонных балках, внешне армированных полимеркомпозиционными материалами.

Цель диссертационной работы – на основании комплексных экспериментально-теоретических исследований разработать методику, алгоритм и программное обеспечение для расчета параметров напряженно-деформированного состояния двухпролетных неразрезных железобетонных балок, усиленных углепластиком под нагрузкой, на всех стадиях работы, включая возможные запроектные воздействия, с учетом физической нелинейности материалов.

Задачи исследования:

– Проанализировать существующие методы расчета прочности нормальных сечений и деформативности изгибаемых статически неопределимых железобетонных балок, усиленных углепластиком под нагрузкой.

– Разработать аналитический аппарат расчета прочности нормальных сечений деформативности неразрезных железобетонных балок, усиленных полимеркомпозиционными материалами под нагрузкой, в том числе при запроектных воздействиях, на базе предложенной деформационной модели с алгоритмами и программами расчета для ЭВМ.

– Выполнить экспериментальные исследования влияния внешнего армирования из углепластика при разных уровнях нагрузки на прочность нормальных сечений и деформативность железобетонных неразрезных балок.

– Выполнить сравнительный анализ разработанных расчетных зависимостей прочности нормальных сечений и деформативности неразрезных железобетонных балок, усиленных углепластиком под нагрузкой с данными проведенных собственных опытов и экспериментальных исследований других авторов.

– На основе проведенных экспериментальных исследований установить уровень влияния внешнего армирования из углепластика на характер перераспределения внутренних усилий в сечениях двухпролетных неразрезных железобетонных балок.

Объект исследования – неразрезные двухпролетные железобетонные балки, усиленные углепластиком под нагрузкой.

Предмет исследования – прочность нормальных сечений, деформативность и характер перераспределения усилий в неразрезных железобетонных балках, усиленных полимеркомпозиционными материалами под нагрузкой.

Научную новизну работы составляют:

- методика и алгоритмы статического расчета неразрезных двухпролетных балок переменной жесткости с описанием изогнутой оси балки кубическим сплайном и использованием метода заданных деформаций;
- методика и алгоритмы расчета нормальных сечений железобетонных балок, усиленных полимеркомпозиционными материалами при различных уровнях напряженно-деформированного состояния, с учетом нелинейной работы материалов, позволяющая определять параметры НДС на всех стадиях работы, включая закритическую;
- методика и алгоритмы расчета прочности и деформативности неразрезных железобетонных балок, усиленных под нагрузкой на различных стадиях работы полимеркомпозиционными материалами с учетом физической нелинейности материалов, позволяющая оценивать работу балок на всех стадиях, включая закритическую;
- экспериментальные данные о прочности нормальных сечений, деформативности, и перераспределении усилий в неразрезных двухпролетных железобетонных балках, внешне армированных углепластиком при различных уровнях нагрузки;
- алгоритмы и результаты численных исследований, позволяющие оценить влияние на напряженно-деформированное состояние нормальных сечений, прочность и деформативность двухпролетных балок, усиленных углепластиком ряда факторов, таких как уровень нагрузки усиления и схема усиления.

Положения, выносимые на защиту:

- методики и алгоритмы:
 - статического расчёта неразрезных балок переменной жесткости, разработанного в предпосылках метода заданных деформаций;
 - определения параметров напряженно-деформированного состояния нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов с учетом физической нелинейности материалов, включая внешне армированных полимеркомпозиционными материалами;
 - итерационного расчета прочности по нормальным сечениям и деформативности внешне армированных полимеркомпозиционными материалами неразрезных железобетонных балок с учетом физической нелинейности на всех стадиях их работы, включая запроектную;
- результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния неразрезных железобетонных балок, усиленных углепластиком при различных уровнях нагружения;
- результаты численных исследований прочности по нормальным сечениям и деформативности неразрезных железобетонных балок, усиленных углепластиком при различных уровнях нагрузки усиления, а также при разных схемах усиления.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии комплексного подхода учета влияния уровня нагрузки усиления при расчете прочности нормальных сечений, деформативности и характера перераспределения усилий неразрезных железобетонных балок, внешне армированных углепластиком с использованием реальных диаграмм деформирования бетона, стальной арматуры и углепластика. Результаты проведенных экспериментальных исследований выявили характерные особенности перераспределения усилий в неразрезных железобетонных балках и их влияние на изменение несущей способности.

Практическая значимость работы. Разработанные методики, алгоритмы расчета и составленные на их основе программы для ЭВМ позволяют оценить влияние уровня нагружения, при котором проводилось усиление, на напряженно-деформированное состояние неразрезных железобетонных балок, усиленных углепластиком, а также проанализировать работу усиленной конструкции на каждом этапе нагружения вплоть до разрушения, в том числе, включая критическую область.

Результаты выполненных исследований в части разработанных методики и программ использованы в научно-исследовательской и практической деятельности АО «КТБ железобетон», внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова».

Использование в практике проектирования разработанного расчетного аппарата позволит корректнее оценивать напряженно-деформированное состояние неразрезных железобетонных балок и в ряде случаев выявить фактические резервы прочности нормальных сечений и деформативности статически неопределимых железобетонных балочных элементов, усиленных внешним армированием под нагрузкой, что может способствовать применению более экономичных конструктивных решений усиления полимеркомпозиционными материалами.

Методология и методы исследования. Используются экспериментально-теоретические методы. Теоретические исследования базируются на основных положениях строительной механики и нелинейной теории железобетона. Экспериментальные исследования основаны на методах механического моделирования строительных конструкций.

Личный вклад автора. При выполнении работы автором был проведен анализ исследований прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов, внешне армированных углепластиком, выполненных другими авторами; была совершенствована методика и составлены алгоритмы расчета прочности и деформативности неразрезных железобетонных балок, усиленных полимеркомпозиционными материалами под нагрузкой; были выполнены и проанализированы экспериментальные и численные исследования.

Степень достоверности. Результаты научных исследований согласуются с основными положениями нелинейной теории железобетона, результатами расчетов по предлагаемой методике с экспериментальными исследованиями, выполненными с использованием стандартных методов испытаний образцов железобетонных балок под нагрузкой с определением фактических механических свойств бетона, стальной арматуры и углепластика с использованием аттестованного оборудования. При этом результаты численных исследований сопоставимы с экспериментальными данными других авторов, а также с результатами моделирования в ПК ЛИРА-САПР.

