

На правах рукописи



ЮШИН Алексей Владимирович

**ПРОЧНОСТЬ НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ
МНОГОПРОЛЕТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
КОНСТРУКЦИЙ, УСИЛЕННЫХ
ФИБРОАРМИРОВАННЫМИ ПЛАСТИКАМИ**

**Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции,
здания и сооружения**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» на кафедре железобетонных и каменных конструкций

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Морозов Валерий Иванович

Официальные оппоненты: **Селяев Владимир Павлович**,
академик РААСН, доктор технических наук,
профессор, ФГБОУ ВПО «Мордовский
государственный университет им. Н.П. Огарева»,
г. Саранск, кафедра строительных конструкций,
заведующий;

Курлапов Дмитрий Валерьевич,
кандидат технических наук, доцент,
ФГКВОО ВПО «Военный институт (инженерно-
технический) Военной академии материально-
технического обеспечения им. генерала армии
А.В. Хрулева», г. Санкт-Петербург, кафедра
«Гидротехнических сооружений, строительных
конструкций и механики твердого тела»,
профессор.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВПО «Петербургский
государственный университет
путей сообщения Императора Александра I»**

Защита диссертации состоится «25» декабря 2014 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.03 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

Телефакс: (812) 316-58-72; Email: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте www.spbgasu.ru

Автореферат разослан «10» ноября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор

Кондратьева Лидия Никитовна

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

В последние годы в мировой строительной индустрии при реконструкции и усилении кирпичных, бетонных и железобетонных конструкций все чаще используют не традиционные стальные элементы, а полимерные материалы на основе углеродных, стеклянных или арамидных волокон, имеющие общее название фиброармированные полимеры (ФАП). ФАП представляет собой двухкомпонентный материал, состоящий из матрицы на основе эпоксидного связующего и армирующих волокон диаметром около 0,005мм, сплетенных в пучки.

Проблема исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) многопролетных железобетонных элементов, усиленных внешним армированием по наклонному сечению, относится к одной из наименее изученных. Подавляющее большинство работ затрагивают однопролетные конструкции, в то время как многопролетные встречаются в практике усиления гораздо чаще. Отечественные исследования последних лет зачастую затрагивают только нормальные сечения, в то время как разрушение изгибаемых элементов по нормальному и по наклонному сечению равновероятно. Разработка отечественных методик расчета конструкций, усиленных ФАП, находится на начальном этапе. Для практической реализации систем усиления внешним армированием применяются зарубежные инженерные методики, основанные на гипотезах, отличных от тех, что реализованы в нормативных документах Российской Федерации.

Современная научная литература, посвященная исследованию железобетонных конструкций, практически не затрагивает взаимного влияния внутренней стальной и внешней ФАП арматуры, изучения условий работы участка бетона, который одновременно служит основанием для установки внешней системы усиления и матрицей, обеспечивающей передачу усилий на стальную арматуру.

В то же время общепризнано, что применение внешнего ФАП армирования в значительной мере повышает несущую способность и жесткость изгибаемых и внецентренно сжатых элементов. Системы усиления внешним армированием успешно применяются в настоящее время при усилении конструкций гражданских и промышленных зданий и сооружений, как в нашей стране, так и за рубежом. Появление отечественных производителей нанотехнологичных композитных материалов при поддержке государственных программ индицирует высокий уровень интереса к подобным системам усиления на отечественном рынке. Поэтому в настоящее время одним из актуальных направлений исследования усиления железобетона является разработка метода расчета прочности наклонных сечений железобетонных многопролетных конструкций, усиленных внешней ФАП арматурой.

Степень разработанности темы исследования

Усиление и восстановление железобетонных конструкций с использованием различных композитных материалов началось с 50-х годов XX века, а широкое применение для усиления изгибаемых и сжатых железобетонных элементов композиты нашли на рубеже 1980-х годов, тогда же были начаты масштабные исследования таких усиливаемых конструкций.

Теоретическими основами стали работы российских и зарубежных ученых, посвященные экспериментальным исследованиям и построению метода расчета железобетонных элементов, усиленных композитными материалами: Е.З. Аксельрода, А.А. Балакирева, А.А. Гвоздева, С.В. Демишина, А.С. Залесова, Д.В. Картузова, Д.В. Курлапова, Ю.Б. Потапова, С.Н. Савина, В.П. Селяева, Д.Н. Смердова, В. И. Соломатова, Ю.Г. Хаютина, В.Л. Чернявского, А.А. Шилина, Р. М. Achita, R., A. Arteaga, J.A.O. Barros, V. Bianco, С. J. Burgoyne, A. D. Diego, R. Perera, G. Monti, Y. Sato, F. B. Varona, F. J. Vecchio и др.

Автором также использовались работы российских и зарубежных ученых в области усиления строительных конструкций и изучения наклонных сечений: А.И. Бедова, В.М. Бондаренко, М.С. Боришанского, В.Н. Байкова, В.И. Жарницкого, А.С. Залесова, О.Ф. Ильина, Ч.Б. Игнатавичуса, В.Г. Карабаша, Н.И. Карпенко, С.Н. Карпенко, Ю.А. Климова, Л.Р. Маиляна, Р.Л. Маиляна, В.И. Майорова, В.И. Морозова, Т.А. Мухамедиева, Н.М. Онуфриева, М.Ф. Сапрыкина, Р.С. Санжаровского, А.С. Силантьева, Э.Е. Сигалова, И.Н. Старишкова, М.С. Торяника, И. А. Титова, С.А. Тихомирова, С. Bach, H. Bay, W. Dilger, O. Graf, G.Kani, K. Kupfer, F. Leonhardt, E. Morsch, F. Richard, K. Schreder, Z. Vizi, R. Walther, P. Watstein, R. Walter и др.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является экспериментально-теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния и прочности наклонных сечений изгибаемых многопролетных конструкций, усиленных ФАП.

