

На правах рукописи



Чесноков Денис Александрович

**ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ УГОЛКОВЫХ
АНКЕРНЫХ УПОРОВ В МОНОЛИТНЫХ
СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЕРЕКРЫТИЯХ**

2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Московский Государственный строительный университет».

Научный руководитель: **Тонких Геннадий Павлович**, доктор
технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Галаяутдинов Заур Рашидович**, доктор
технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Железобетонные и каменные
конструкции» ФГБОУ ВО «Томский
государственный архитектурно-
строительный университет»

Замалиев Фарит Сахапович, кандидат
технических наук, доцент, доцент кафедры
«Металлические конструкции и испытания
сооружений» ФГБОУ ВО «Казанский
государственный архитектурно-
строительный университет»

Ведущая организация: АО «Центральный научно-
исследовательский и проектно-
экспериментальный институт
промышленных зданий и сооружений -
ЦНИИПромзданий», г. Москва

Защита состоится 3 апреля 2024 г. в 12 часов 00 минут (по местному
времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.09 в ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет», по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское
шоссе, д. 26, 9 студия «Открытая сеть».

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической
библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет» и на сайте www.mgsu.ru.

Автореферат разослан « _____ » 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сафина Галина Леонидовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы обусловлена возрастающей популярностью сталежелезобетонных конструкций в гражданском и промышленном строительстве. Применение анкерных упоров позволяет повысить несущую способность монолитных железобетонных перекрытий, опертых на стальную балочную клетку и оптимизировать ее металлоемкость. Зачастую подобные перекрытия устраиваются по профилированному настилу, выполняющему роль несъемной опалубки, а в некоторых случаях еще и внешнего армирования железобетонной плиты. Для включения монолитной железобетонной плиты в совместную работу со стальным каркасом применяют анкерные упоры различных конфигураций, которые воспринимают сдвигающую нагрузку между элементами сталежелезобетонной конструкции при изгибе. Для промышленного и гражданского строительства в ряде случаев более целесообразным представляется применение уголковых анкерных упоров, закрепляемых на опорных металлических конструкциях с помощью дюбелей, поскольку позволяет снизить трудоемкость монтажа перекрытий за счет исключения сварочных работ. Однако, вопросы влияния таких конструктивных параметров сталежелезобетонного перекрытия как прочность бетона плиты и тип опалубки на прочностные и деформативные характеристики уголковых анкерных упоров изучен недостаточно полно.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями работы монолитных сталежелезобетонных перекрытий занимались Айрумян Э.Л., Алмазов В.О., Бактыгулов К., Жулидов В.Л., Замалиев Ф.С., Карповский М.Г., Конин Д.В., Крылов С.Б., Марков Б.П., Попов Г.Д., Санников И.В., Стрелецкий Н.Н., Тамразян А.Г., Травуш В.И., Трекин Н.Н., Хаютин Е.И., Шорохов Г.Г., Грант Дж. А., Джонсон М. Р., Лунгерсхаузен Г., Митчелл Д., Рэмбо-Родденберри Д., Слаттер Р., Хигс С., Хоукинс Н., Юань Х..

Большинство исследований, посвященных изучению сталежелезобетонных балочных перекрытий с монолитными плитами, устроенными по несъемной опалубке из профилированного настила, в качестве конструкции объединения рассматривают анкерные упоры в виде приварных стад-болтов. Сталежелезобетонные перекрытия с анкерными упорами других типов (в частности, упоров, закрепляемых с помощью дюбелей) в нашей стране практически не исследовались. По этой причине методика расчета сталежелезобетонных перекрытий,

применяемая в России, не учитывает особенностей работы таких анкерных упоров в составе комбинированной конструкции. Среди зарубежных исследований, посвящённых изучению прочностных и деформативных свойств упоров, закрепляемых с помощью дюбелей, стоит отметить работы Кризинела М., Пелешки К., Кульманна У., Глухович Н., Эггерта Ф..