Апробация работы. Результаты теоретических и экспериментальных исследований и основные материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях:

Международной научно-практической конференции «Наука и инновации в строительстве» (К 165-летию со дня рождения В.Г. Шухова) (г. Белгород, 2018), Международной научно-практической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения профессора, автора методики расчета железобетонных конструкций по стадии разрушения, основоположника советской научной школы теории железобетона, основателя и первого заведующего кафедрой железобетонных конструкций Московского инженерно-строительного института (МИСИ) А.Ф. Лолейта (г. Москва, 2018), IV Международного студенческого строительного форума – 2019 (к 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова) (г. Белгород, 2019), IV Международной научно-практической конференции «Наука и инновации в строительстве» 17 апреля 2023 г. (г. Белгород, 2023).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных статей, из них 5 в изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России, 2 публикация в сборниках трудов конференций, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science и др.

Получены два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х разделов, заключения, списка литературы и одного приложения. Полный объем работы составляет 152 страницы, в том числе 127 страниц основного текста, который иллюстрируется 66 рисунками и 29 таблицами. Список литературы содержит 178 источника, в том числе 55 иностранных.

Содержание диссертации соответствует п.п. 1,3 Паспорта Специальности 2.1.1. – Строительные конструкции, здания и сооружения.

1. Построение и развитие теории, разработка аналитических и вычислительных методов расчёта механической безопасности и огнестойкости, рационального проектирования и оптимизации конструкций и конструктивных систем зданий и сооружений.

3. Развитие теории и методов оценки напряжённого состояния, живучести, риска, надёжности, остаточного ресурса и сроков службы строительных конструкций, зданий и сооружений, в том числе при

чрезвычайных ситуациях, особых и запроектных воздействиях, обоснование критериев приемлемого уровня безопасности.

Работа выполнена на кафедре «Строительства и городского хозяйства» ФГБОУ ВО «БГТУ им. В.Г. Шухова» под руководством доктора технических наук, профессора Г.А. Смоляго.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проанализирована и обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, приведены цель и задачи работы, научная новизна и основные положения, которые автор выносит на защиту.

В первой главе приведен анализ применения полимеркомпозиционных материалов при усилении изгибаемых железобетонных элементов, а также представлены основные свойства материалов системы усиления. Кроме того, проведен анализ основных моделей деформирования и методик расчета нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов, внешне армированных полимеркомпозиционными материалами, в том числе и под нагрузкой. Рассмотрены их этапы развития, предпосылки, достоинства и недостатки.

Разработке методик расчета прочности и деформативности внешне армированных изгибаемых железобетонных элементов посвящены работы Бокарева С.А., Звездова А.И., Иванова С.И., Маиляна Л.Р., Меркулова С.И., Морозова В.И., Мухамедиева Т.А., Римшина В.И., Смоляго Г.А., Тамразяна А.Г., Тонких Г.П., Федоровой Н.В., Шилина А.А., А.А., Aiello M.A., Cao G., Fayyadh M.M., Grace N.F., Richardson T., Wang T., Wenwei W. и других.

На основе проведенного обзора, можно отметить, что, как правило, предлагаемые методики расчета не учитывают всех особенностей работы усиленных изгибаемых железобетонных элементов, и в большинстве случаев оценивают прочность и деформативность балки лишь по работе одного характерного, как правило, наиболее нагруженного сечения.

Кроме того, в главе приведены результаты экспериментальных исследований отечественных и зарубежных авторов. Однако, ввиду ограниченного количества испытуемых образцов и большого количества переменных параметров экспериментальных исследований, достаточно сложно всесторонне оценить влияние уровня предварительной нагрузки на несущую способность неразрезных железобетонных балок, усиленных углепластиком.

В этих условиях проведение теоретических и экспериментальных исследований прочности нормальных сечений и деформативности неразрезных железобетонных балок, усиленных полимеркомпозиционными материалами под нагрузкой следует считать вполне оправданным.

Во второй главе приведена методика расчета прочности нормальных сечений и деформативности неразрезных железобетонных балок, усиленных полимеркомпозиционными материалами под нагрузкой, разработанная на

основе нелинейной деформационной модели железобетона с использованием реальных диаграмм деформирования материалов.

При разработке методики оценки напряженно-деформированного состояния нормальных сечений неразрезных железобетонных балок, усиленных полимеркомпозиционными материалами под нагрузкой, используются следующие предпосылки:

- Принята модель квазигомогенного сплошного тела, предложенная А.Б. Голышевым и В.Я. Бачинским, согласно которой бетон до и после образования трещин рассматривается с единых физических позиций как сплошное тело, что позволяет устранить разрывность функции жесткости при трещинообразовании путем введения некоторого усредненного расчетного сечения на участке блока между трещинами с линейным законом распределения деформаций по его высоте. При этом развитие трещин, моделируется уменьшением напряжений в бетоне растянутой зоны в зависимости от деформаций растянутой грани;

- Для указанного сечения считается справедливым линейный закон распределения деформаций по высоте.

- Связь между напряжениями и деформациями бетона выражается зависимостью (рис. 1(а)).

$$\sigma_b = \sum_{k=1}^n A_k \varepsilon_b^k. \quad (1)$$

- Работа растянутого бетона описывается диаграммой Прандтля с ординатой равных напряжений $\psi_{bt} R_{bt}$, где ψ_{bt} – коэффициент, учитывающий постепенное снижение усилия, воспринимаемого бетоном растянутой зоны за счет развития трещин.

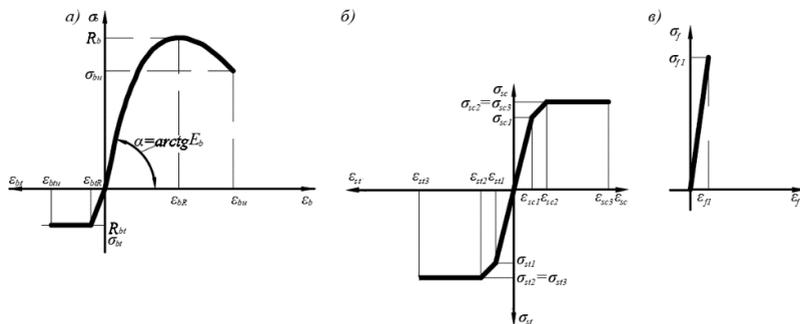


Рисунок 1 – Диаграммы деформирования:

а) бетона; б) стальной арматуры; в) полимеркомпозиционного материала

- Связь между напряжениями и деформациями арматурной стали принимается в виде кусочно-линейной диаграммы, параметры которой получают экспериментальным путем или согласно существующих рекомендаций (рис. 1(б)).

– Связь между напряжениями и деформациями полимеркомпозиционного материала усиления принимается в виде кусочно-линейной диаграммы деформирования вплоть до разрушения, параметры которой получают экспериментальным путем или согласно существующих рекомендаций (рис. 1(в)).