Задачи исследования:

1. Экспериментальные исследования влияния поперечного армирования стальной арматурой на вклад ФАП в общую прочность наклонного сечения.

2. Экспериментальные исследования влияния обратного изгибающего момента в зоне опасного наклонного сечения на вклад ФАП в общую прочность сечения.

3. Проведение численного эксперимента с использованием программно-вычислительного комплекса *Ansys*, реализующего метод конечных элементов (в нелинейной постановке), с целью определения полей напряжений и деформаций и оценка возможного характера трещинообразования и разрушения.

4. Разработка инженерного метода расчета, учитывающей особенности совместной работы системы усиления и усиливаемой конструкции и позволяющей получение адекватного результата, обеспечивающего необходимый запас прочности при проектировании данных конструкций.

Научная новизна исследования заключается:

– в результатах теоретического исследования напряженно–деформированного состояния двухпролетных элементов прямоугольного сечения, усиленных ФАП при поперечном изгибе, с использованием программного комплекса *Ansys* в нелинейной постановке, которое, в частности, показало, что с увеличением процента поперечного армирования стальной арматурой, уменьшается эффективность усиления;

– в разработке теоретических основ и метода расчета по прочности двухпролетных железобетонных элементов прямоугольного сечения, усиленных ФАП, при поперечном изгибе, который позволяет адекватно учесть взаимное влияние разных типов арматуры, а также влияние изгибающего момента на эффективность усиления;

– в полученных новых экспериментальных данных о влиянии внутреннего армирования на вклад ФАП в общую прочность наклонного сечения, которые подтвердили существование данного эффекта и позволили оценить его количественно; а также о влиянии изгибающего момента на вклад ФАП в общую прочность наклонного сечения, а именно снижение эффекта усиления при увеличении нормальных растягивающих напряжений в зоне свободного конца хомута усиления.

Основная научная гипотеза работы заключается в том, что использование внешнего армирования ФАП в неразрезных балках повышает их несущую способность по наклонному сечению, трещиностойкость и жесткость и обеспечивает возможность эффективного усиления, в том числе и без разгрузки усиливаемой конструкции.

Методологической основой диссертационного исследования послужили общенаучные методы исследования, в частности, метод моделирования (численный эксперимент в программном комплексе *Ansys*), экспериментальный метод (при проведении физических экспериментов), а также метод идеализации (при выводе расчетных положений и формул).

Область исследования соответствует паспорту специальности 05.23.01 – “Строительные конструкции, здания и сооружения” и относится к области исследования, предусмотренного пунктом 3. «Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований вновь возводимых, восстанавливаемых и усиливаемых строительных конструкций, наиболее полно учитывающих специфику воздействий на них, свойства материалов, специфику конструктивных решений и другие особенности».

Практическая ценность и реализация результатов исследований

На основании выполненных исследований предложена теоретическая модель неразрезной многопролетной балки, усиленной по наклонным сечениям внешним армированием ФАП, и разработан инженерный метод расчета, который позволяет уже на данном этапе исследования выполнять проектные работы по усилению изгибаемых железобетонных конструкций. Результаты работы использованы при проектировании усиления ригелей здания 473 ОСН

ПДСС на территории военного городка №30, г. Кронштадт. Отдельные положения диссертации использованы в учебном процессе СПбГАСУ при изучении студентами и магистрантами по направлению «Строительство» специального курса железобетонных и каменных конструкций.

Достоверность результатов исследования обеспечивается применением стандартных методов испытаний, использованием испытательного оборудования и приборов, которые были метрологически аттестованы, применением общепринятых гипотез и допущений, удовлетворительным согласием результатов эксперимента и теоретических исследований, а также сопоставлением с работами других авторов.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

– I Международном конгрессе «Актуальные проблемы современного строительства» (2012 год, СПбГАСУ);

– Международном конгрессе, посвященном 180 – летию СПбГАСУ «Наука и инновации в современном строительстве – 2012 (2012 год., СПбГАСУ)»;

– II Международном конгрессе «Актуальные проблемы современного строительства» (2013 год, СПбГАСУ);

– 70-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета (2014 год, СПбГАСУ).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 5 печатных работах, общим объемом 1.9 п.л., лично автором - 1.5 п.л., в том числе 3 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав с выводами и общих выводов. Диссертация содержит 121 страницу машинописного текста, 4 таблицы, 40 рисунков, 63 формулы и список использованной литературы из 127 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

Во введении обоснована актуальность исследования, кратко сформулирована конкретная проблема, обозначены цель и задачи, практическая и научная значимости.

В первой главе: «Состояние вопроса. Направление дальнейших исследований» рассмотрены экспериментальные и теоретические исследования различных авторов, показано современное состояние вопроса изучения железобетонных конструкций, усиленных ФАП по наклонному сечению, с учетом особенностей совместной работы внешнего армирования и усиливаемой конструкции.