Целью диссертационной работы является оценка напряженно-деформируемого состояния (НДС) уголковых анкерных упоров с последующим совершенствованием методики их расчета и проектирования в составе сталежелезобетонных балочных перекрытий.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

– выполнен анализ отечественных и зарубежных исследований сталежелезобетонных перекрытий с конструкцией объединения на анкерных упорах различных конфигураций;

– подготовлено теоретическое обоснование для учета податливости упоров при расчете конструкции объединения и влияния геометрических характеристик стального профилированного настила на их прочность и деформативность;

– разработана программа экспериментальных исследований работы уголковых анкерных упоров, включающая в себя выбор методики испытаний и разработку методики оценки результатов испытаний;

– проведены исследования НДС уголковых анкерных упоров, включающие в себя испытания уголковых анкерных упоров в составе фрагментов сталежелезобетонных перекрытий, устроенных по съёмной и несъёмной опалубке из профилированных настилов и численное моделирование работы упора;

– выполнено численное моделирование работы сталежелезобетонного перекрытия, объединённого гибкими уголковыми упорами;

– разработаны предложения по совершенствованию методики расчета и проектирования сталежелезобетонных перекрытий с учетом податливости уголковых анкерных упоров;

– разработана программа для ЭВМ, позволяющая выполнять предварительные расчеты конструкции объединения по предложенной методике.

Объектом исследования являются монолитные сталежелезобетонные балочные перекрытия, устраиваемые по съёмной и

несъемной опалубке из профилированного настила с конструкцией объединения на уголковых анкерных упорах, закрепляемых дюбель-гвоздями.

Предметом исследования является напряженно-деформированное состояние конструкции сдвигового соединения сталежелезобетонного перекрытия на уголковых анкерных упорах.

Научную новизну работы составляют:

– экспериментальные данные по несущей способности и коэффициентам жесткости для конструкции объединения монолитных сталежелезобетонных перекрытий в виде уголковых анкерных упоров, устроенных по съемной и несъемной опалубке в виде стального профилированного настила;

– методика моделирования конструкции объединения на уголковых анкерных упорах, закрепляемых с помощью дюбелей методом конечных элементов;

– анализ напряженно-деформированного состояния уголковых анкерных упоров в балочных перекрытиях, устроенных по съемной и несъемной опалубке из профилированного настила различной конфигурации;

– зависимость несущей способности и деформативности уголковых анкерных упоров от геометрических характеристик профилированного настила и конструктивных особенностей размещения упоров внутри гофр настила, выраженная через коэффициент редукции k_i ;

– методика расчета сталежелезобетонного перекрытия с объединением уголковыми анкерными упорами, закрепляемыми с помощью дюбель-гвоздей, учитывающая податливость упоров и влияние геометрических характеристик профилированного настила на сдвиговое сопротивление упоров.

Теоретическая значимость работы:

– исследование напряженно-деформированного состояния конструкции объединения монолитных сталежелезобетонных перекрытий, устроенных по съемной и несъемной опалубке;

– проведение численного исследования напряженно-деформируемого состояния уголкового анкерного упора в монолитном сталежелезобетонном перекрытии на основании результатов выполненных экспериментов;

– разработка методики расчета сталежелезобетонных балочных перекрытий на гибких анкерных упорах с учетом их податливости и влияния геометрии профилированного настила (в случае его применения в качестве несъемной опалубки) на их несущую способность.

Практическая значимость работы:

– определяется возможностью использования разработанной программы для ЭВМ по расчету монолитных сталежелезобетонных перекрытий, объединенных уголковыми анкерными упорами по предложенной методике;

– определяется разработанными практическими рекомендациями по проектированию сталежелезобетонных перекрытий с монолитными плитами, устроенными по несъемной опалубке из профилированного настила, с применением уголковых анкерных упоров, закрепляемых дюбель-гвоздями в качестве конструкции объединения;

Методологической основой диссертационного исследования послужили труды отечественных и зарубежных ученых, изучавших работу анкерных упоров в составе сталежелезобетонных перекрытий различной конфигурации и общепринятые методы расчета сталежелезобетонных конструкций с учетом нелинейных свойств материалов.

