

Учреждение образования
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи
УДК 624.012.36

МАТВЕЕНКО
Никифор Викторович

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ КОНЬКОВЫХ ЗОН ПРЕДВАРИТЕЛЬНО
НАПРЯЖЕННЫХ ДВУСКАТНЫХ БАЛОК
С ЛОМАННОЙ НИЖНЕЙ ГРАНЬЮ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения

Брест, 2024

Работа выполнена в учреждении образования «Брестский государственный технический университет»

Научный руководитель:	Малиновский Василий Николаевич , кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций учреждения образования «Брестский государственный технический университет», г. Брест
Официальные оппоненты:	Пойта Петр Степанович , доктор технических наук, профессор, профессор кафедры геотехники и транспортных коммуникаций учреждения образования «Брестский государственный технический университет», г. Брест
	Волик Алла Ричардовна , кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры архитектуры и строительства учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», г. Гродно
Оппонирующая организация:	Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель

Защита состоится «18» июня 2025 г. в 15⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.09.01 при учреждении образования «Брестский государственный технический университет» по адресу: 224017, Республика Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 267, ауд. 1/323.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять по адресу: 224017, Республика Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 267 на имя ученого секретаря совета по защите диссертаций Д 02.09.01, +375 162 32 17 11. E-mail: sf@bstu.by.

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

Автореферат разослан « 15 » мая 2025 г.

Ученый секретарь совета по
защите диссертаций Д 02.09.01



подпись

И. П. Павлова

ВВЕДЕНИЕ

Железобетонные стропильные балки являются одним из основных видов несущих элементов плоскостных покрытий одноэтажных промышленных зданий. Наиболее распространены балки пролетами 12 и 18 м, которые устанавливаются при их шаге 6 и 12 м. Чаще всего применяются двускатные балки двутаврового сечения и прямоугольного сечения с отверстиями в стенке, балки с параллельными поясами и односкатные балки, в том числе с ломаной нижней гранью. В последнее время нашли применение двускатные балки с изломом нижней грани вверх или так называемые «вспарушенные» конструкции. Они обладают большей архитектурной выразительностью, являются более экономичными и позволяют без создания предварительно напряжения перекрывать пролеты до 22 м. Одним из недостатков данного конструктивного решения является образование на стадии транспортировки и монтажа трещин в зонах концентрации напряжений – в местах перелома нижней грани. Предотвратить образование трещин возможно благодаря созданию предварительного напряжения. Таким образом было создано усовершенствованное конструктивное решение двускатной стропильной балки с ломаной нижней гранью и прямолинейной напрягаемой арматурой. Подобные элементы обладают теми же преимуществами, что и балки с пологим отгибом предварительно напряженной продольной арматуры, поскольку благодаря ломаному очертанию продольной оси балки прямолинейная напрягаемая арматура в опорной зоне располагается под углом к продольной оси и тем самым повышает сопротивление балок срезу и трещиностойкости наклонных сечений.

Создание предварительного напряжения приводит к возникновению нормальных и касательных напряжений еще до приложения внешней нагрузки. Кроме этого, из-за особенностей конструктивного решения двускатных балок с ломаной нижней гранью в коньковой зоне локальных полей напряжений, которые необходимо учитывать при проектировании конструкций.

В связи с этим изучение напряженно-деформированного состояния коньковых зон предварительно напряженных двускатных балок с ломаной нижней гранью и прямолинейной напрягаемой арматурой является важным и актуальным вопросом, поскольку это даст возможность рационального размещения продольного и поперечного армирования, что приведет к снижению расхода арматуры при сохранении требуемого уровня надежности согласно действующим техническим нормативно-правовым актам.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 гг., утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156 (п. 3 «Энергетика, строительство, экология и рациональное природопользование» («Новые строительные материалы и конструкции»)).

Часть результатов исследований, представленных в диссертации, использована при выполнении научно-исследовательской работы: «Разработать научно обоснованные модели сопротивления конструктивных систем из сборного железобетона, выполнить на их основе оценку надежности и живучести каркасов многоэтажных зданий, в том числе в особых расчетных ситуациях, и переработать (актуализировать) рабочие чертежи серий 1.020-1/87 и 1.020-1/83 «Конструкции каркаса межвидового применения для многоэтажных общественных зданий»», ХД № 22/148, БрГТУ, (№ госрегистрации 20230085 от 18.01.2023 г., ГУ «БелИСА»).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель: разработать научно обоснованную методику определения трещиностойкости коньковых зон предварительно напряженных двускатных балок с ломаной нижней гранью с учетом особенностей их напряженно-деформированного состояния.

Задачи исследования:

– выполнить анализ научно-технической литературы и усовершенствовать конструктивное решение двускатных стропильных балок;

– исследовать напряженно-деформированное состояние коньковой зоны двускатных предварительно напряженных балок при различных геометрических параметрах, коэффициенте поперечного армирования и степени предварительного обжатия бетона;

– разработать аналитическую модель для определения главных напряжений в коньковой зоне двускатных балок в зависимости от их геометрических параметров и уровня обжатия бетона;

– разработать предложения по расчету и конструированию коньковой зоны двускатных балок.

Объект исследования: предварительно напряженные двускатные балки с ломаной нижней гранью.

Предмет исследования: напряженно-деформированное состояние и трещиностойкость коньковых зон предварительно напряженных двускатных балок с ломаной нижней гранью.

Научная новизна

1. Научно обоснованное усовершенствованное конструктивное решение двускатных предварительно напряженных балок, отличающееся от известных устройством ломаного нижнего пояса и прямолинейной напрягаемой арматуры, которое позволяет снизить расход бетона на 5.5 % и арматуры на 7.8 % по сравнению с существующими конструктивными решениями двускатных стропильных балок.

2. Результаты экспериментально-теоретических исследований напряженно-деформированного состояния предварительно напряженных двускатных балок с ломаной нижней гранью при различных их геометрических параметрах, коэффициенте поперечного армирования и степени предварительного обжатия бетона, позволившие установить основные факторы, влияющие на трещиностойкость коньковых зон.

3. Теоретически обоснованные и экспериментально подтвержденные аналитические зависимости для определения главных напряжений в коньковой зоне двускатных балок, отличающиеся от известных зависимостей возможностью учитывать геометрические параметры балок и степень предварительного обжатия бетона, и опытные данные их подтверждающие.

Положения, выносимые на защиту

1. Усовершенствованный вариант конструктивного решения двускатной стропильной балки ломаного очертания, защищенный патентом на полезную модель и отличающийся от известных решений устройством ломаного нижнего пояса и прямолинейной напрягаемой арматуры, которое позволяет снизить расход бетона на 5.5 % и арматуры на 7.8 % по сравнению с существующими конструктивными решениями при сохранении требуемого уровня надежности согласно действующим техническим нормативно-правовым актам.

2. Результаты физического и численного эксперимента, относящиеся к трещиностойкости предварительно напряженных двускатных балок с ломаной нижней гранью при различных геометрических параметрах, коэффициенте поперечного армирования и степени предварительного обжатия бетона, которые позволили разработать аналитические зависимости для определения главных напряжений в коньковой зоне двускатных балок, применяемые для оценки соответствия строительных конструкций установленным требованиям

трещиностойкости и отличающиеся возможностью учитывать геометрические параметры балки и степень предварительного обжатия бетона.

3. Предложения по расчету и конструированию железобетонных двускатных балок, учитывающие их конструктивные особенности, которые позволяют снизить расход поперечной арматуры в типовых двускатных железобетонных балках на 3.3 %, при сохранении требуемого уровня надежности согласно действующим техническим нормативно-правовым актам.