– Величина деформаций в полимеркомпозиционном материале после усиления на рассматриваемом этапе работы определяется, как разность деформаций в бетоне в зоне расположения

композиционного материала и деформаций в этой же зоне в момент усиления.

В классической строительной механике при расчете изгибаемых элементов в качестве нагрузочного параметра используется величина внешней нагрузки, а значения прогибов, углов поворота, кривизн в сечениях определяют решением уравнения или системы уравнений изогнутой оси. Однако при таком подходе при расчете конструкций с учетом физической нелинейности в случае задания нагрузки, близкой к несущей способности или превышающей ее, получить решение или невозможно (рисунок 2, линия 1) или будет иметь место два решения (рисунок 2, линия 2). Даже в случае корректного получения двух решений оценить характер совместной работы усиливаемой конструкции и системы усиления не представляется возможным.

В предлагаемой методике применен обратный подход, для которого в качестве нагрузочного параметра используется кривизна на средней опоре неразрезной балки, а решение уравнения изогнутой оси осуществляется относительно величины нагрузки (рисунок 2, линия 3).

Такой подход позволит при решении задач расчета конструкций с учетом физической нелинейности и необходимой в этом случае организации итерационного процесса избежать неоднозначности при определении параметров НДС сечений неразрезных балок, усиленных полимеркомпозиционными материалами, на всех стадиях их работы, включая критическую.

С учетом принятых предпосылок, уравнения равновесия для нормального сечения без трещин принимают вид (рисунок 3):

$$\int_A \sigma_b dA + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} A_{si} + \sum_{j=1}^t \sigma_{fj} A_{fj} = 0; \quad (2)$$

$$\int_A \sigma_b y dA + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} y_{si} A_{si} + \sum_{j=1}^t \sigma_{fj} y_{fj} A_{fj} - M = 0, \quad (3)$$

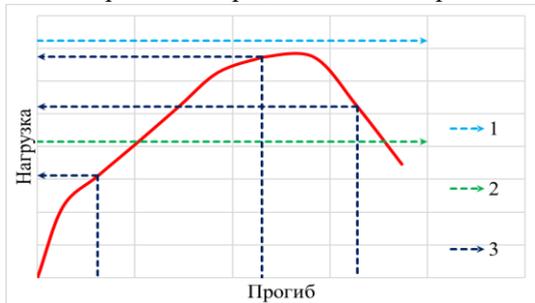


Рисунок 2 – График зависимости «нагрузка-прогиб»

где σ_b – напряжения на элементарной площадке бетона площадью dA_b , расположенной на расстоянии, равном k – от нижней грани сечения; σ_{si} , A_{si}, y_{si} – напряжения в i – том арматурном стержне, площадь его поперечного сечения и расстояние от нижней грани сечения конструкции до указанной площади; σ_{fj} , A_{fj}, y_{fj} – напряжения в j – том слое углеволокна, площадь его поперечного сечения и расстояние от нижней грани сечения конструкции до указанной площади.

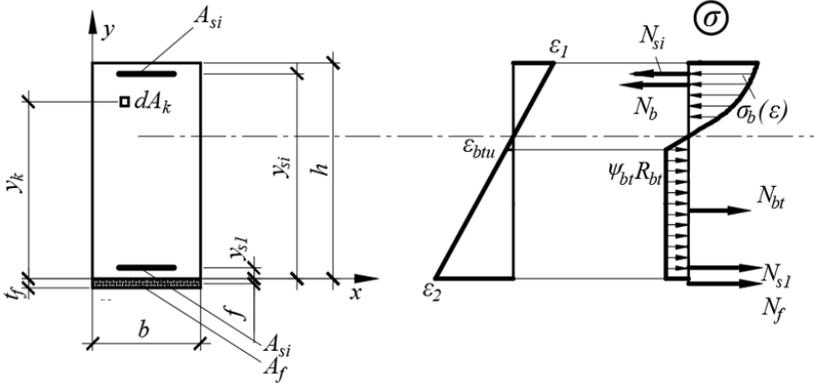


Рисунок 3 – Напряженно-деформированное состояние сечения, усиленного полимеркомпозиционными материалами

Произведя преобразования и интегрирование уравнений (2) и (3), с учетом диаграммы деформирования бетона (1), получим уравнения, описывающие напряженно-деформированное состояние сечения изгибаемого железобетонного элемента без трещин, усиленного полимеркомпозиционными материалами:

$$\frac{1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{k+1} \varepsilon_1^{k+1} + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} \mu_{si} + \sum_{j=1}^t \sigma_{fj} \mu_{fj} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{1}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2} \left[\sum_{k=1}^n \frac{A_k}{k+2} (\varepsilon_1^{k+2} + \varepsilon_2^{k+2}) - \varepsilon_2 \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{k+1} (\varepsilon_1^{k+1} + \varepsilon_2^{k+1}) \right] + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} \mu_{si} \xi_{si} + \sum_{j=1}^t \sigma_{fj} \mu_{fj} \xi_{fj} - m = 0. \quad (5)$$

В случае образования трещин уравнения (4) и (5), можно представить в виде:

$$\frac{1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \left[\sum_{k=1}^n \frac{A_k}{k+1} (\varepsilon_1^{k+1} - \varepsilon_{btu}^{k+1}) + \psi_{bt} R_{bt} (\varepsilon_{btu} - \varepsilon_2) \right] + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} \mu_{si} + \sum_{j=1}^t \sigma_{fj} \mu_{fj} = 0; \quad (6)$$

$$\frac{1}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2} \left[\sum_{k=1}^n \frac{A_k}{k+2} (\varepsilon_1^{k+2} - \varepsilon_{btu}^{k+2}) - \varepsilon_2 \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{k+1} (\varepsilon_1^{k+2} - \varepsilon_{btu}^{k+2}) + \frac{\psi_{btu} R_{btu}}{2} (\varepsilon_{btu} - \varepsilon_2) \right] + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} \mu_{si} \xi_{si} + \sum_{j=1}^l \sigma_{fj} \mu_{fj} \xi_{fj} - m = 0 \quad (7)$$

Выразив деформации верхней грани через кривизну $\varepsilon_1 = \aleph h + \varepsilon_2$ в уравнении (6) останется два неизвестных \aleph и ε_2 . При определении напряженно-деформированного состояния нормального сечения по заданному значению кривизны \aleph из уравнения (6) численными методами, в частности в данном случае удобно использовать метод половинного деления, определяются численные значения деформаций ε_2 и ε_1 . По формуле (7) вычисляется величина действующего в сечении момента, а затем и жесткость $B = M/\aleph$.