Во второй главе: «Разработка метода расчета прочности наклонных сечений многопролетных железобетонных конструкций, усиленных внешним армированием ФАП» подробно описываются выполненные автором численные эксперименты в программном комплексе “Ansys” в нелинейной постановке. Выполнен анализ НДС усиленной балки на основе проведенных численных экспериментов, сформулированы основные предпосылки к расчету, разработан

инженерный метод расчета многопролетных конструкций, усиленных ФАП по наклонному сечению.

В третьей главе: “Экспериментальные исследования двухпролетных балок, усиленных ФАП по наклонному сечению”, приводятся сведения о результатах экспериментальных исследований, выполненных на изгибаемых железобетонных балках, усиленных по наклонному сечению в зоне обратного момента. Выполняется анализ основных экспериментально-теоретических результатов и оценка адекватности разработанного метода расчета.

В заключении приводятся основные результаты диссертации и намечаются пути дальнейших исследований.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Теоретические исследования напряженно–деформированного состояния железобетонных элементов, усиленных ФАП по наклонному сечению при поперечном изгибе с использованием программного комплекса “Ansys”, в том числе в нелинейной постановке.

Для моделирования работы многопролетной железобетонной конструкции, усиленной полимерным материалом по наклонному сечению, был проведен численный эксперимент в программной системе конечно-элементного анализа *Ansys*. Публикации последних лет отечественных и зарубежных авторов указывают на достаточно точное воссоздание картины трещинообразования и вида разрушения при полном использовании всего функционала программы для моделирования железобетона.

Задачи численного эксперимента:

- Определение характера напряженно–деформированного состояния двухпролетной железобетонной балки, усиленной композиционным материалом;
- Графическое представление изополей главных сжимающих и растягивающих напряжений (а также их численных значений);
- Определение направления главных площадок сжимающих и растягивающих напряжений;
- Моделирование предполагаемой критической наклонной трещины и поверхностей выкола бетона основания на основе численных значений главных сжимающих и растягивающих напряжений с учетом направления главных площадок;
- Определение влияния поперечного армирования стальными стержнями на вклад внешнего армирования в общую прочность сечения;
- Получение кривых деформирования (нагрузка-прогиб) в процессе нагружения балок вплоть до разрушения.

Объектом моделирования стали три двухпролетных железобетонных балки длиной 2460 мм, сечением 120x220 мм (см. рис. 1). Балки имеют

одинаковые пролеты среза (300 мм), но различный шаг поперечной арматуры в зоне центральной опоры. Каждая из балок моделировалась в двух вариантах – с усилением и без. Усиление предусматривалось в пролете среза U-образными хомутами из углепластика холодного (площадочного) твердения. Хомуты устанавливались шириной 50мм с шагом 100мм.

Крайние опоры балки – шарнирные подвижные, центральная – шарнирная неподвижная.

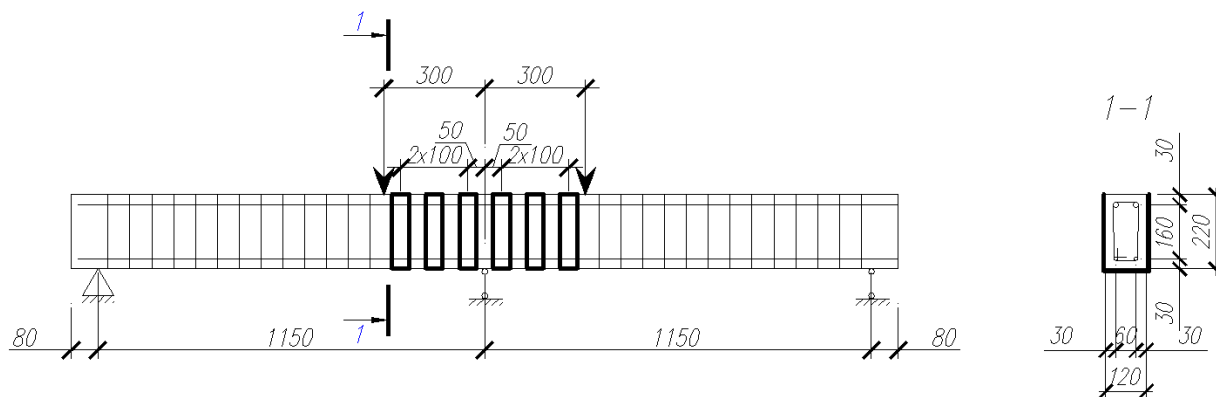


Рис. 1. Общий вид моделируемых балок.

Характеристики бетона, арматуры и податливость контакта бетон-ФАП вводились с учетом их нелинейности на основе диаграмм напряжения-деформации.

Бетон моделировался при помощи объемных конечных элементов *solid65*. Работа бетона представлена с помощью модели Вилльяма и Варнке, являющаяся развитием трехинвариантного критерия прочности Гениева Г.А. Рассматривалось два основных механизма разрушения - от сжатия и от растяжения. Моделирование стальной арматуры выполнялось стержневыми конечными элементами *link8*. Для моделирования арматуры использована двухлинейная диаграмма Прандтля в соответствии с СП 52-101-2003. Композиционный материал усиления замоделирован при помощи оболочечных конечных элементов *shell181*, при этом его характеристики (толщина, модули упругости, модули сдвига) вводились как для системы усиления в целом (углепластиковое волокно совместно со связующим). Работа материала усиления предусмотрена только в упругой стадии. Связь между бетонной поверхностью и материалом усиления моделировалась при помощи элементов *contal73*, которые позволяют задать требуемый закон взаимодействия двух поверхностей. В качестве закона деформирования для *contal73* принята двухлинейная диаграмма касательных напряжений, приведенная в Fib Bulletin 14. Общий вид модели показан на рис. 2.