Положения, выносимые на защиту:

– результаты экспериментальных исследований узлов объединения монолитных сталежелезобетонных перекрытий с плитами, устроенными по съемной и несъемной опалубке в виде стального профилированного настила;

– результаты численного моделирования напряженно-деформируемого состояния уголкового анкерного упора, закрепляемого дюбель-гвоздями, в составе фрагмента сталежелезобетонного перекрытия со съемной опалубкой;

– методика расчета сталежелезобетонного балочного перекрытия с частичным объединением, устроенного по съемной или несъемной опалубке из профилированного настила, с применением уголковых анкерных упоров, закрепляемых с помощью дюбель-гвоздей на статическую нагрузку.

Степень достоверности и апробация результатов исследования подтверждается применением стандартных методов испытаний по исследованию прочностных и деформативных свойств элементов

сталежелезобетонного перекрытия, использованием поверенного и аттестованного испытательного оборудования. Достоверность предложенной методики расчета подтверждается достаточной для практического использования сходимостью полученных результатов с экспериментальными данными. Выводы и результаты работы получили положительную оценку и были внедрены в строительную практику.

Полученные результаты с достаточной полнотой отражены в публикациях, выполненных по теме диссертационного исследования и в докладах на научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов института строительства и архитектуры НИУ МГСУ (Москва, 2020), международной научной конференции International Conference on Recent Innovations (Ироду, Индия, 2020), XIV Российской национальной конференции по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (Сочи, 2021), международной научной конференции II Scientific Conference "Modelling and methods of structural analysis" (Москва, 2021), международной научной конференции International Scientific conference on Advance in Civil Engineering «Construction the formation of living environment» FORM-2023 (Ташкент, 2023).

Личный вклад автора в научные результаты, полученные в данной работе, заключается в выборе объекта и методики исследования, разработке программы проведения экспериментальных испытаний, получении и обработке результатов исследований, их обобщении и анализе, проведении численного моделирования эксперимента, разработке методики расчета монолитных сталежелезобетонных перекрытий с применением уголковых анкерных упоров, закрепляемых с помощью дюбель-гвоздей.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментальных исследований узлов объединения монолитных сталежелезобетонных перекрытий с плитами, устроенными по съемной и несъемной опалубке в виде стального профилированного настила;

2. Результаты численного моделирования напряженно-деформируемого состояния уголкового анкерного упора, закрепляемого дюбель-гвоздями, в составе фрагмента сталежелезобетонного перекрытия;

3. Методика расчета сталежелезобетонного перекрытия с монолитными плитами, устроенными по съемной или несъемной

опалубке из профилированного настила, с применением уголковых анкерных упоров, закрепляемых с помощью дюбель-гвоздей на статическую нагрузку.

Публикации. Материалы диссертации достаточно полно изложены в 8 научных публикациях, из которых 5 работ опубликованы в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и 2 работы опубликованы в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus. По результатам работы получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ по расчету сдвигающих усилий в шве объединения сталежелезобетонной балки «СТЖБ-1» (Авторское свидетельство №2022669022 от 14.10.2022).

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Общий объем работы 246 страниц, в том числе, 212 страниц основного текста, включающего 151 рисунок и 39 таблиц. Количество источников использованной литературы – 147, в том числе 56 зарубежных источников.

Содержание диссертации соответствует п.п. 1, 3 Паспорта научной специальности 2.1.1 – Строительные конструкции, здания, сооружения:

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований и показана степень её разработанности, сформулированы цели и задачи, отмечена научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы.

В первой главе выполнен анализ нормативно-технической литературы и обзор работ отечественных и зарубежных авторов по исследованиям работы анкерных упоров в сталежелезобетонных балочных перекрытиях. Значительный вклад был внесен отечественными учеными – Н.Н. Стрелецким, Ф.Е. Клименко, М.Г. Карповским и К. Бактыгуловым. Среди зарубежных исследователей следует выделить

работы, Р. Слаттера, У. Фишера, Дж. А. Гранта., М. Кризинела, Дж. Бадоукса и К. Пелешки.