Статический расчет неразрезных железобетонных балок, усиленных полимеркомпозиционными материалами под нагрузкой, реализуется методом заданных деформаций в сочетании с аппроксимацией изогнутой оси балки кубическим сплайном:

$$y = \sum_{i=1}^4 A_i \cdot X^{i-1}; \quad (8)$$

$$y' = \varphi = \sum_{i=2}^4 (i-1) A_i \cdot X^{i-2}; \quad (9)$$

$$y'' = \aleph = \sum_{i=3}^4 (i-1)(i-2) A_i \cdot X^{i-3}, \quad (10)$$

где y – величина прогиба оси балки в точке с координатой X , отсчитываемой от начала участка; y' и y'' – угол поворота и кривизна в той же точке соответственно; A_i – коэффициенты, определяемые по методу начальных параметров.

В качестве нагрузочного параметра в неразрезных балках, при котором определяется величина внешней нагрузки, принимается кривизна на первой промежуточной опоре.

Рассмотрим неразрезную балку (рисунок 4), в которой выделим два соседних пролета, примыкающих к опоре k и разобьем левый пролет на n участков, а правый – на m . Начало отсчета обозначим на опоре k . Левому пролету присвоим индекс $(k-1)$, правому – k .

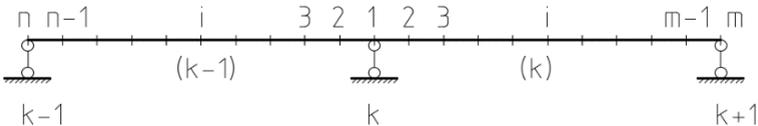


Рисунок 4. Схема разбиения на участки пролетов $(k-1)$ и k

Тогда с учетом уравнений (8-10) путем преобразований, используя условие совместности работы пролетов, получим зависимость внешней нагрузки $|\vec{F}|$ от кривизны на промежуточной опоре \aleph_k

$$|\vec{F}| = \frac{\frac{y_{k-1} - y_k}{l_{(k-1)}} - \frac{y_{k+1} - y_k}{l_k} - \frac{l_{(k-1)}(3n-4)\aleph_k}{6(n-1)^2} - \frac{l_k(3m-4)\aleph_k}{6(m-1)^2}}{\left\{ \frac{l_{(k-1)}^2}{(n-1)^4} \left[\sum_{i=2}^{n-1} \frac{(n-i) \cdot P(\vec{F}_{(k-1),i})}{B_{(k-1),i}} \right] + \frac{l_k^2}{(m-1)^4} \left[\sum_{i=2}^{m-1} \frac{(m-i) \cdot P(\vec{F}_{k,i})}{B_{k,i}} \right] \right\}} - \frac{\frac{l_{(k-1)}\aleph_{(k-1)}B_{(k-1)}}{(n-1)^3} \left[\sum_{i=2}^{n-1} \frac{(n-i)^2}{B_{(k-1),i}} \right] + \frac{l_k\aleph_k B_k}{(m-1)^3} \left[\sum_{i=2}^{m-1} \frac{(m-i)^2}{B_{k,i}} \right]}{\left\{ \frac{l_{(k-1)}^2}{(n-1)^4} \left[\sum_{i=2}^{n-1} \frac{(n-i) \cdot P(\vec{F}_{(k-1),i})}{B_{(k-1),i}} \right] + \frac{l_k^2}{(m-1)^4} \left[\sum_{i=2}^{m-1} \frac{(m-i) \cdot P(\vec{F}_{k,i})}{B_{k,i}} \right] \right\}} \quad (11)$$

В случае решения задач расчета изгибаемых элементов с учетом физической нелинейности, предлагаемая методика расчета позволяет достаточно просто определить параметры напряженно-деформированного состояния всех элементов системы, при этом такой фактор как статическая неопределимость системы в данном случае не влияет на расчет. С этой целью после решения системы уравнений, с учетом корректировки жесткости до заданной точности по величине $|\vec{F}|$ определяются величины углов поворота на опорах, а затем – значения прогибов в сечениях балки.

На основе описанной выше методики разработаны алгоритмы и написаны программы расчета для ЭВМ:

- «**BALWW_1.01**», предназначена для расчета однопролетных и двухпролетных железобетонных балок прямоугольного сечения с учетом возможной осадки опор, нелинейной работы бетона и арматуры, а также с учетом возможного усиления балки на задаваемом уровне силовой нагрузки. Диаграмма бетона задается степенным полиномом любой степени, арматуры – кусочно-линейной. В качестве нагрузочного параметра задается кривизна в сечении на промежуточной опоре (для однопролетной балки – угол поворота на опоре). Расчет выполняется пошагово с заданным шагом и количеством шагов. Также может быть выполнен расчет с определением максимума нагрузки, воспринимаемой балкой. Результатами расчета балки являются величина нагрузки, воспринимаемая балкой, прогибы, кривизны, жесткости и другие параметры НДС в сечениях балки по длине.

- «**MMXX_1.02**», предназначена для определения параметров напряженно-деформированного состояния прямоугольного железобетонного сечения (момента, деформаций на верхней - ε_{p1} и нижней грани сечения – ε_{p2} , его жесткости) по заданной кривизне

Программа «**MMXX_1.02**» дает возможность выполнять расчет с учетом физической нелинейности бетона с учетом реальных диаграмм деформирования арматуры.

- «**BALWW_UPR_1.01**», позволяющая определять величину вертикальной нагрузки, моментов, прогибов и кривизны в сечениях однопролетной и двухпролетной неразрезной балки переменной жесткости от внешнего воздействия, задаваемого в виде кривизны на средней опоре (для однопролетной – угол поворота на опоре).

- «ISXMM_1.01», предназначена для анализа и проверки корректности исходных данных в графическом виде.

Ознакомиться с работой программ можно на сайте <https://disk.yandex.ru/d/eNkPQYkuW6isQw> в каталоге ДИСК 11_24.06.2024 (sig-eps стали ПОЛНАЯ\1 + 2 пролета (ООО "Строительная Экспертиза").

С целью обоснования применимости методик расчета прочности нормальных сечений и деформативности неразрезных железобетонных балок, приведенных во второй главе, были проведены экспериментальные исследования неразрезных двухпролетных железобетонных балок, усиленных внешним армированием из углепластика под нагрузкой, представленные в **третьей главе**.