Личный вклад соискателя ученой степени

Положения, выносимые на защиту, а также результаты экспериментальных и теоретических исследований получены автором самостоятельно. Научный руководитель В. Н. Малиновский определял направления исследований и принимал участие в обсуждении целей и задач исследования, а также анализе полученных результатов. В диссертацию не включены результаты, которые были получены другими соавторами или с другими соавторами. Материалы совместных публикаций использованы соискателем в объеме авторского вклада.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований доложены автором на следующих научных собраниях:

– XIX Международном научно-методическом семинаре «Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров Республики Беларусь», г. Брест, 23–25 октября 2014 г.;

– I Международной научно-технической конференции «Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР)», г. Брест, 30–31 марта 2017 г.;

– II Международной научной конференции «Актуальные проблемы исследования материалов, конструкций, технологий и организации строительства в трансграничном аспекте», г. Брест, 18–20 октября 2017 г.;

– III Международной научно-технической конференции «Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР)», г. Брест, 28–29 марта 2019 г.;

– Международной научно-практической конференции «Перспективные направления инновационного развития и подготовки кадров», г. Брест, 15–16 декабря 2022 г.;

– XXII Международном научно-методическом семинаре «Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров», г. Брест, 29–30 сентября 2022 г.;

– Международной научно-технической конференции «Строительная наука и образование в интегрированном пространстве с новыми регионами Российской Федерации», г. Москва, 13 апреля 2023 г.;

– VI Международной научно-технической конференции «Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР)», г. Брест, 23 ноября 2023 г.

Отдельные результаты научных исследований использованы при расчете и конструировании железобетонных рам пролетом 15, 18, 21 м для однопролетных сельскохозяйственных производственных зданий в рамках выполнения работ по договору ХД № 23/108, связанных с актуализацией (переработкой) рабочих чертежей типовых строительных конструкций (акт о внедрении научно-исследовательской работы от 25.03.2024 № 1) и внедрены в учебный процесс кафедры строительных конструкций учреждения образования «Брестский государственный технический университет» (акты об использовании результатов научно-исследовательской работы в учебном процессе от 03.04.2024 № 44 и № 45).

Опубликованность результатов диссертации

По теме диссертации опубликовано 17 работ:

– 9 статей в рецензируемых изданиях, включенных в Перечни ВАК Республики Беларусь (8 статей) и Российской Федерации (1 статья), общим объемом 4.8 авторских листа;

– 1 статья в другом научном издании объемом 0.64 авторских листа;

– 6 статей в сборниках научных конференций и семинаров общим объемом 2.7 авторских листа;

– 1 патент на полезную модель.

Структура и объем диссертации

Диссертация содержит разделы: «Введение», «Общая характеристика работы», 4 главы основной части, «Заключение», «Список использованных источников», 2 приложения.

Объем диссертации составляет 213 страниц. Работа содержит 77 рисунков на 51 странице, 16 таблиц на 13 страницах, список использованных источников из 110 наименований (в том числе 17 соискателя ученой степени) на 10 страницах, 2 приложения на 45 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой главе** диссертации представлен анализ конструктивных решений железобетонных балочных элементов. В разные годы предложения по усовершенствованию изгибаемых элементов вносили *G. Colonnetti, G. Magnel, F. Leonhardt, Л. В. Сасонко, Г. И. Бердичевский, Ю. Ф. Горожанский*.

Основными направлениями по повышению эффективности конструктивных решений изгибаемых элементов являются: изменение очертания конструкций (балки с ломаной верхней и (или) нижней гранью), применение эффективных поперечных сечений (двутаврового и таврового), использование предварительно напряженной продольной арматуры, в том числе отогнутой. При этом малоизученным остается вопрос, касающийся напряженно-деформированного состояния коньковых зон. По результатам многочисленных экспериментальных исследований, выполненных *S. Y. Debaiky, E. I. Elniema, F. Mseer, N. Alwash* и др., установлено, что в коньковой зоне двускатных железобетонных балок возможно образование наклонных трещин даже при отсутствии поперечной силы.

В связи с этим систематизированы и проанализированы основные факторы, влияющие на трещиностойкость наклонных сечений, которые были описаны в работах *М. С. Боришанским, А. С. Залесовым, Ю. К. Николаевым, О. Ф. Ильиным, А. Падюаром*. Изучены расчетные зависимости, позволяющие учитывать различные конструктивные особенности железобетонных балочных элементов при определении главных напряжений. Установлено, что наиболее существенное влияние на образование диагональных трещин в балочных элементах оказывают следующие внутренние и внешние усилия: поперечная сила; изгибающий момент и продольная сила, в том числе усилие предварительного обжатия бетона, в конструкциях с переменной высотой сечения; усилие в предварительно напряженных отогнутой арматуре и хомутах; сосредоточенные силы.

Установлено, что в коньковой зоне двускатных балок с ломаной нижней гранью возникают локальные поля напряжений нормальных $\sigma_{x.loc}$, $\sigma_{y.loc}$ и касательных $\tau_{xy.loc}$, которые оказывают существенное влияние на механизм трещинообразования и разрушения. Таким образом, актуальным является вопрос разработки аналитической модели для определения главных напряжений в коньковой зоне с учетом локальных напряжений $\sigma_{x.loc}$, $\sigma_{y.loc}$ и $\tau_{xy.loc}$.

Во **второй главе** представлен разработанный усовершенствованный вариант двускатной стропильной балки ломаного очертания, защищенный патентом на полезную модель и отличающийся от известных решений устройством ломаного нижнего пояса и прямолинейной напрягаемой арматуры (рисунок 1), а также приведены результаты экспериментальных исследований.

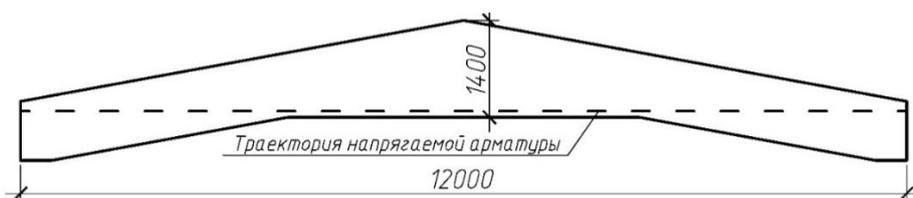


Рисунок 1 – Конструктивное решение двускатной стропильной балки с ломаной нижней гранью

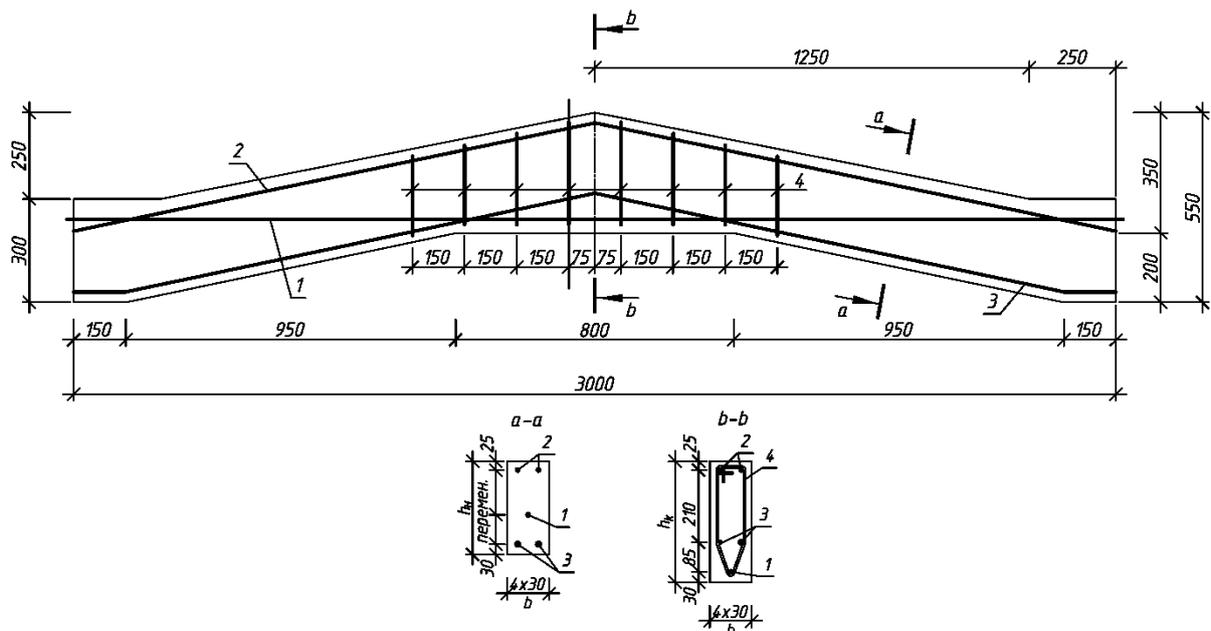
В результате сравнения материалоемкости опытно запроектированной железобетонной балки пролетом 12 м с типовой конструкцией действующей серии ПК-01-06, выпуск 8, установлено, что усовершенствованный вариант конструктивного решения балки снижает расход стали на 7.8 %, бетона – 5.5 %.