Рассмотрено развитие отечественной и нормативной базы по расчету сталежелезобетонных перекрытий в целом и конструкции их объединения в частности. Выполнен обзор основных экспериментальных и теоретических исследований работы анкерных упоров. Отмечены достоинства и недостатки существующих расчетных методик конструкции объединения сталежелезобетонных перекрытий. Установлено, что бо́льшая часть научных работ по исследованию комбинированных балочных перекрытий рассматривает приварные упоры круглого сечения в качестве объединительных элементов. Угловые анкерные упоры, закрепляемые с помощью дюбелей, изучены в меньшей степени; их применение в перекрытиях, устроенных по профилированным настилам, выпускаемым по отечественным стандартам, ранее не рассматривалось.

В процессе анализа существующих стандартов по проектированию и сопоставления результатов отдельных расчетов анкерных упоров с экспериментальными данными был выделен ряд аспектов, требующих совершенствования и доработки. Было выявлено, что методика расчета балочных перекрытий, принятая в действующем СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования», не учитывает деформативных свойств анкерных упоров и возможное влияние огня на сдвиговую прочность упоров. Так же было отмечено, что методика учета влияния геометрии профилированного настила, применяемого в качестве несъемной опалубки в некоторых перекрытиях, для угловых упоров не является оптимальной.

Во второй главе рассмотрены вопросы расчёта сталежелезобетонных балочных перекрытий в целом и конструкции их объединения в частности. Даны теоретические обоснования для учета податливости анкерных упоров при расчете конструкции с учетом пластических свойств материалов железобетона и прокатной стали. Сформулированы предложения по совершенствованию методики расчета сталежелезобетонных балочных перекрытий по СП 266.1325800, которые позволяют повысить расчетную несущую способность перекрытия за счет использования пластических свойств угловых анкерных упоров. Алгоритм расчёта представлен на рисунке 1. Основу методики составляют положения СП 266.1325800.2016. При этом существующие этапы расчета, имеющие авторские корректировки, взяты в синюю рамку;

отсутствующие в СП 266.1325800.2016 этапы – помещены в красную рамку.

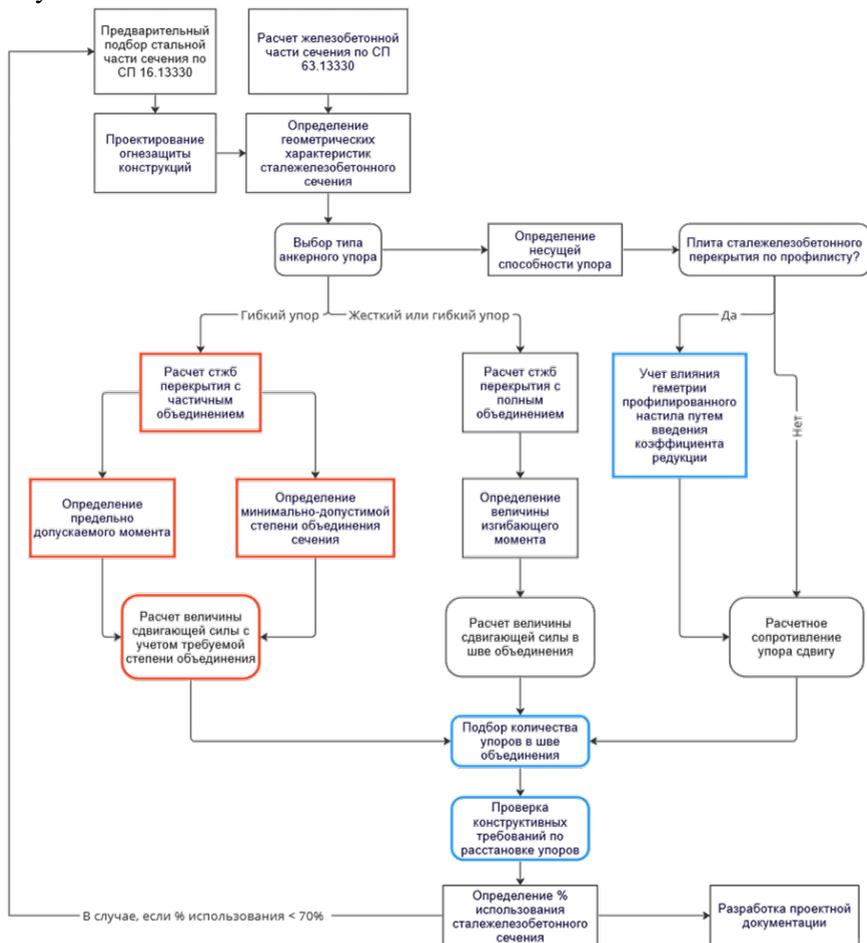


Рисунок 1 – Алгоритм расчета по предлагаемой методике.