Для достижение поставленной цели были поставлены следующие **задачи**:

— разработать методику проведения экспериментальных исследований неразрезных двухпролетных железобетонных балок;

— изучить влияние уровня нагрузки усиления на прочность нормальных сечений двухпролетных неразрезных железобетонных балок, усиленных углепластиком;

— изучить влияние уровня нагрузки усиления на деформативность двухпролетных неразрезных железобетонных балок, внешне армированных углепластиком;

— исследовать влияние уровня нагрузки усиления на характер перераспределения изгибающих моментов двухпролетных неразрезных железобетонных балок, усиленных углепластиком.

Для решения поставленных задач была разработана программа проведения экспериментальных исследований, включающая в себя следующие этапы:

- испытание стандартных образцов для определения физико-механических характеристик материалов (бетон, арматура, углепластик);

- испытание эталонных неусиленных двухпролетных неразрезных железобетонных балок (серия БМ);

- испытание двухпролетных неразрезных железобетонных балок, усиленных углепластиком без предварительного нагружения, путем приклеивания его к растянутой зоне в пролетах с U-образной анкерровкой на приопорных участках (серия БМУ);

- испытание двухпролетных неразрезных железобетонных балок, усиленных аналогично образцам серии БМУ, при 30%; 50% и 70% от разрушающей нагрузки эталонных балок (соответственно серии БМУ В, БМУ Г и БМУ Д).

В рамках экспериментального исследования всего было предусмотрено испытание 15-ти двухпролетных балок – пять серий по три образца в каждой.

В качестве опытных образцов были приняты двухпролетные неразрезные железобетонные балки с размерами поперечного сечения 80x120 мм, пролетом 1200 мм. Армирование экспериментальных образцов выполнено из одиночных плоских каркасов с продольной рабочей арматурой 1Ø8 А500 в пролетах и 2Ø8

A500 на промежуточной опоре. Конструкция опытных образцов и схема их усиления приведены на рисунках 5 и 6.

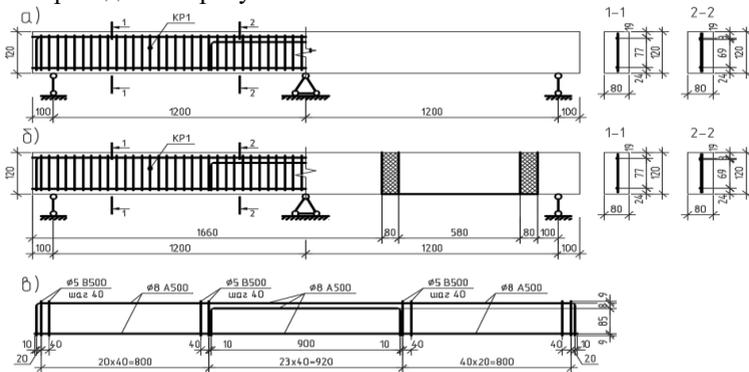


Рисунок 5 – Схема армирования опытных образцов:
а) опытный образец; б) каркас KP-1.

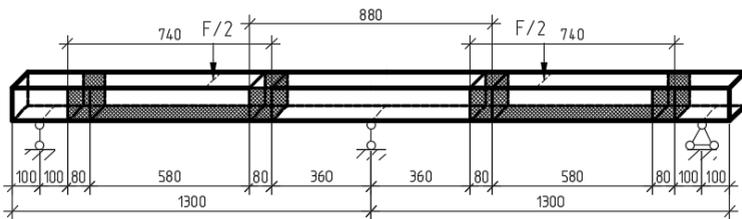


Рисунок 6 – Схема усиления опытных образцов

Экспериментальное исследование было разбито на несколько этапов.

Первый этап включал подготовку и исследование контрольных образцов бетона, арматуры и углепластика, а также последующее определение прочностных и деформативных характеристик материалов.

Второй этап заключался в подготовке и испытании экспериментальных образцов.

Экспериментальные исследования для образцов серии БМ и БМУ предусматривали **две** стадии:

- испытание балки до появления первой нормальной трещины;
- испытание балки с трещинами до разрушения.

Исследования образцов серий БМУ В, БМУ Г, БМУ Д включали **три** стадии:

- испытание балки до появления первой трещины;
- испытание балки до нагрузки усиления;
- испытание усиленной балки с трещинами до разрушения.

На первой стадии шаг величины нагрузки до появления первой трещины составлял около 5%, а на второй - 10% от предполагаемой разрушающей.

Испытания экспериментальных образцов проводились на специально изготовленной установке (рисунок 7).



Рисунок 7 – Фото испытания эталонного и усиленного опытного образца

Испытание всех балок происходило в 14-18 этапов. На каждом этапе приложения нагрузки происходила выдержка 10-12 минут; при усилении – в соответствии с техническими условиями производителя на адгезив.

Разрушение опытных образцов происходило по нормальным сечениям в пролете или на опоре в зоне действия максимальных моментов, вследствие текучести растянутой арматуры или раздробления бетона сжатой зоны в зависимости от параметров армирования и усиления.

Часть результатов экспериментальных и численных исследований приведена на рисунках 8 и 9 и в таблицах 1-3.

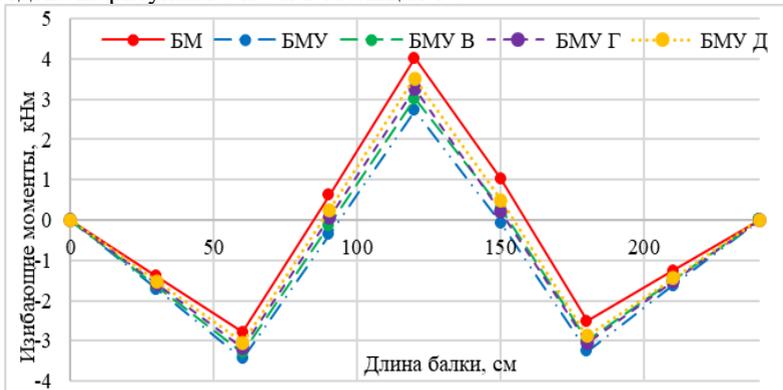


Рисунок 8 — Опытные эпюры изгибающих моментов образцов серий БМ, БМУ, БМУ В, БМУ Г и БМУ Д при заданной нагрузке (32 кН)

Значения прогибов балок $f_{0,8}$ в таблице 2 приведены при уровне нагрузки соответствующей 80% от разрушающей серии БМ.