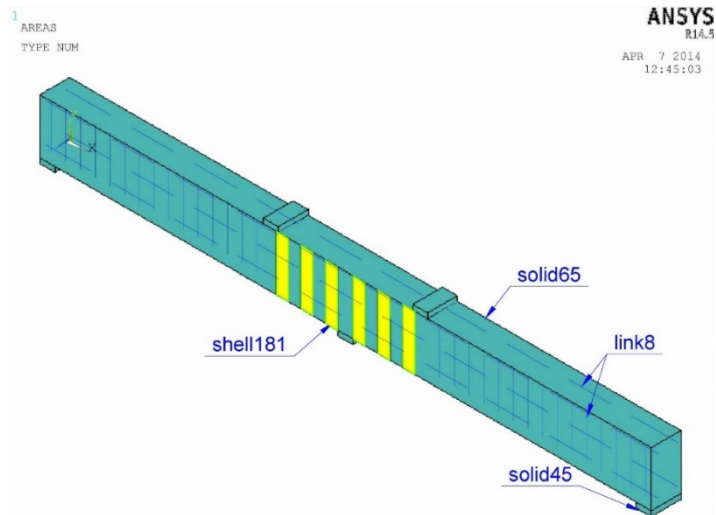


Рис. 2. Общий вид балки, смоделированной в программном комплексе Ansys

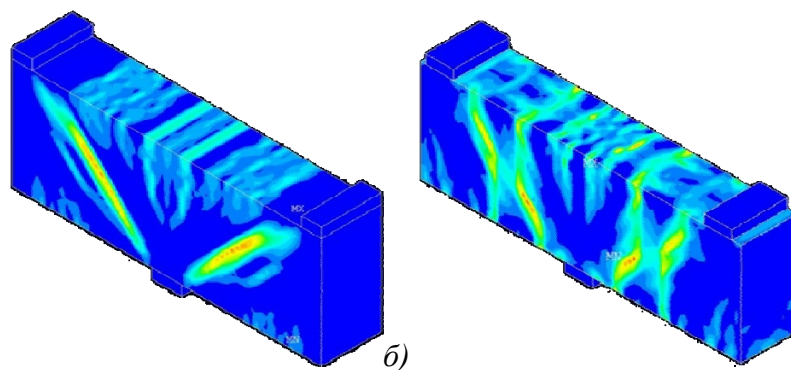


Рис. 3. Этюры главных напряжений а) в балке без усиления, б) в балке с усилением

На трехмерных изображениях изополей главных напряжений в усиленных балках заметны экстремумы главных напряжений на верхней грани балки, в зоне свободных концов хомутов усиления, причем по значению эти точки сравнимы с максимальными значениями главных напряжений в зоне образования критической наклонной трещины.

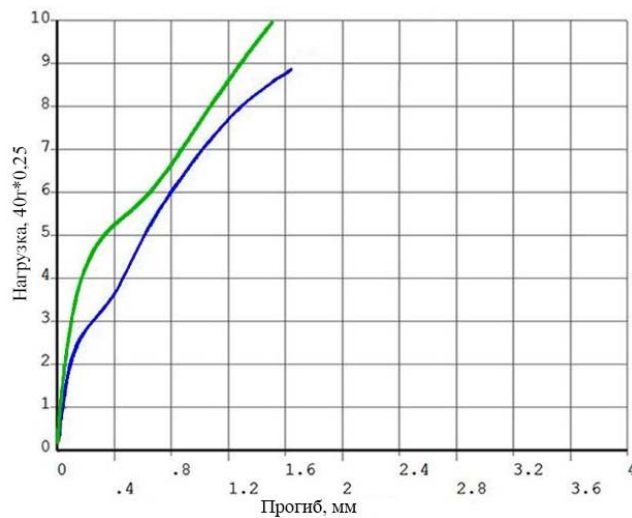


Рис. 4. График прогиб-нагрузка усиленного (зеленым цветом) и неусиленного (синим цветом) образца.

Численный эксперимент показал, что вклад ФАП в общую прочность наклонного сечения в значительной мере зависит от наличия и процента армирования стальной поперечной арматурой. В качестве основного вида разрушения усиленной балки предполагается выкол бетона основания, начинающийся с точек максимальных главных растягивающих напряжений у свободных концов хомутов внешнего армирования.

2. Впервые разработаны теоретические основы и метод расчета по прочности железобетонных элементов, усиленных внешней арматурой ФАП по наклонному сечению, с учетом влияния внутреннего армирования.

Предпосылки и допущения метода расчета:

- прочность системы усиления прямо пропорциональна прочности бетона основания на растяжение;

- вклад композиционного материала в общую прочность наклонного сечения обратно пропорционален количеству стальных поперечных стержней пересекающих наклонную трещину;

- определение проекции наклонной трещины производится по аналогии с методикой, принятой в СП52-101-2003;

- толщина, модули упругости, коэффициенты Пуассона и прочие характеристики материала усиления принимаются как для системы в целом (армирующих волокон пластика, отвердевших в полимерной матрице).