В связи с большой материалоемкостью и трудоемкостью изготовления полномасштабных стропильных балок экспериментальные исследования проводились на моделях стропильных балок с ломаной нижней гранью. Для определения параметров модели использовалось физическое подобие, которое позволило воспроизвести физические процессы, протекающие в натурной балке. При назначении размеров модельной балки использовалось два геометрических масштаба (аффинное подобие) – один для длины балки и высоты сечения $S_L = 4$, второй для ширины сечения $S_b = 1.5$. Поскольку изготовление модели возможно из тех же материалов, что и прототипа – бетона нормального веса и стальной арматуры, масштабный коэффициент для прочности материала на сжатие и растяжение и модуля упругости принят равным единице ($S_f = 1$).

Опытные балки имели сложное очертание: в приопорных зонах длиной 950 мм верхняя и нижняя грани были параллельны, а в средней части они имели очертание двускатной балки. Уклон верхней грани по всей длине балки постоянный и составлял 1:5. Высота сечения балок переменная: $h_n = 270$ мм для наклонной части балки, $h_k = 350$ мм в коньке. Ширина сечения $b = 120$ мм. В качестве напрягаемой принята канатная арматура класса Y1860 S7 диаметром 12.5 мм и стержневая класса S800 диаметром 14 мм. Конструктивное решение опытных балок приведено на рисунке 2, основные конструктивные характеристики – в таблице 1.

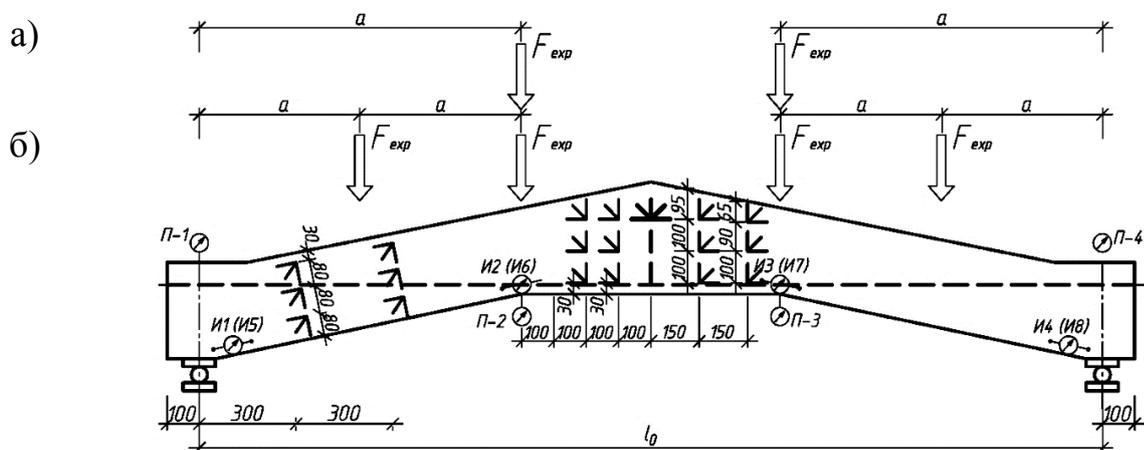
Таблица 1 – Основные характеристики экспериментальных балок

Марка балок	Размеры, см					Поперечная арматура в средней части	f_{ctb} МПа	Напрягаемая арматура	Величина предварительного напряжения арматуры (с учетом потерь), МПа
	b	h_k	h_n	l_0	a				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Бм-I-1	12	35	27	280	100	-	37.50	Ø12.5 Y1860 S7	1 226.60
Бм-I-2	12	35	27	280	50	-	36.71	Ø12.5 Y1860 S7	1 214.15
Бм-II-1	12	35	27	280	50	Ø6 S240 шаг 150 мм	57.46	Ø12.5 Y1860 S7	502.57
Бм-II-2	12	35	27	280	75	Ø6 S500 шаг 150 мм	56.55	Ø14 S800	778.09



1 – продольная напрягаемая арматура; 2 – верхняя ненапрягаемая арматура;
 3 – ненапрягаемая рабочая арматура опорных частей; 4 – поперечная арматура
Рисунок 2 – Конструктивное решение экспериментальных балок

Балки изготавливались в металлической силовой форме с натяжением канатов на упоры формы. Испытание выполняли по схеме свободно опертой однопролетной балки, нагруженной двумя или четырьмя сосредоточенными силами (рисунок 3).



И1 – И10 – индикаторы часового типа; П1 – П4 – прогибомеры;
 / – тензометрическая розетка; F_{exp} – внешняя нагрузка
 а) – вариант нагружения двумя силами; б) – вариант нагружения четырьмя силами
Рисунок 3 – Схема испытания балок

В процессе испытания балок определялись относительные деформации бетона приопорной и коньковой зон, прогибы, ширина раскрытия трещины и величина втягивания каната.

Основные результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 2. Характерные картины трещинообразования и разрушения экспериментальных балок показаны на рисунке 4.

Таблица 2 – Основные результаты экспериментальных исследований

Марка балок	Поперечная сила на опоре V_{exp} , кН		Изгибающий момент M_{exp} , кН·м		Характер разрушения
	при появлении наклонных трещин	при разрушении балок	при появлении нормальных трещин	при разрушении балок	
БМ-I-I	37.5	52.5	20	52.5	По наклонной трещине в середине пролета
БМ-I-2	40	60	11.25	45	По наклонной трещине со взаимным поворотом двух частей балки у опоры
БМ-II-1	50	95	15	71.25	По нормальной трещине в середине пролета
БМ-II-2	55	57.5	15	43.13	По наклонной трещине у опоры