Таблица 1 – Сравнение опытных и расчетных данных по прочности нормальных сечений неразрезных балок

Серия образцов	Разрушающая нагрузка F_{ult} , кН					
	Опытное значение F_{ult}^{exp}	Среднее опытное значение \bar{F}_{ult}^{exp}	Расчетные значения			
			По инженерной методике на основе СП164		По предлагаемой методике	
			$F_{ult}^{СП}$	Отклонение, %	F_{ult}^{th}	Отклонение, %
БМ	35,15	35,30	30,42	+13,82	35,12	+0,51
	35,72					
	35,03					
БМУ	47,10	47,07	46,35	+1,53	46,96	+0,23
	46,95					
	47,16					
БМУ В	47,12	47,52	43,99	+7,43	47,34	+0,38
	47,86					
	47,59					
БМУ Г	50,15	50,99	42,42	+16,81	49,86	+2,22
	50,43					
	52,39					
БМУ Д	51,09	51,96	40,84	+21,40	51,09	+1,67
	51,32					
	53,47					
Среднее отклонение по всем образцам, %				12,19		1,0
Среднеквадратическое отклонение				7,03		0,99

На основании данных, представленных в таблицах 1-3 можно сделать следующие выводы:

1. Усиление углепластиком, в том числе и под нагрузкой, способствует увеличению прочности нормальных сечений неразрезных железобетонных балок. Так, среднее значение разрушающей нагрузки образцов серий БМУ, БМУ В, БМУ Г и БМУ Д на 33,3%, 34,62%, 44,4% и 47,2% выше, чем у балок эталонной серии БМ. Кроме того, для балок, внешне армированных углепластиком, свойственна следующая закономерность, чем выше уровень нагрузки усиления, тем выше значение разрушающей нагрузки в диапазоне значений проведенного эксперимента. Так, у образцов серий БМУ В, БМУ Г и БМУ Д разрушающая нагрузка выше на 0,96%, 8,33% и 10,39% соответственно, в сравнении с образцами, усиленными без нагрузки (БМУ).

2. Использование системы внешнего армирования на основе углепластика, способствует увеличению жесткости усиленных образцов. Величины прогибов при контрольной нагрузке $f_{0,8}$ всех усиленных балок ниже, чем эталонных, и зависят от значения нагрузки усиления, что объясняется влиянием начальных прогибов в момент усиления. Наибольшее значение прогибов при

контрольной нагрузке у не усиленных образцов (БМ) – 2,56 мм, что на 44,92%, 42,58% и 27,73% больше, чем у образцов серий БМУ, БМУ В и БМУ Г соответственно. Кроме того, уровень нагрузки усиления влияет на деформативность образцов, так величины прогибов при контрольной нагрузке $f_{0,8}$ у образцов, усиленных под нагрузкой, серий БМУ В, БМУ Г, БМУ Д выше на 4,26%, 31,21% и 93,62% соответственно в сравнении с образцами, усиленными без нагрузки (серия БМУ).

3. Усиление углепластиком и уровень нагружения оказывают влияние на характер перераспределения изгибающих моментов, изменяя соотношения опорного $M_{оп}$ и пролетных $M_{пр}$ моментов. Так, на одном из этапов нагружения (34кН) соотношение опорного и пролетного моментов эталонных образцов (БМ) составляет 1,59, а усиленных образцов серий БМУ, БМУ В, БМУ Г, БМУ Д – 1,06; 1,03; 1,04; 1,16 соответственно. Таким образом, чем выше уровень нагрузки усиления, тем ближе соотношение моментов к упругому.

Таблица 2 – Сравнение опытных и расчетных данных по деформативности неразрезных балок

Марка образцов	Значение прогиба в середине пролета $f_{0,8}$, мм							
	Опытно-ε значени $ε_{f_{0,8}^{exp}}$	Среднее опытное значение $\bar{f}_{0,8}^{exp}$	Расчетные значения					
			Инженерная методика на основе СП164		Предлагаемая методика		Нелинейная методика ЛИРА- САПР	
			$f_{0,8}^{СП}$	Отклонение, %	$f_{0,8}^{th}$	Отклонение, %	$f_{0,8}^{ЛИРА}$	Отклонение, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
БМ	2,45	2,56	2,32	+9,38	2,41	+5,86	2,36	+7,81
	2,62							
	2,61							
БМУ	1,39	1,41	1,31	+7,09	1,69	-19,86	1,64	-16,31
	1,47							
	1,37							
БМУ В	1,41	1,47	1,31	+10,88	1,55	-5,44	2,03	-38,10
	1,58							
	1,42							
БМУ Г	1,79	1,85	1,31	+29,19	1,74	+5,95	2,19	-18,39
	1,94							
	1,82							
БМУ Д	2,86	2,73	1,31	+52,01	2,43	+10,99	2,35	+13,92
	2,68							
	2,65							
Среднее отклонение по всем образцам, %				21,71		9,62		18,91
Среднеквадратическое отклонение				0,69		0,20		0,37

Таблица 3 – Сравнение опытных и теоретических значений изгибающих моментов при заданной нагрузке (34 кН) в экспериментальных балках

Серия балок	Среднее опытное значение моментов, кНм				Расчетное значение моментов по предлагаемой методике, кНм		Отклонение моментов, %		Соотношение моментов	
	В пролете $\bar{M}_{пр}^{exp}$	На опоре $\bar{M}_{оп}^{exp}$	$\frac{\bar{M}_{пр}^{exp}}{\bar{M}_{пр,БМ}^{exp}}$, %	$\frac{\bar{M}_{оп,i}^{exp}}{\bar{M}_{оп,БМ}^{exp}}$, %	В пролете $\bar{M}_{пр}^{th}$	На опоре $M_{оп}^{th}$	Пролетных	Опорных	$\frac{\bar{M}_{оп}^{exp}}{\bar{M}_{пр}^{exp}}$	$\frac{M_{оп}^{th}}{\bar{M}_{пр}^{th}}$
БМ	2,71	-4,32	100	100	2,75	-4,49	-1,45	-3,78	1,59	1,63
БМУ	3,26	-3,47	120,3	80,3	3,09	-3,82	+5,21	-9,16	1,06	1,24
БМУ В	3,28	-3,38	121,0	78,2	3,15	-3,68	+3,96	-8,15	1,03	1,16
БМУ Г	3,06	-3,37	119,2	78,0	3,26	-3,47	-6,13	-2,88	1,04	1,06
БМУ Д	3,10	-3,61	114,4	83,6	3,03	-3,93	+2,26	-8,14	1,16	1,29
Среднее отклонение по всем образцам, %							3,8	6,42		
Среднеквадратическое отклонение							1,75	2,57		

В четвертой главе приведены численные исследования неразрезных железобетонных балок, усиленных полимеркомпозиционными материалами под нагрузкой и сопоставление результатов расчета с опытными данными, в том числе и других авторов.