Применение современных материалов и технологий наклейки внешнего армирования при должном контроле качества строительных работ практически исключает возможность расслаивания конструкции по границе ФАП-бетон. Прочность сцепления материала усиления в подавляющем случае выше прочности на растяжение наиболее распространенных конструктивных бетонов (до класса В60).

Условие прочности наклонных сечений на поперечную силу принято в виде:

$$Q \leq Q_b + Q_{sw} + Q_f + Q_s + F_{crc}, \quad (1)$$

где Q – поперечная сила, определяемая внешней нагрузкой, расположенной по одну сторону рассматриваемого наклонного сечения;

Q_{sw} – поперечная сила, воспринимаемая поперечной стальной арматурой;

Q_f – поперечная сила, воспринимаемая внешним армированием ФАП;

Q_s – поперечная сила, воспринимаемая продольной арматурой (нагельный эффект);

F_{crc} – то же, воспринимаемая силами зацепления берегов трещины.

Максимальное усилие, передаваемое каждой ветвью хомута на бетон, определяется прочностью бетона основания на растяжение. Площадь поверхности потенциально опасных призм выкола бетона определена по следующей схеме:

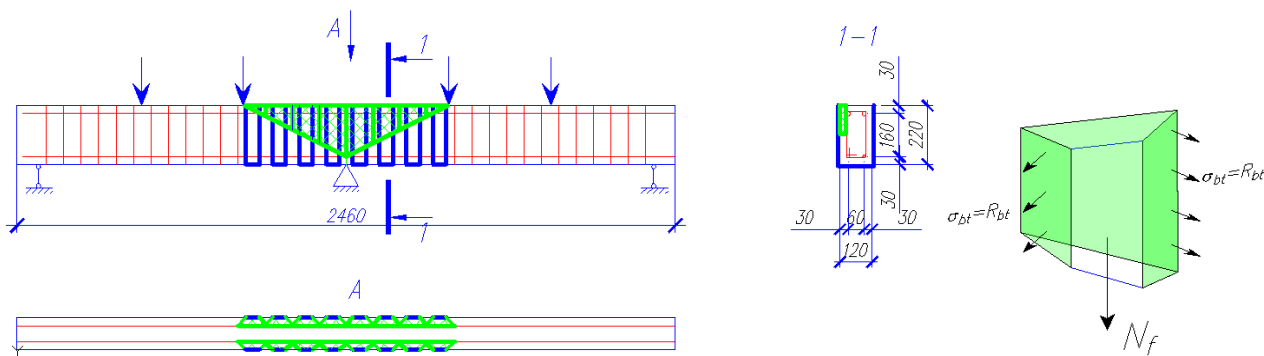


Рис.5. К определению площади конуса выкола бетона основания

$$A_{fcr,i} = L_{an,i} \cdot (w_f + 2a) + 2 \cdot L_{an} \cdot 1,41a \quad (2)$$

где w_f ширина хомута ФАП;
 a – расстояние до центра тяжести продольной рабочей арматуры;
 $L_{an,i}$ - длина анкеровки хомута за грань наклонной трещины.

В усиленной балке бетон основания в зоне обратного момента находится в плоском напряженном состоянии двухосного растяжения, что влияет на его работу в худшую сторону. Для учета условий работы вводится понижающий коэффициент к прочности бетона на растяжение α_t , определяемый согласно (4). Предельное усилие в i -м хомуте $N_{fw,i}$ найдем как:

$$N_{fw,i} = A_{fcr,i} \cdot (1 - \alpha_t) R_{bt}, \text{ где} \quad (3)$$

$A_{fcr,i}$ – площадь выкола бетона основания;

$$\alpha_t = 0,04 \frac{M}{zR_{bt}bh_0}; \quad (4)$$

z – плечо внутренней пары сил, м;

M – изгибаемый момент в рассматриваемом сечении, Н.

R_{bt} – расчетное значение сопротивления бетона осевому растяжению, Па;

b – ширина балки, м;

h_0 – рабочая высота сечения, м.

Стальная поперечная арматура и внешнее армирование ФАП, по данным численного эксперимента, оказывают взаимное влияние, таким образом, принцип суперпозиции, реализованный в существующих методиках, не применим. Увеличение процента армирования стальной арматурой уменьшает эффект усиления. Этот фактор учтен коэффициентом суммарного армирования μ_{fw} :

$$\mu_{fw} = \frac{A_{fw}}{bc} - \frac{A_{sw}R_{sw}}{0,1bcR_{fw}}, \quad (5)$$

где A_{fw} – площадь поперечного сечения хомутов ФАП;

b – ширина поперечного сечения;

c – проекция опасного наклонного сечения;

A_{sw} – площадь поперечного сечения стальных хомутов;

R_{sw} и R_{fw} – расчетное сопротивление поперечной арматуры стальной и ФАП соответственно.

Вклад внешнего поперечного армирования ФАП определен как

$$Q_{fw} = N_{fw} \cdot \mu_{fw} \cdot (1 + \cos \beta + \cos \alpha), \quad (6)$$

где β – угол наклона критической трещины;

α – угол между перпендикуляром к продольной оси элемента и направлением армирующих волокон ФАП.

Остальные составляющие прочности наклонного сечения определим с помощью блочной модели А. С. Залесова.