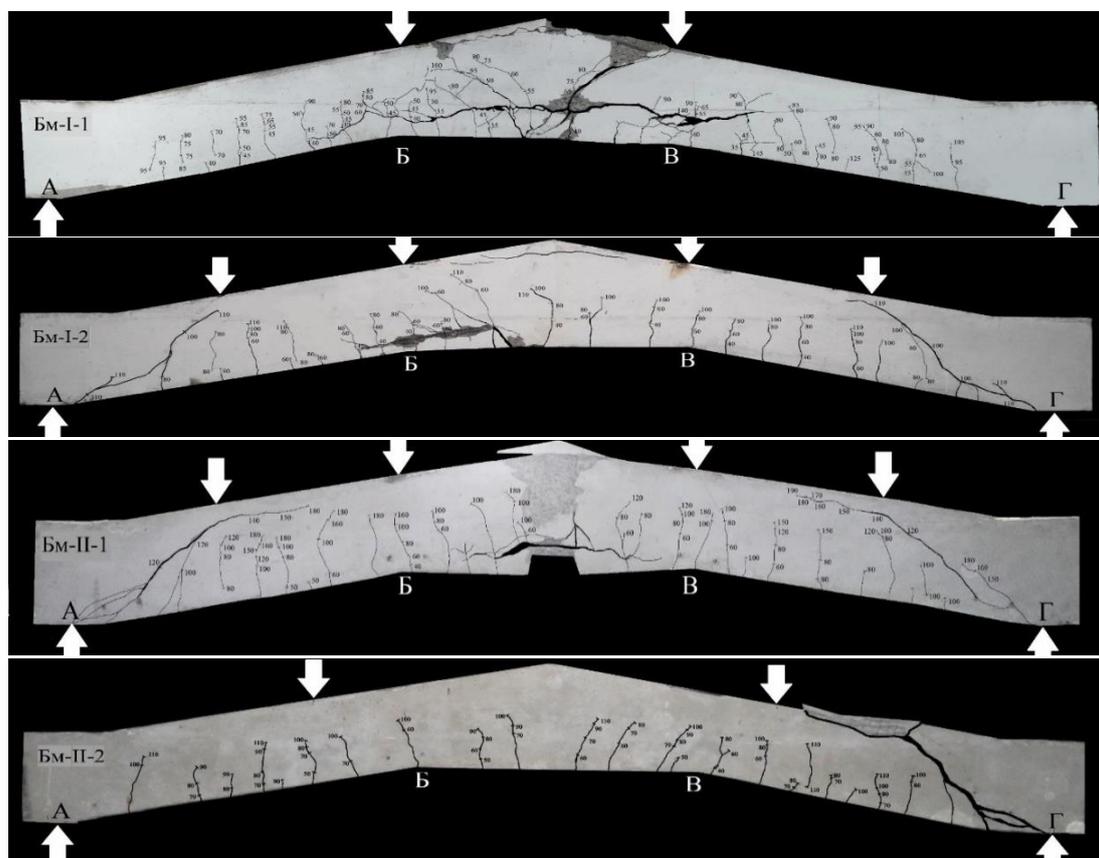


Рисунок 4 – Трещинообразование и разрушение опытных балок

Установлено, что на начальных этапах загрузки ($2 \cdot F/4 \cdot F = 40$ кН) в середине пролета балки происходило образование и развитие нормальных трещин и постепенное их отклонение с ориентацией в сторону пролетного груза при дальнейшем нагружении. Угол наклона трещин в момент разрушения составил в балках без поперечной арматуры в середине пролета 33° – 36° , в балках с поперечной арматурой – 48° – 58° (рисунок 4).

Для получения более подробных данных о напряженно-деформированном состоянии коньковой зоны опытных балок в **третьей главе** выполнено численное моделирование двускатных стропильных балок с различными геометрическими

параметрами и степенью предварительного обжатия бетона. Численное моделирование выполнялось в программном комплексе Simulia Abaqus.

Для оценки достоверности и точности результатов расчета численной модели выполнено сравнение их с данными физического эксперимента. Количественный и качественный анализ результатов численного моделирования и его сопоставления с экспериментальными данными, свидетельствует о достаточной сходимости полученных результатов и возможности его использования для исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов (коэффициент вариации вектора ошибок для применяемой численной модели при определении трещиностойкости нормальных и наклонных сечений, сопротивления железобетонного элемента $V_{\delta} = 12.22 \%$, $V_{\delta} = 18.29 \%$ и $V_{\delta} = 6.29 \%$ соответственно).

Для выявления основных параметров, влияющих на характер распределения напряжений в коньковой зоне двускатных балок с ломаной нижней гранью выполнено численное моделирование балок-прототипов длиной 12 м. В соответствии с поставленными целями и задачами данного исследования в качестве параметров вариации приняты: высота сечения балки в коньке, угол наклона верхней грани, величина предварительного напряжения арматуры и коэффициент поперечного армирования коньковой зоны. Данные об основных характеристиках балок прототипов, а также значения принятых параметров вариации представлены на рисунке 5.

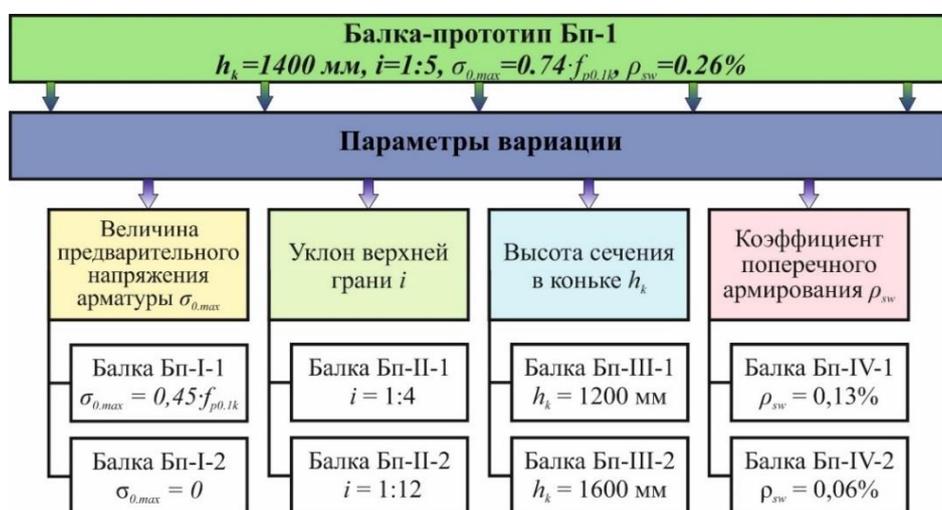
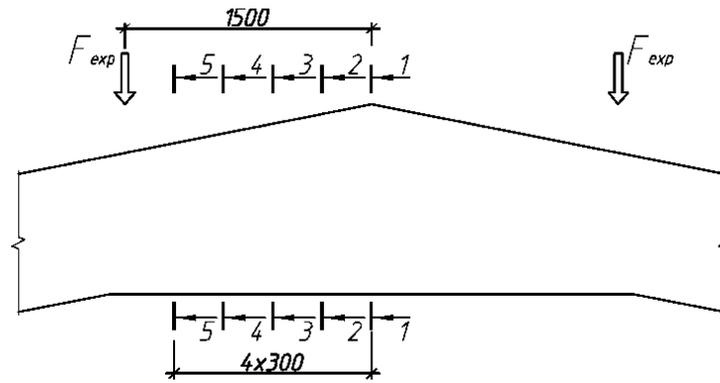


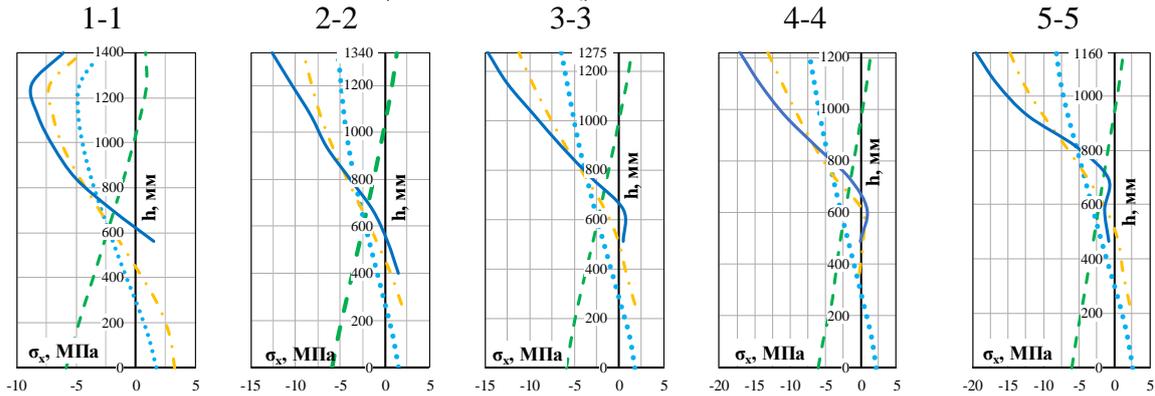
Рисунок 5 – Параметры вариации

По результатам численного моделирования построены эпюры нормальных (горизонтальных и вертикальных) и касательных напряжений в коньковой зоне балок-прототипов (рисунок 6), выявлены основные закономерности, влияющие на распределение напряжений в данной зоне. Установлен характер и степень влияния параметров вариации на напряженно-деформированное состояние коньковой зоны двускатных балок.