Согласно предлагаемой методике, перед расчетом конструкции объединения проектировщик определяет основные геометрические характеристики сталежелезобетонного балочного перекрытия путем расчета стальной и железобетонной частей конструкции. После этого необходимо определить тип упоров: в случае выбора гибких упоров (например, уголковых упоров, закрепляемых с помощью дюбелей),

рекомендуется использовать метод расчета комбинированного перекрытия с частичным объединением. Данный метод учитывает податливый характер упоров под нагрузкой и позволяет запроектировать более экономичную конструкцию по сравнению со стандартным методом расчета с полным объединением. После того, как определено требуемое количество анкерных упоров, необходимо выполнить проверку сечения по предельным состояниям для определения % использования сталежелезобетонного сечения. В случае, если за счет объединения стальной и железобетонной частей удалось получить запас прочности более 30%, рекомендуется уменьшить сечение стальной балки и произвести перерасчет сталежелезобетонного перекрытия.

В третьей главе разработана программа исследования, приведены результаты экспериментального исследования работы уголкового анкерного упора.

Разработка программы исследования включает в себя выбор методики и схемы испытаний, составление программы испытаний образцов-фрагментов сталежелезобетонной балки (рисунок 2) с плитами, устроенными по различным типам опалубки. Кроме этого, разработана методика оценки результатов испытаний образцы-фрагментов сталежелезобетонной балки на сдвиг.

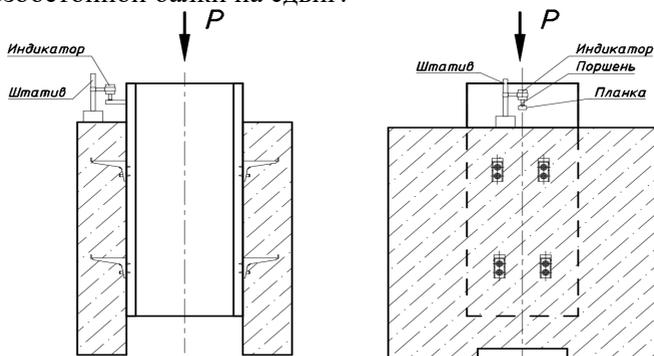


Рисунок 2 – Схема сдвиговых испытаний уголкового анкерного упора

Программа испытаний включала 11 серий по 3 образца в каждой серии, из них 5 серий с плитами со съемной опалубкой (рисунок 3 а) и 6 серий с плитами, устроенные по несъемной опалубке из профилированных листов марок НС44, Н60 и Н75 (рисуноки 3 б-г) по ГОСТ 24045-2016 (таблица 1). Для получения дополнительных исходных данных для анализа были проведены испытания бетонных кубов,

изготовленных при бетонировании образцов. Для получения дополнительных исходных данных для анализа прочностных и деформационных характеристик уголковых упоров, были проведены испытания дюбельных соединений на растяжение и сдвиг и испытания бетонных кубов, изготовленных при бетонировании образцов.