Расчет наклонных сечений усиленного элемента на действие изгибающего момента произведен из условия:

$$M \leq R_s A_s (h_0 - \frac{x}{2}) + Q_{sw} \frac{c}{2} + Q_{fw} \frac{2}{3} c \quad (7)$$

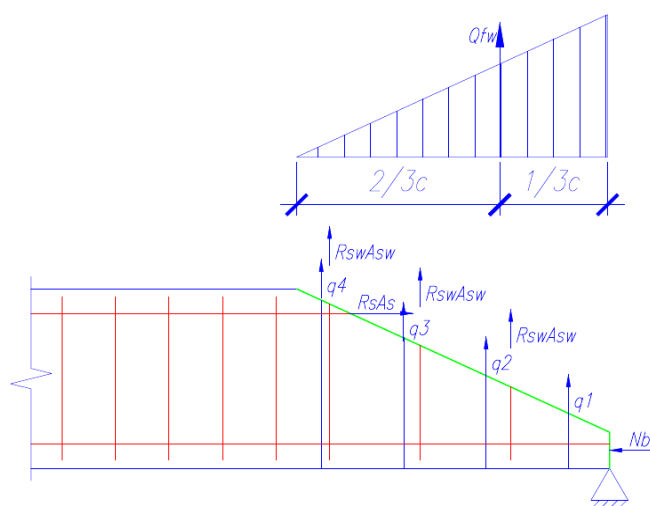


Рис. 6. К определению уравнения равновесия моментов

3. Впервые получены экспериментальные данные о влиянии внутреннего поперечного армирования и изгибающего момента на вклад ФАП в общую прочность наклонного сечения.

Для изучения работы железобетонных элементов, усиленных ФАП по наклонному сечению, было изготовлено 9 образцов. Опытные балки отличались процентом поперечного армирования в зоне центральной опоры, наличием и способом усиления. Маркировка экспериментальных образцов балок приведена в таблице 1.

Характеристики материалов определялись прямыми испытаниями контрольных образцов на сжатие и растяжение. Для определения физико-механических характеристик бетона испытывались контрольные образцы призмы и кубы, изготовленные одновременно с основными опытными балками.

Все испытания для определения прочности производились согласно ГОСТ 10180-90. Для определения физико-механических характеристик ФАП испытывались контрольные образцы в виде лент размерами 25x500мм по ГОСТ 25.601-80.

Таблица 1

Маркировка экспериментальных образцов балок

№ п/п	Марка балки	Поперечное армирование стальными стержнями в пролете среза	Усиление внешними хомутами ФАП, ширина w, шаг s
1	Бм-1.1	-	-
2	Бм-2.1	Ø6 с шагом 110мм	-
3	Бм-3.1	Ø6 с шагом 85мм	-
4	Бм-1.2	-	w=50мм s=100мм под углом 90°
5	Бм-2.2	Ø6 с шагом 110мм	w=50мм s=100мм под углом 90°
6	Бм-3.2	Ø6 с шагом 85мм	w=50мм s=100мм под углом 90°
7	Бм-1.3	-	w=50мм s=100мм под углом α
8	Бм-2.3	Ø6 с шагом 110мм	w=50мм s=100мм под углом α
9	Бм-3.3	Ø6 с шагом 85мм	w=50мм s=100мм под углом α

Для усиления экспериментальных образцов применялась однонаправленная ткань из углеродного волокна структурного усиления SikaWrap-530С плотностью 530г/м², толщиной 0,293мм, модуль упругости при растяжении 240 000 Мпа, прочность при растяжении 4 000 Мпа.

Каждая балка испытывалась как двухпролетная свободно опертая, с пролетами по 1150 мм, загруженная в четвертях пролета двумя сосредоточенными силами.

Для фиксации прогибов были установлены индикаторы часового типа над каждой опорой и под точками приложения нагрузки (датчики И1...И5). Электромеханические тензометры Аистова были установлены на бетон в уровне нижней и верхней максимально растянутой арматуры (Т1, Т6, Т7), по высоте пролета среза (Т2, Т3, Т4, Т5) и вдоль растянутых волокон наиболее напряженного хомута ФАП (Т8 на балках с хомутами под углом 90° и Т2, Т3, Т4 на балках с наклонными хомутами). Схема установки приборов приведена на рис.7.

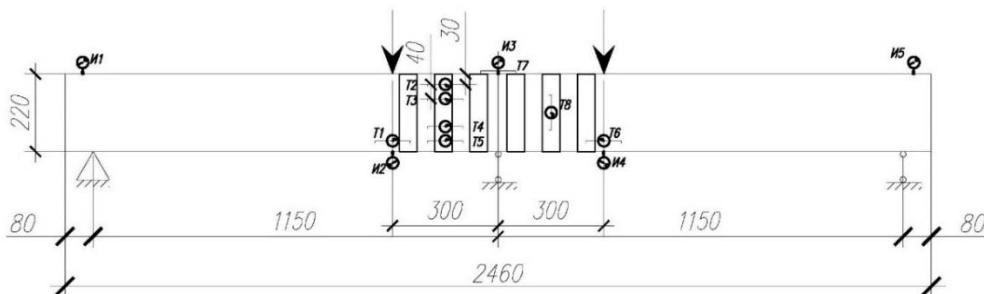


Рис. 7. Схема установки приборов

Первыми были испытаны балки без усиления. Образцы разрушались, как и ожидалось, - по наклонному сечению, в зависимости от типа поперечного армирования в пролете среза изменялся характер трещинообразования.