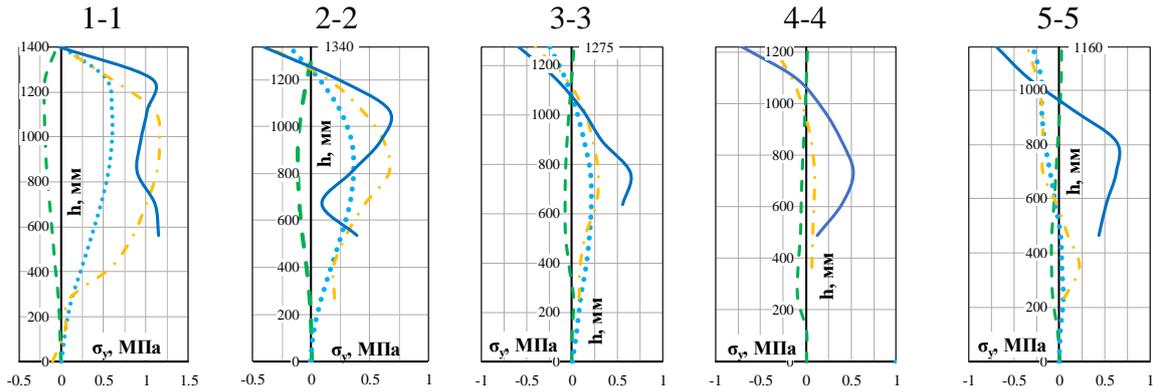
а)



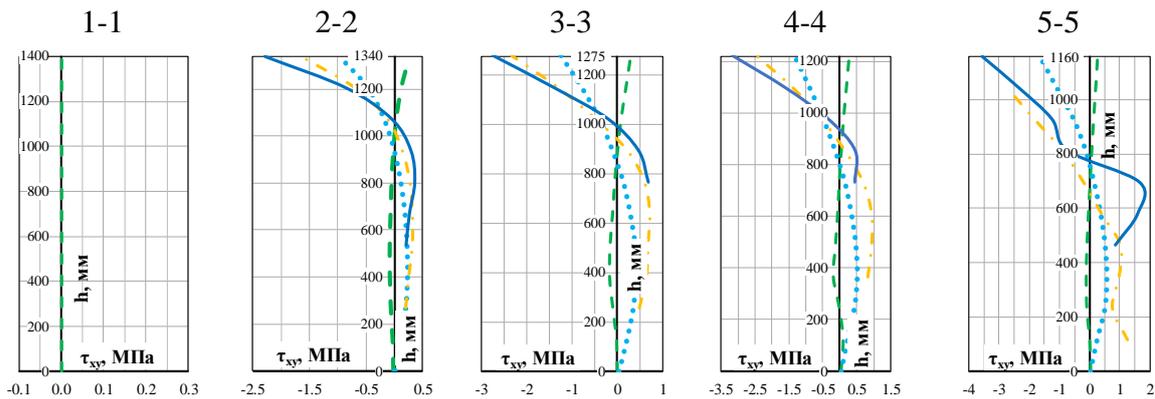
б)



в)



г)



- M=0 - стадия предварительного обжатия бетона
- M=609.80 кН·м - стадия перед образованием трещин
- · - M=901.44 кН·м - стадия отклонения нормальных трещин
- M=1060.52 кН·м - стадия после возникновения наклонных трещин

а) – схема расположения сечений; б) – эпюры нормальных горизонтальных напряжений; в) – эпюры нормальных вертикальных напряжений; г) – эпюры касательных напряжений
Рисунок 6 – Распределение напряжений в зоне перелома верхней грани балки

Максимальные главные растягивающие напряжения возникают в сечении, проходящем по коньку балки на расстоянии $(1/6 \cdot h_k)$ от верхней грани балки (где h_k – высота конькового сечения). По мере удаления от конька величина главных растягивающих напряжений снижается, а положение пикового значения эпюры смещается по направлению к нижней грани. После образования нормальных трещин происходит резкое уменьшение высоты сжатой зоны бетона и, как следствие, увеличение главных сжимающих напряжений, направленных вдоль верхней наклонной грани. Данное обстоятельство приводит к возрастанию вертикальных растягивающих напряжений.

В средней части балки (между центральными пролетными грузами) от действия изгибающего момента формируется криволинейная эпюра касательных напряжений, что характерно для элементов с переменной высотой сечения. По мере перемещения по направлению к коньку балки касательные напряжения постепенно снижаются и полностью исчезают в сечении, проходящем через конек балки. После образования нормальных трещин высота бетонного сечения способного воспринимать касательные напряжения, уменьшается, из-за чего напряжения перераспределяются по высоте «нетреснувшей» части сечения. При этом очертание эпюры сохраняется, но значения сдвигающих напряжений τ_{xy} увеличиваются обратно пропорционально уменьшению высоты части сечения над вершиной трещины.

Установлено, что распределение нормальных напряжений, перпендикулярных к продольной оси и касательных напряжений по длине коньковой зоны имеет явно нелинейный характер (рисунок 6), при этом длина зоны, на которой локальные поля напряжений оказывают влияние на напряженно-деформированное состояние коньковой зоны, зависит от высоты сечения балки и составляет примерно $2/3$ высоты сечения в коньке ($l_k = 2/3 \cdot h_k$).

Четвертая глава посвящена разработке методики определения главных напряжений в коньковой зоне двускатных балок и рекомендаций по расчету и конструированию данных зон.

В основу разработанных аналитических зависимостей положены выражения теории упругости для определения касательных напряжений в элементах с переменной высотой сечения, а также данные физического и численного эксперимента о величинах и характере распределения нормальных и касательных напряжений в коньковой зоне двускатных балок (рисунок 6).

Касательные напряжения и локальные нормальные напряжения, действующие по горизонтальным площадкам, в коньковой зоне двускатной балки предлагается определять по формулам:

$$\tau_M = \frac{M_x^k}{W_x^k} \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \left(\frac{1}{\left(1 - \frac{2}{3} \cdot \gamma \cdot \operatorname{tg}(\alpha)\right)^2} - (1 - \gamma)^2 \right) \cdot (3 \cdot \beta^2 - 2 \cdot \beta); \quad (1)$$

$$\sigma_{y.loc} = 1.2 \cdot \frac{V_{cc}}{h_k \cdot b} \cdot (1 - \gamma)^{1.5} \cdot \left(\frac{3 \cdot \beta}{2.5 - \sqrt{\gamma} \cdot (1 + \operatorname{tg}(\alpha))} \right), \quad (2a)$$

$$\text{при } \beta \leq \frac{1}{3} \cdot (2.5 - \sqrt{\gamma} \cdot (1 + \operatorname{tg}(\alpha)));$$

$$\sigma_{y.loc} = 1.2 \cdot \frac{V_{cc}}{h_k \cdot b} \cdot (1 - \gamma)^{1.5} \cdot \left(\frac{1 - \gamma \cdot \operatorname{tg}(\alpha) - \beta}{1 - \gamma \cdot \operatorname{tg}(\alpha) - \frac{1}{3} \cdot (2.5 - \sqrt{\gamma} \cdot (1 + \operatorname{tg}(\alpha)))} \right), \quad (2b)$$

$$\text{при } \beta > \frac{1}{3} \cdot (2.5 - \sqrt{\gamma} \cdot (1 + \operatorname{tg}(\alpha))),$$

где M_x^k – изгибающий момент, действующий в коньковом сечении, кН·м;

W_x^k – момент сопротивления конькового сечения, см³;

$\beta = \frac{y}{h_k}$ – относительное значение координаты рассматриваемой

точки по высоте сечения;

$\gamma = \frac{x}{l_k}$ – относительное значение координаты рассматриваемой

точки по длине коньковой зоны;

α – угол наклона верхней грани балки по отношению к нижней.

Сразу после образования нормальной трещины усилия от касательных напряжений в трещине воспринимаются продольной рабочей арматурой и силами зацепления заполнителя. После возникновения трещин распределение касательных напряжений может в нетреснувшей зоне быть описано по формуле (1), а в треснувшей постоянным и равным τ_{cr} :

$$\tau_{cr} = \frac{M_x^k}{W_x^k} \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \left(\frac{1}{\left(1 - \frac{2}{3} \cdot \gamma \cdot \operatorname{tg}(\alpha)\right)^2} - (1 - \gamma)^2 \right) \cdot \frac{x_b \cdot (x_b - h)}{h^2}. \quad (3)$$

После возникновения трещин эпюра нормальных напряжений, направленных вертикально, в нетреснувшей части сечения приобретает очертание параболы и может быть определено по выражению:

$$\sigma_{y.loc} = 0.6 \cdot \frac{V_{cc}}{d_k \cdot b} \cdot (1 - \gamma)^{1.5} \cdot \omega \cdot (2 \cdot \omega - 3)^2, \quad (4)$$

где x_b – высота нетреснувшей зоны бетона;

d_k – рабочая высота сечения двускатной балки в коньке;

ω – геометрический параметр, определяемый по выражению:

$$\omega = \frac{1 - \gamma \cdot \operatorname{tg}(\alpha) - \beta}{\xi} \quad (5)$$

где ξ – относительная высота сжатой зоны бетона в коньковом сечении.