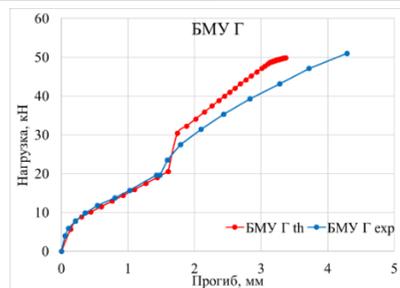
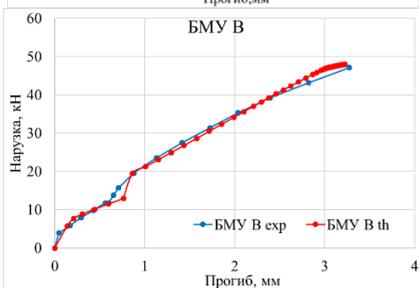
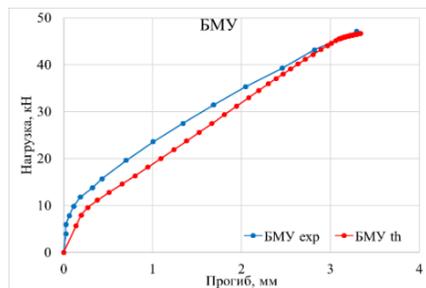
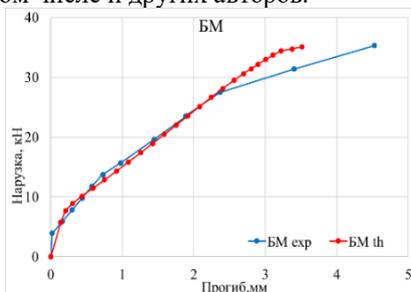
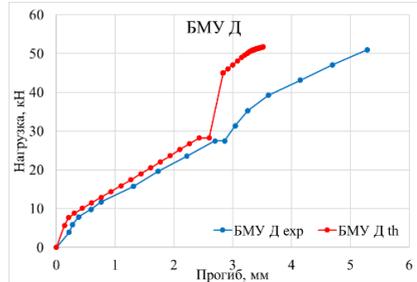


Рисунок 9 — Опытные и теоретические графики нагрузка-прогиб в середине пролетов экспериментальных образцов всех серий



В результате сравнения опытных и расчетных данных, приведенных в таблицах 1-2, выявлено, что предлагаемая методика может быть использована для определения прочностных и деформативных характеристик, а также характера перераспределения усилий неразрезных железобетонных балок, внешне армированных углепластиком под нагрузкой.

При расчете экспериментальных образцов по разработанной методике среднее квадратическое отклонение составляет: по разрушающей нагрузке – 0,99; по прогибам – 0,20. В случае использования инженерной методики расчета среднее квадратическое отклонение составляет: по разрушающей нагрузке – 7,03; по прогибам – 0,69.

Таблица 4 – Сравнение теоретических значений изгибающих моментов при различных схемах усиления

Этап нагружения, %	Изгибающий момент, кНм					Отношение моментов $\frac{M_{оп}}{M_{пр}}$				
	$M_{пр}^{эт}/M_{оп}^{эт}$	$M_{пр}^0/M_{оп}^0$	$M_{пр}^{30}/M_{оп}^{30}$	$M_{пр}^{50}/M_{оп}^{50}$	$M_{пр}^{70}/M_{оп}^{70}$	Нагрузка усиления, %				
						–	0	30	50	70
30	0,76/0,92	0,78/0,88	-/-	-/-	-/-	1.22	1.13	-	-	-
40	0,97/1,33	1,03/1,18	1,01/1,21	-/-	-/-	1.37	1.15	1.19	-	-
50	1,17/1,71	1,27/1,51	1,30/1,46	-/-	-/-	1.46	1.19	1.12	-	-
60	1,38/2,08	1,51/1,84	1,54/1,8	1,48/1,89	-/-	1.51	1.22	1.17	1.28	-
70	1,60/2,47	1,75/2,17	1,78/2,12	1,83/2,02	-/-	1.55	1.24	1.19	1.10	-
80	1,80/2,84	2,00/2,49	2,02/2,44	2,08/2,32	1,95/2,60	1.57	1.25	1.21	1.12	1.33
90	2,03/3,23	2,24/2,81	2,26/2,77	2,32/2,65	2,31/2,69	1.59	1.25	1.22	1.14	1.16

С целью исследования влияния системы усиления на перераспределение внутренних усилий были выполнены расчеты неразрезных железобетонных балок, внешне армированных углепластиком в пролетах при различном уровне нагружения.

Уровень нагрузки усиления принят 0%; 30%; 50%; 70% от разрушающей не усиленных образцов.

Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Для всех балок, усиленных под нагрузкой в пролетах, характерна следующая тенденция изменения соотношения опорного и пролетного моментов: на первом этапе после усиления, происходит падение соотношения (2,5%, 12%, 14% у усиленных при 30%, 50% и 70% соответственно), а затем плавное возрастание на последующих этапах. В то время как у эталонных образцов оно постоянно растёт.

На основании данных, представленных в таблице 4 можно сделать вывод о влиянии уровня нагрузки при усилении на характер перераспределения изгибающих моментов, т.е. внешнее армирование в пролете приводит к разгрузке опоры.

Кроме того, было выполнено сопоставление опытных и расчетных данных по прочности и деформативности неразрезных железобетонных балок, представленных в открытом доступе, в экспериментальных исследованиях С.М. Крылова, А.А. Корбух, А.Ф. Ashour.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика определения напряженно-деформированного состояния нормальных сечений железобетонных изгибаемых элементов, усиленных углепластиком под нагрузкой, с учетом полной диаграммы деформирования бетона на всех стадиях работы конструкции, в том числе и за критической с учетом уровня НДС (нагрузки), при котором проводилось усиление.

2. Разработана методика статического расчета двухпролетной балки переменной жесткости методом заданных деформаций.

3. Разработана методика расчета неразрезных железобетонных балок, усиленных углепластиком под нагрузкой, в основе которой лежит метод заданных деформаций, реализованный путем аппроксимации изогнутой оси балки кубическим сплайном. Данная методика позволяет выполнять расчет внешне усиленных полимеркомпозиционными материалами неразрезных железобетонных балок с различным видом нагружения, величиной пролетов, количеством участков в пролетах, в том числе определять параметры НДС любого сечения по всей их длине на всех этапах работы.