В балках с усилением процесс трещинообразования начинался с наклонных трещин на поверхности между хомутами внешнего армирования, причем по сравнению с не усиленным образцом наблюдалось образование большего количества трещин с меньшей шириной раскрытия. Усиление позволило балкам достичь напряжений, при которых образуются нормальные трещины.

При нагрузках, близких к критическим, с характерным звуком образовывался пучок небольших трещин (длиной 3-5мм, шириной раскрытия до 0,1мм) по длине той части хомута, что была ограничена с одной стороны предполагаемой наклонной трещиной, а с другой стороны – верхней гранью балки. Затем на верхней грани балки образовывалась округлая эллипсоидная трещина вокруг наиболее нагруженного хомута, на следующей ступени подобные трещины появлялись вокруг остальных хомутов в пределах одного пролета среза, в котором затем развивалась критическая наклонная трещина. Разрушение балки происходило с выколом защитного слоя бетона основания хомутов ФАП, сопровождавшимся хлопком.

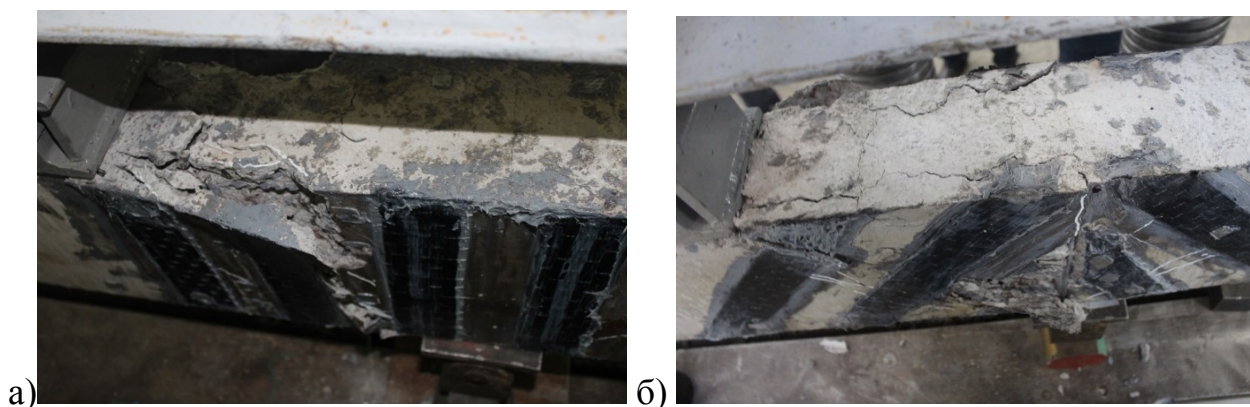


Рис. 8. Образцы в предельном состоянии а) Бм-2.2, б) Бм-3.2

Проведенные эксперименты подтвердили основные гипотезы, заложенные в теоретическую основу предложенного инженерного метода расчета. С увеличением процента армирования стальной арматурой эффективность системы усиления снижается. Разрушение образцов происходило с выколом бетона основания, за момент разрушения принимался момент падения нагрузки на динамометре, который визуально соответствовал разделению балки на блоки, чрезмерному раскрытию наклонной трещины или сколу бетона основания (отделению системы усиления от ядра балки).

По результатам проведенного натурного эксперимента была уточнена конечно-элементная модель в среде *Ansys* в части характеристик материалов и полуэмпирических коэффициентов условий работы бетона. После очередного этапа численных экспериментов в среде *Ansys* также был уточнен инженерный метод расчета. Результаты сравнительного анализа предлагаемого инженерного метода и натурных экспериментов приведены на рис. 9, а также в таблице 2.

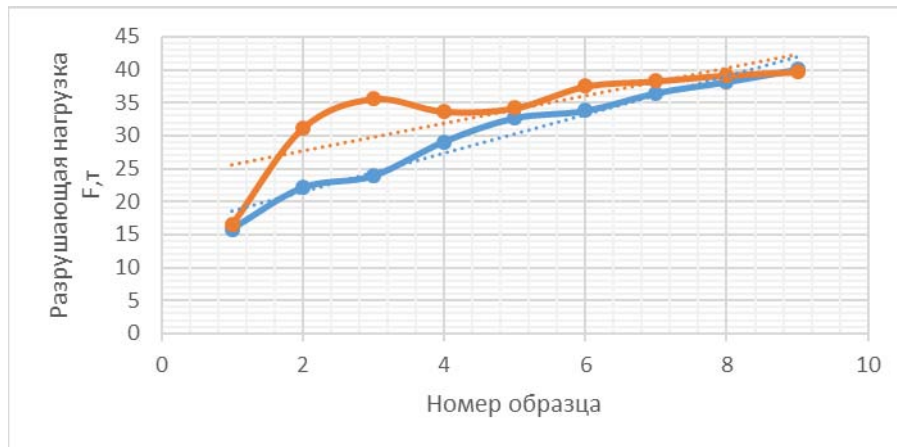


Рис. 9. Результаты расчета по предлагаемой инженерному методу и результаты натурального эксперимента

Таблица 2. Сравнение результатов расчета по предлагаемому инженерному методу с результатами натурального эксперимента

Серия	Образец	Теоретически определенная разрушающая нагрузка, т	Экспериментально определенная разрушающая нагрузка, т
Без усиления	Бм-1.1	15,8-25,0	16,5
Без усиления	Бм-2.1	22,1-28,9	31,12
Без усиления	Бм-3.1	23,9-30,0	35,6
С усилением под углом 90^0 к продольной оси	Бм-1.2	29,1	33,7
С усилением под углом 90^0 к продольной оси	Бм-2.2	32,7	34,2
С усилением под углом 90^0 к продольной оси	Бм-3.2	33,8	37,5
С усилением под углом α к продольной оси	Бм-1.3	36,5	38,3
С усилением под углом α к продольной оси	Бм-2.3	38,2	39,2
С усилением под углом α к продольной оси	Бм-3.3	40,1	39,7

Результаты экспериментов свидетельствуют о перспективности дальнейшего использования внешнего ФАП армирования для создания эффективных систем усиления.