На рисунках 7 и 8 представлены эпюры касательных напряжений и нормальных напряжений, действующих по горизонтальным площадкам, в сечениях 1–3 коньковой зоны двускатной железобетонной балки (рисунок 6), полученные на основании численного эксперимента и при помощи предложенных аналитических выражений, на этапах загрузки до и после образования нормальных трещин.

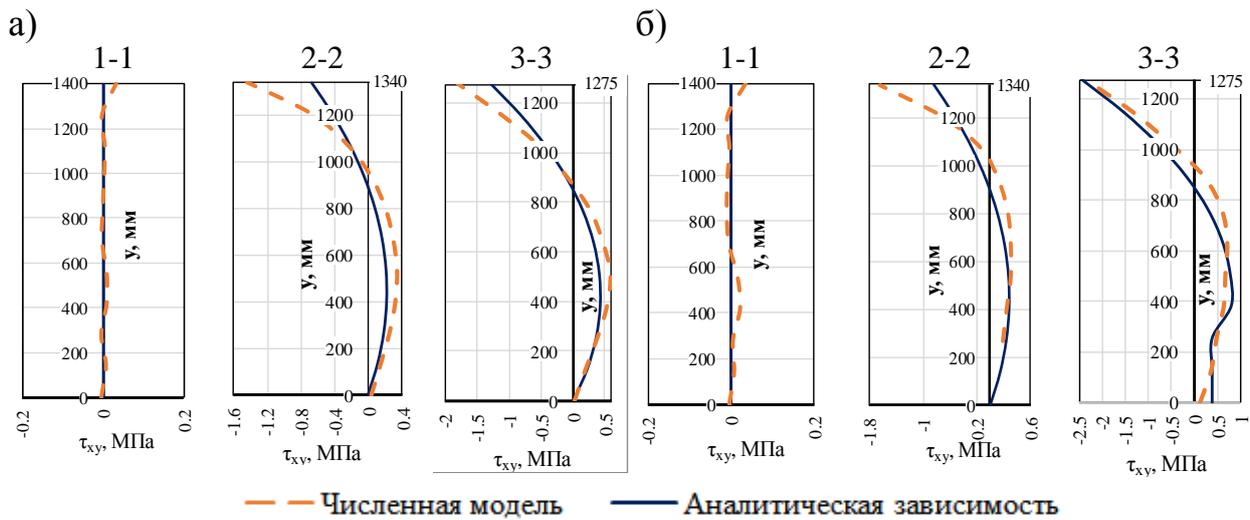


Рисунок 7 – Эпюры касательных напряжений в коньковой зоне балки до образования трещин (а) и после образования трещин (б)

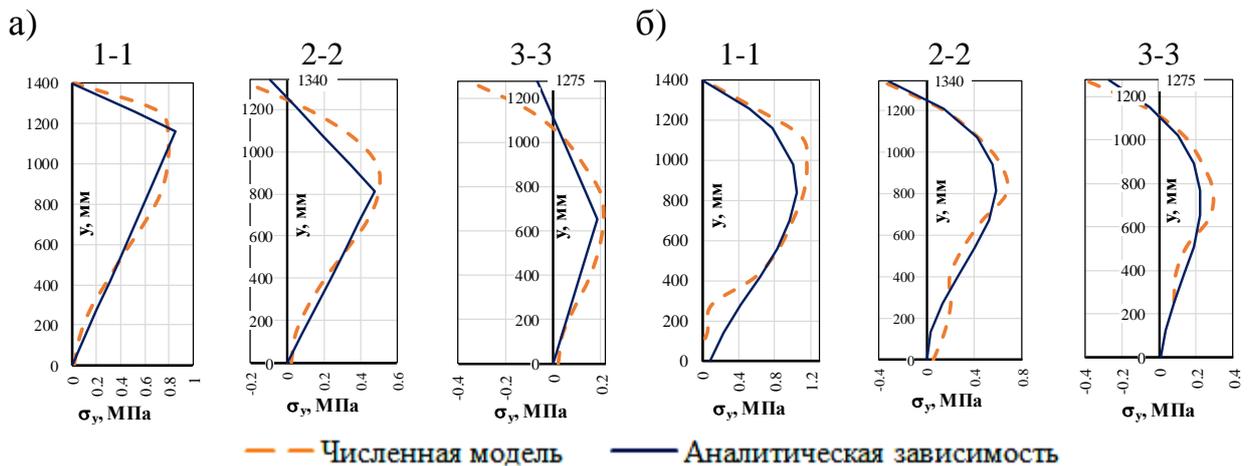


Рисунок 8 – Эпюры нормальных напряжений, направленных вертикально, в коньковой зоне балки до образования трещин (а) и после образования трещин (б)

В случае, если главные растягивающие напряжения, определенные с учетом предложенных выражений, не превышают среднего значения прочности бетона при растяжении f_{ctm} , то проверка ширины раскрытия трещин не требуется. При невыполнении данного условия ширина раскрытия трещин может быть определена по известным зависимостям, приведенным в действующих

технических нормативных правовых актах, с учетом величины напряжений в поперечной арматуре σ_{sw} , определяемая из условия:

$$\sigma_{sw} = \frac{3}{4} \cdot \frac{V_{cc}}{h_k} \cdot \frac{S}{A_{sw}}, \quad (6)$$

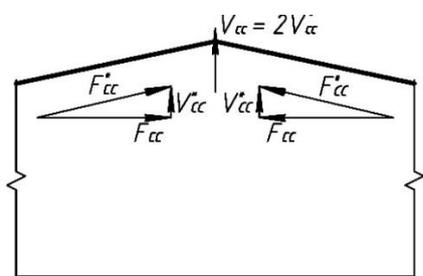


Рисунок 9 – Схема действия усилий и образования трещин в коньковых зонах балок и рам

где V_{cc} – вертикальная составляющая усилий в сжатой зоне бетона (рисунок 9);

A_{sw} – площадь сечения поперечной арматуры в сечении;

S – шаг стержней поперечной арматуры.

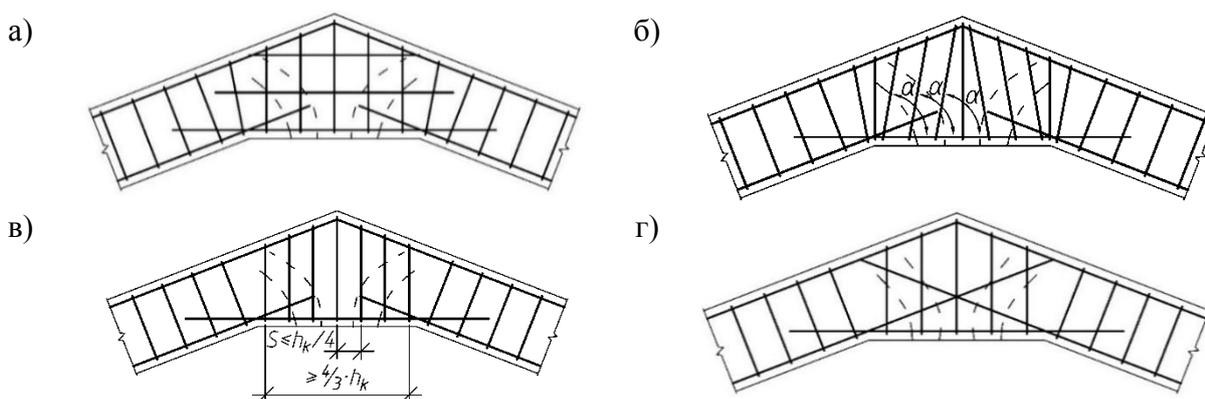
Наиболее эффективными могут быть следующие варианты размещения арматуры в коньковой зоне (рисунок 10):

– постановка в коньковой зоне дополнительной продольной (горизонтальной) арматуры в количестве не менее двух стержней по высоте сечения (рисунок 10а);

– установка поперечной арматуры под углом к продольной оси (рисунок 10б);

– шаг стержней вертикальной поперечной арматуры не должен превышать $1/4$ высоты сечения элемента в коньке (рисунок 10в);

– в зависимости от конструктивного решения элемента ломаного очертания производить анкеровку в сжатой зоне бетона части продольной арматуры наклонных частей (рисунок 10г) или доводить до конькового сечения.