4. Принятый в представленной выше методике подход «от кривизны к моменту» существенно улучшает сходимость итерационного процесса при

расчете неразрезных балок, особенно на высоких уровнях нагружения, поскольку здесь значительным изменениям кривизны соответствуют небольшие изменения моментов. Таким образом, данный алгоритм позволяет определять параметры НДС сечений в том числе и в закритической области, что актуально при организации итерационных расчетов статически неопределимых железобетонных балок, т.к. приводит к стабилизации итерационного процесса и исключению его «раскачки».

5. По результатам проведенных экспериментальных исследований прочности нормальных сечений и деформативности неразрезных железобетонных балок, усиленных углепластиком на различном уровне нагружения, выявлены и экспериментально подтверждены характерные особенности их напряженно-деформированного состояния на всех этапах нагружения.

6. Анализ данных, полученных в результате экспериментальных исследований, расчета по нормативной инженерной методике, а также методике, учитывающей физическую нелинейность и стадийность загрузений, заложенной в расчетном комплексе ЛИРА-САПР, показал, что предлагаемая методика расчета прочности нормальных сечений и деформативности неразрезных железобетонных балок, усиленных полимеркомпозиционными материалами под нагрузкой, имеет приемлемую точность. Кроме того, прочностные и деформативные характеристики опытных образцов неразрезных балок, представленных в аналогичных экспериментальных исследованиях, сопоставимы с результатами расчета, полученными по предлагаемой методике.

7. На основе проведенных экспериментально-аналитических исследований влияния внешнего армирования из углепластика выявлен характер перераспределения внутренних усилий в двухпролетных неразрезных железобетонных балках, внешне армированных углепластиком.

8. Подтверждена научно-техническая гипотеза о влиянии уровня нагрузки усиления на прочность нормальных сечений, деформативность и характер перераспределения усилий в неразрезных железобетонных балках, внешне армированных полимеркомпозиционными материалами.

Дальнейшее развитие исследований, представленных в настоящей работе, связано с необходимостью разработки расчетной модели и методики расчета наклонных сечений неразрезных железобетонных балок, усиленных углепластиком под нагрузкой, что позволит существенно расширить область практического применения указанных конструкций.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в сборниках трудов конференций, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science и др.:

1. Smolyago, G. A. Experimental studies of the strength of reinforced concrete flexible elements forced with carbon fiber / G. A. Smolyago, Y. L. Obernikhina // Lecture notes in civil engineering. – 2021. – Vol. 151. – pp. 71-77.
2. Smolyago, G. A. Stress-strain State of RC Beams Strengthened with CFRP at different Levels of Loading / G. A. Smolyago, Y. L. Obernikhina // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 533. – pp. 20-29.

Публикации в изданиях, рекомендованных в перечне ВАК:

3. Смоляго, Г. А. Обзор эффективности усиления полимеркомпозитными материалами. Огнестойкость конструкций / Г. А. Смоляго, Я. Л. Обернихина // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2021. – № 2. – С. 15-27.
4. Смоляго, Г. А. Прочность и деформативность изгибаемых железобетонных элементов, усиленных углепластиком / Г.А. Смоляго, Я. Л. Обернихина // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 4. – С. 25-37.
5. Смоляго, Г. А. Статический расчет однопролетной балки переменной жесткости методом заданных деформаций / Г.А. Смоляго, А.Е. Жданов, Н.В. Фролов, Я.Л. Обернихина // Строительная механика и расчет сооружений. – 2023. – № 5. – С. 12-21.
6. Смоляго, Г. А. Статический расчет неразрезной балки переменной жесткости методом заданных деформаций / Г. А. Смоляго, А. Е. Жданов, Я. Л. Обернихина, Н.В. Фролов // Строительная механика и расчет сооружений. – 2024. – № 2. – С. 2-13.
7. Обернихина, Я. Л. Перераспределение усилий в неразрезных железобетонных балках, усиленных углепластиком под нагрузкой / Г. А. Смоляго, Я. Л. Обернихина // Строительство и реконструкция. – 2024. – № 5(115). – С. 23-30.

Публикации в других изданиях

8. Смоляго, Г. А. Усиление изгибаемых железобетонных элементов углеволокном с учетом истории нагружений / Г. А. Смоляго, Я. Л. Ищук, А. П. Чередниченко // Наука и инновации в строительстве: Сборник докладов Международной научно-практической конференции (к 165-летию со дня рождения В.Г. Шухова), Белгород, 17 апреля 2018 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2018. – С. 120-124.
9. Смоляго, Г. А. Расчет деформативности изгибаемых железобетонных элементов переменной жесткости / Г.А. Смоляго, А. Е. Жданов, Я. Л. Ищук, Н. В. Фролов // "Лолейтовские чтения-150". Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям: Сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 150-летию А. Ф. Лолейта. – Москва: Изд-во МИСИ – МГСУ, 2018. – С. 385-390.
10. Ищук, Я. Л. Обзор эффективности системы усиления полимеркомпозитными материалами. Свойства материалов при повышенных температурах / Я. Л. Ищук, Н. В. Водяхин // IV Международный студенческий строительный форум - 2019: Сборник докладов (К 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова),

Белгород, 26 ноября 2019 года. Том 2. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. – С. 39-45.

11. Смоляго, Г. А. Обзор различных типов отслоения системы внешнего армирования при усилении неразрезных железобетонных балок и меры их предотвращения / Г. А. Смоляго, Я. Л. Обернихина // Наука и инновации в строительстве: Сборник докладов IV Международной научно-практической конференции, Белгород, 17 апреля 2020 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2020. – С. 179-184.

12. Смоляго, Г. А. Влияние уровня нагрузки усиления на несущую способность железобетонных балок, внешне армированных углепластиком / Г. А. Смоляго, А. Е. Жданов, Я. Л. Обернихина // Железобетонные конструкции. – 2023. – Т. 3. – № 3. – С. 49–61.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. «Программа для расчета однопролетной балки переменной жесткости»/ Смоляго Г.А., Смоляго Н.А., Фролов Н.В.; заявитель и патентообладатель Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. - № RU 2019619649; Заявл. 10.07.2019; опубл. 22.07.2019.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. «Программа для построения диаграмм деформирования бетона и арматуры с учетом коррозионных повреждений»/ Смоляго Г.А., Смоляго Н.А., Фролов Н.В.; заявитель и патентообладатель Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. - № RU 2019665479; Заявл. 13.11.2019; опубл. 22.11.2019.

Обернихина Яна Леонидовна

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ НЕРАЗРЕЗНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК, УСИЛЕННЫХ ПОЛИМЕРКОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ПОД НАГРУЗКОЙ

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 13.02.2025. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 1,22. Тираж 80 экз. Заказ №

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете им.
В.Г. Шухова

308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46