Метод практического расчета, предложенный автором и базирующийся на адекватном учете взаимного влияния внешней и внутренней арматуры балки в сочетании с учетом влияния изгибающего момента на прочность бетона основания, дает результаты, удовлетворительно согласующиеся с выполненными экспериментами.

Общие выводы

1. Экспериментальные исследования подтвердили, что использование ФАП в качестве внешнего армирования железобетонных конструкций по наклонному сечению, повышает их несущую способность, трещиностойкость и жесткость. Усиление материалом, допускающим только упругое деформирование, не оказало значительного влияния на пластичность характера деформирования и разрушения балок. Трещины в усиленных образцах имеют меньшую ширину раскрытия и меньший шаг. Установка хомутов усиления позволила повысить несущую способность отдельных образцов более чем в 2 раза. Экспериментальные исследования, впервые выполненные в данной работе, показали, что значительное влияние на степень усиления образца оказывает наличие и количество внутренней стальной поперечной арматуры, эффективность усиления заметно снижается с увеличением процента поперечного армирования.

2. Предложен способ конечно-элементного моделирования железобетонных конструкций, усиленных ФАП с учетом условий совместной работы и нелинейного характера деформирования системы. Результаты численных экспериментов, выполненных в программном комплексе *Ansys Mechanical APDL* в нелинейной постановке с учетом реальных диаграмм деформирования материалов, свидетельствуют об адекватности полученных результатов и возможности достоверного прогнозирования механизма разрушения. По результатам численных экспериментов разработан макрос для расчета подобных конструкций, позволяющий пользователю рассчитать наклонное сечение, усиленное ФАП, с учетом нелинейности.

3. При одновременном действии значительной поперечной силы и изгибающего момента в наклонном сечении разрушение происходит в некоторых случаях раньше, чем позволяют спрогнозировать существующие методики расчета. Влияние растягивающих напряжений в бетоне в зоне анкеровки свободного хомута отрицательно сказывается на условиях работы бетона основания системы усиления, что учитывается предложенном инженерном методе расчета.

4. Впервые в диссертации разработана практический метод расчета железобетонных конструкций, усиленных ФАП по наклонному сечению, с учетом влияния внутреннего армирования и совместного действия перерезывающих сил и изгибающего момента.

5. Физическими экспериментами подтверждена форма поверхности выкола бетона основания системы усиления, положенная в основу инженерного метода расчета.

6. Данная диссертация, однако, не исчерпывает всего круга вопросов, связанных с построением теории деформирования железобетонных конструкций, усиленных ФАП по наклонному сечению. Дальнейшие исследования целесообразно направить на учет длительных процессов, наблюдаемых в подобных конструкциях, исследования микромеханических факторов, влияющих на совместность работы разномодульных материалов

системы, исследование влияния формы сечения изгибаемых элементов на эффективность усиления.

III. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Юшин, А. В.** К расчету наклонных сечений элементов железобетонных конструкций, усиленных композитными материалами [Текст] / А. В. Юшин // Вестник гражданских инженеров. – СПб: СПбГАСУ, 2013. – №4 (39). – С. 83-91. (0,6 п.л.)
2. **Юшин, А. В.** Анализ НДС двухпролетных железобетонных балок, усиленных композитными материалами по наклонному сечению, с учетом нелинейности / А. В. Юшин, В.И. Морозов [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru> (0,54/0,27 п.л.)
3. **Юшин, А. В.** Экспериментальные исследования двухпролетных железобетонных балок, усиленных композитными материалами по наклонному сечению [Текст] / А. В. Юшин, В.И. Морозов // Вестник гражданских инженеров. – СПб: СПбГАСУ, 2014 - №5 (46). – С 77-84 (0,7/0,4 п.л.)

Статьи в других изданиях:

1. **Юшин, А.В.** К расчету наклонных сечений элементов железобетонных конструкций, усиленных композитными материалами [Текст] // Материалы V-ой международной конференции «Актуальные проблемы архитектуры и строительства». – В 2 ч. Ч. I – СПб: СПбГАСУ, 2013. – С.163-169. (0,18 п.л.)
2. **Юшин, А.В.** Анализ НДС двухпролетных железобетонных балок, усиленных композитными материалами по наклонному сечению, с учетом нелинейности [Текст] // Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного строительства и пути их эффективного решения». – В 2 ч. Ч. I – СПб: СПбГАСУ, 2014. – С.31-34. (0,17 п.л.)
3. **Юшин, А.В.** Нелинейный анализ двухпролетных железобетонных балок, усиленных композитными материалами по наклонному сечению [Текст] // Доклады 70-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов университета: в 3 ч.; СПбГАСУ. – СПб., 2014.- Ч.1. – С.45-50. (0,21 п.л.)