а) горизонтальными стержнями; б) наклонными поперечными стержнями; в) вертикальными поперечными стержнями; г) анкеровка продольной арматуры наклонных частей

Рисунок 10 – Эффективные варианты армирования элементов ломаного очертания

Очевидно, что применение указанных вариантов армирования целесообразно в зоне действия локальных полей нормальных и касательных напряжений. По результатам выполненных экспериментально-теоретических исследований длина указанной зоны составляет $4/3 \cdot h_k$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Усовершенствованное конструктивное решение двускатной стропильной балки ломаного очертания, защищенное патентом на полезную модель [17] и отличающееся от известных устройством ломаного нижнего пояса и прямолинейной напрягаемой арматуры, позволяющее снизить расход бетона на 5.5 % и арматуры на 7.8 % по сравнению с существующими двускатными стропильными балками, при сохранении требуемого уровня надежности согласно действующим техническим нормативно-правовым актам [1; 3, с. 169; 11; 12; 14, с. 191].

2. Результаты экспериментально-теоретических исследований напряженно-деформированного состояния предварительно напряженных двускатных балок с ломаной нижней гранью при различных геометрических параметрах балок, степени предварительного обжатия бетона, коэффициенте поперечного армирования [2; 4, с. 96; 5, с. 47; 7; 10, с. 7; 13, с. 114; 15, с. 8], которые позволили разработать аналитическую модель для определения главных напряжений в коньковой зоне двускатных балок. Установлено, что постановка поперечной арматуры в коньковой зоне двускатных балок, а также предварительное обжатие бетона в балках с ломаной нижней гранью приводит к повышению трещиностойкости наклонных сечений в коньковой зоне, а также позволяет предотвратить разрушение по наклонной трещине в середине пролета [6, с. 93].

3. Научно обоснованная и экспериментально подтвержденная аналитическая модель, позволяющая определить величину главных напряжений в коньковой зоне двускатных балок, предназначенная для оценки соответствия строительных конструкций установленным требованиям трещиностойкости и отличающаяся от известных возможностью учитывать геометрические параметры балки и степень предварительного обжатия бетона [9, с. 78; 16, с. 119].

4. Научно обоснованные рекомендации по расчету и конструированию железобетонных двускатных балок, которые учитывают их конструктивные особенности и позволяют снизить расход поперечной арматуры в типовых двускатных железобетонных балках на 3.3 % при сохранении требуемого уровня надежности согласно действующим техническим нормативно-правовым актам [8, с. 32].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработанное конструктивное решение двускатной балки с ломаной нижней гранью и прямолинейной предварительно напряженной арматурой [17] может применяться при строительстве производственных и гражданских зданий. Данное решение отличается меньшей материалоемкостью и трудоемкостью изготовления в сравнении с существующими железобетонными стропильными балками, а также положительно сказывается на объемно-планировочных решениях и эксплуатационных качествах зданий: вследствие излома нижней грани балок выпуклостью вверх увеличивается полезная площадь поперечного сечения пролета здания, создаются благоприятные эстетико-психологические впечатления вследствие кажущейся «вспарушенности» покрытия, а также благодаря увеличению уклона верхней грани эффективнее решается водоотвод с кровли.

2. Разработанные рекомендации использованы при расчете и конструировании железобетонных рам пролетом 15, 18, 21 м для однопролетных сельскохозяйственных производственных зданий в рамках выполнения работ по договору ХД № 23/108, связанных с актуализацией (переработкой) рабочих чертежей типовых строительных конструкций для ОАО «Кобринский ССК» (акт о внедрении научно-исследовательской работы от 25.03.2024 № 1).

3. Результаты диссертации внедрены в учебный процесс кафедры строительных конструкций учреждения образования «Брестский государственный технический университет» при обучении студентов специальности 1-70 02 01 Промышленное и гражданское строительство по дисциплине «Железобетонные конструкции» (акты об использовании результатов научно-исследовательской работы в учебном процессе от 03.04.2024 № 44 и № 45).

4. Дальнейшие научные исследования по данной теме могут быть направлены на исследование напряженно-деформированного состояния объемных элементов ломаного очертания (панелей оболочек и сводов, стенок резервуаров и силосов), а также разработку рекомендаций по их проектированию.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых изданиях, включенных в Перечни ВАК Республики Беларусь и Российской Федерации

1. Малиновский, В. Н. Усовершенствованный вариант конструктивного решения железобетонных стропильных балок / В. Н. Малиновский, П. В. Кривицкий, Н. В. Матвеевко // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – № 1 (79). – С. 128–131.

2. Матвеевко, Н. В. Об использовании программного комплекса MSC.Nastran для анализа напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов / Н. В. Матвеевко, Н. Н. Шалобыта, В. Н. Малиновский // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2014. – № 1 (85). – С. 80–83.

3. Малиновский, В. Н. Эффективность железобетонных конструкций при смешанном армировании / В. Н. Малиновский, Н. В. Матвеевко // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / РУП «Институт БелНИИС» ; редкол. О. Н. Лешкевич (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – Вып. 8. – С. 155–171.

4. Кривицкий, П. В. Численная модель предварительно напряженных железобетонных балок с полого отогнутой арматурой при различных пролетах среза / П. В. Кривицкий, Н. В. Матвеевко // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2018. – № 1 (109). – С. 92–97.

5. Малиновский, В. Н. Особенности напряженно-деформированного состояния балок с изменяющейся высотой сечения / В. Н. Малиновский, Н. В. Матвеевко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2018. – № 16. – С. 43–48.

6. Кривицкий, П. В. Экспериментальные исследования сопротивления изгибу с поперечной силой преднапряженных железобетонных балок прямолинейного и ломаного очертания / П. В. Кривицкий, Н. В. Матвеевко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2021. – № 8. – С. 87–93.

7. Матвеевко, Н. В. Учет конструктивных особенностей элементов ломаного очертания при определении сопротивления срезу / Н. В. Матвеевко, П. В. Кривицкий, В. Н. Малиновский // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2023. – № 1 (130). – С. 37–39.

8. Матвеевко, Н. В. Эффективный вариант армирования железобетонных элементов ломаного очертания / Н. В. Матвеевко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2023. – № 8 (35). – С. 28–33.

9. Матвеевко, Н. В. Трещиностойкость наклонных сечений железобетонных элементов ломаного очертания / Н. В. Матвеевко, В. Н. Малиновский, Е. С. Матвеевко // Строительство и реконструкция. – 2023. – № 4 (108). – С. 65–80.

Статья в другом научном издании

10. Матвеевко, Н. В. К исследованию напряженно-деформированного состояния коньковой зоны балок криволинейного очертания / Н. В. Матвеевко, В. Н. Малиновский // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2018. – Т. 4, № 5. – С. 1–8.

Материалы конференций и семинаров

11. Малиновский, В. Н. Усовершенствованный каркас одноэтажного производственного здания / В. Н. Малиновский, Н. В. Матвеевко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф., г. Могилев, 24–25 апр. 2014 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2014. – С. 287–288.

12. Малиновский, В. Н. Эффективное решение двускатных стропильных балок / В. Н. Малиновский, Н. В. Матвеевко // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров : сб. науч. ст. XIX Междунар. науч.-метод. семинара, г. Брест, 23–25 окт. 2014 г. : в 3 ч. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: С. М. Семенюк [и др.]. – Брест, 2014. – Ч. 1. – С. 133–137.

13. Малиновский, В. Н. Особенности напряженно-деформированного состояния железобетонных балок ломаного очертания / В. Н. Малиновский, Н. В. Матвеевко // Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР) : сб. ст. I Междунар. науч.-техн. конф., г. Брест, 30–31 марта 2017 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: С. М. Семенюк [и др.]. – Брест, 2017. – С. 108–114.

14. Малиновский, В. Н. Опыт применения предварительно напряженных железобетонных балок ломаного очертания / В. Н. Малиновский, Н. В. Матвеевко // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров : сб. науч. ст. XXI Междунар. науч.-метод. семинара, г. Брест, 25–26 окт. 2018 г. : в 2 ч. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: В. В. Тур [и др.]. – Брест, 2018. – Ч. 1. – С. 186–191.

15. Krivitskiy, P. Shear resistance of prestressed concrete beams with the constant and variable height / P. Krivitskiy, N. Matweenko, V. Malinovskiy, E. Matweenko // MATEC Web of Conf. – 2021. – Vol. 350 : Research, Design & Cad in Construction: Theory and Practice (RDCAD 2021), Brest, Republic of Belarus, 29 Oct. 2021. – URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/202135000006> (date of access: 02.12.2021).

16. Матвеевко, Н. В. Особенности расчета и конструирования железобетонных элементов с переменной высотой сечения / Н. В. Матвеевко, В. Н. Малиновский, Е. С. Матвеевко // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров : сб. науч. ст. XXII Междунар. науч.-метод. семинара, г. Брест, 29–30 сент. 2022 г. / Брест. техн. гос. ун-т ; редкол.: С. М. Семенюк [и др.]. – Брест, 2022. – С. 114–121.

Патент на полезную модель

17. Полезная модель ВУ 10178 У, МПК Е 04В 1/06 (2006.01). Решетчатая стропильная балка : № и 20130914 : заявлено 11.11.2013 : опубл. 30.06.2014 / Малиновский В. Н., Матвеевко Н. В., Кривицкий П. В. ; заявитель Брест. гос. техн. ун-т. – 3 с.



РЭЗЬЮМЭ

МАЦВЕЕНКА НІЧЫПАР ВІКТАРАВІЧ

СУПРАЦІЎЛЕННЕ ВЫГІБУ ВІЛЬЧЫКАВЫХ ЗОН ПАПЯРЭДНЯ НАПРУЖАНЫХ ДВУХСХІЛЬНЫХ БЭЛЕК

Ключавыя словы: двухсхільная бэлька, папярэдняе напружанне, папярочная арматура, трэшчынастойкасць, датычныя напружання, лікавая мадэль.

Мэта працы: распрацоўка навукова абгрунтаванай методыкі вызначэння трэшчынастойкасці вільчыкавых зон папярэдня напружаных двухсхільных бэлек з ламанай ніжняй гранню з улікам асаблівасцяў іх напружана-дэфармаванага стану.

Аб'ект даследавання: папярэдня напружаныя двухсхільныя бэлькі з ламанай ніжняй гранню.

Прадмет даследавання: напружана-дэфармаваны стан і трэшчынастойкасць каньковых зон папярэдня напружаных двухсхільных бэлек з ламанай ніжняй гранню.

Метады даследавання: эксперыментальна-тэарэтычныя.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Распрацавана і навукова абгрунтавана ўдасканаленае канструктыўнае рашэнне двухсхільных папярэдне напружаных бэлек, якое адрозніваецца ад вядомых стварэннем ламамага ніжняга пояса і прымяненнем прамалінейнай напружанай арматуры. На аснове вынікаў фізічнага і лікавага эксперымента распрацаваны аналітычныя залежнасці для вызначэння галоўных напружанняў у вільчыкавай зоне двухсхільных бэлек, якія могуць быць выкарыстаны для ацэнкі адпаведнасці будаўнічых канструкцый устаноўленым патрабаванням трэшчынастойкасці. З улікам дадзеных аб напружана-дэфармаваным стане распрацаваны рэкамендацыі па праектаванні вільчыкавых зон двухсхільных жалезабетонных бэлек, якія ўлічваюць іх канструктыўныя асаблівасці і ступень папярэдняга абціскання бетону.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Распрацаванае канструктыўнае рашэнне двухсхільнай бэлькі можа выкарыстоўвацца пры будаўніцтве вытворчых і грамадзянскіх будынкаў. Рэкамендацыі па разліку і канструяванні могуць быць выкарыстаны пры праектаванні двухсхільных жалезабетонных бэлек у тым ліку папярэдне напружаных.

Галіна прымянення: праектаванні двухсхільных жалезабетонных бэлек, навукова-даследчая дзейнасць, навучальны працэс.

РЕЗЮМЕ

МАТВЕЕНКО НИКИФОР ВИКТОРОВИЧ

СОПРОТИВЛЕНИЕ ИЗГИБУ КОНЬКОВЫХ ЗОН ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ДВУСКАТНЫХ БАЛОК

Ключевые слова: двускатная балка, предварительное напряжение, поперечная арматура, трещиностойкость, касательные напряжения, численная модель.

Цель работы: разработка научно обоснованной методики определения трещиностойкости коньковых зон предварительно напряженных двускатных балок с ломаной нижней гранью с учетом особенностей их напряженно-деформированного состояния.

Объект исследования: предварительно напряженные двускатные балки с ломаной нижней гранью.

Предмет исследования: напряженно-деформированное состояние и трещиностойкость коньковых зон предварительно напряженных двускатных балок с ломаной нижней гранью.

Методы исследования: экспериментально-теоретические.

Полученные результаты и их новизна. Разработано и научно обосновано усовершенствованное конструктивное решение двускатных предварительно напряженных балок, отличающееся от известных созданием ломаного нижнего пояса и применением прямолинейной напрягаемой арматуры. На основании результатов физического и численного эксперимента разработаны аналитические зависимости для определения главных напряжений в коньковой зоне двускатных балок, которые могут быть использованы для оценки соответствия строительных конструкций установленным требованиям трещиностойкости. С учетом данных о напряженно-деформированном состоянии разработаны рекомендации по проектированию коньковых зон двускатных железобетонных балок, которые учитывают их конструктивные особенности и степень предварительного обжатия бетона.

Рекомендации по использованию. Разработанное конструктивное решение двускатной балки может применяться при строительстве производственных и гражданских зданий. Рекомендации по расчету и конструированию могут быть использованы при проектировании двускатных железобетонных балок, в том числе предварительно напряженных.

Область применения: проектирование двускатных железобетонных балок, научно-исследовательская деятельность, учебный процесс.

SUMMARY

NICHYPAR MATSVEYENKA

RIDGE ZONES BENDING RESISTANCE OF PRESTRESSED GABLE BEAMS

Keywords: gable beam, pre-stressing, transverse reinforcement, crack resistance, shear stresses, numerical model.

The purpose of work: development of a scientifically based method for determining the crack resistance of ridge zones of prestressed gable beam. with a broken lower edge, taking into account the features of their stress-strain state

The object of research: pre-stressed gable beams with a broken lower edge.

The subject of research: stress-strain state and crack resistance of ridge zones of prestressed gable beam. with a broken lower edge.

The method of research: experimental and theoretical.

The results obtained and their novelty. An improved design solution for gable pre-stressed beams which differs from the known ones by creating a broken lower edge and using straight-line prestressed reinforcement has been developed and scientifically substantiated. Based on the results of physical and numerical experiment, analytical dependences to determine principal stresses in the ridge zone of gable beams, which can be used to estimate the compliance of building structures with established crack resistance requirements have been developed. Taking into account the data on the stress-strain state, recommendations have been developed for the design of ridge zones of reinforced concrete gable beams, which consideration their design features and the degree of concrete pre-reduction.

Recommendations for use. The developed structural solution of the gable beam can be used in the construction of industrial and civil buildings. Recommendations of calculation can be used while designing gable reinforced concrete beams, including pre-stressed ones.

Sphere of application: design of reinforced concrete gable beams, research activities, educational process.

Научное издание

МАТВЕЕНКО
Никифор Викторович

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И
ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ КОНЬКОВЫХ ЗОН ПРЕДВАРИТЕЛЬНО
НАПРЯЖЕННЫХ ДВУСКАТНЫХ БАЛОК
С ЛОМАННОЙ НИЖНЕЙ ГРАНЬЮ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности
05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения

Подписано к печати 05.05.2025. Формат 60×84 1/16. Бумага «Снегурочка»
Гарнитура «Times New Roman».
Усл. печ. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 60. Заказ № 416.

Печать цифровая. Изготовлено и отпечатано в типографии учреждения
образования «Брестский государственный технический университет»
224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1569 от 16.10.2017 г.