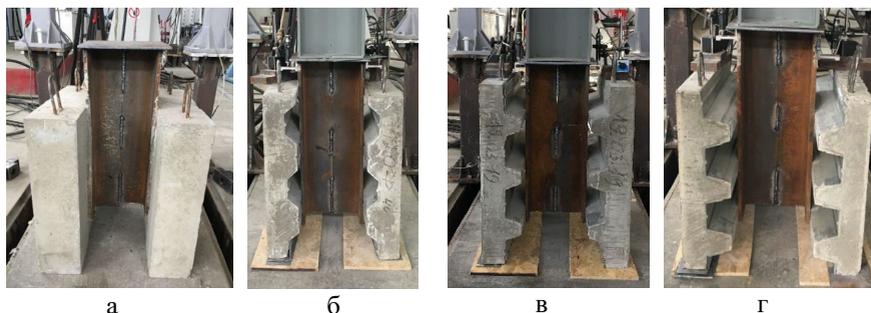


Рисунок 3 – Общий вид образцов перед испытаниями: а – образец серии X-150P; б – образец серии X-120T-N44; в – образец серии X-150T-N60; г – образец серии X-150T-N75

Таблица 1. Программа испытаний уголковых упоров

№	Серия	Ориентация упоров относительно балки	Марка профлиста	Кол-во образцов
1	X-120P	Параллельно	-	3
2	X-150P	Параллельно	-	3
3	X-160P	Параллельно	-	3
4	X-120T	Перпендикулярно	-	3
5	X-150T	Перпендикулярно	-	3
6	X-120T-N44	Перпендикулярно	HC44	3
7	X-150T-N44	Перпендикулярно	HC44	3
8	X-120P-N44	Параллельно	HC44	3
9	X-150T-N75	Перпендикулярно	H75	3
10	X-150P-N60	Параллельно	H60	3
11	X-150T-N60	Перпендикулярно	H60	3
Итого				33

Для изготовления образцов применялись наиболее востребованные с точки зрения отечественной практики применения профилированные настилы. Анкерные упоры были подобраны исходя из конструктивных требований производителя для выбранных марок настила. Параметры образцов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры образцов

№	Серия	Кол-во упоров в образце, шт	Толщина жб плит, мм	Высота упоров $h_{уп}$, мм	Ширина гофры проф.наст ила b_0 , мм	Высота гофры проф.настила h , мм	Факт. класс бетона Вф
1	X-120P	8	110	95	-	-	35
2	X-150P	8	150	125	-	-	30
3	X-160P	8	160	140	-	-	30
4	X-120T	8	110	95	-	-	30
5	X-150T	8	150	125	-	-	30
6	X-120T-N44	12	150	125	118	44	35
7	X-150T-N44	12	110	95	118	44	30
8	X-120P-N44	6	150	125	118	44	30
9	X-150T-N75	12	110	95	82	75	30
10	X-150P-N60	12	150	125	141	60	30
11	X-150T-N60	6	150	125	71	60	30

В процессе сдвиговых испытаний образцов без профилированного настила были получены следующие механизмы разрушений: срез дюбелей (рисунок 3 а); вырыв дюбелей (рисунок 3 б); разрыв упора (рисунок 3 в). Строгой корреляции между исследуемыми параметрами образца и механизмами разрушения не установлено, однако отмечено, что срез анкерного упора более характерен для упоров высотой более 125 мм вне зависимости от их ориентации относительно вектора сдвигающей силы; вырыв дюбелей и разрыв упоров, которые были зафиксированы на образцах с высотой упора 95 мм, является признаком воздействия на упоры значительной растягивающей силы помимо сдвигающей составляющей. Это согласуется с данными исследований Г. Лунгерхаузена и Н. Глухович. При этом сопротивление упора сдвигу коррелирует с высотой упора (выше упор – больше сопротивление упора сдвигу). Путем анализа результатов исследований М. Кризинела, Ф. Эггерта, К. Пелешки и Н. Глухович и результатов испытаний дюбельных соединений, проведенных автором, было установлено, что сдвигающее усилие, приходящееся на 1 дюбель для серий с плитами, устроенными по съемной опалубке, находится в пределах 12,34-13,98 кН, вырывающего - в пределах 12,96-14,77 кН. Конкретные величины разрушающих усилий зависят от положения рассматриваемого анкерного упора в группе и его ориентации относительно вектора сдвигающей силы.



Рисунок 3 – Механизмы разрушения уголковых упоров в перекрытиях по съемной опалубке: а – срез дюбелей; б – вырыв дюбелей; в – разрыв упора

В процессе сдвиговых испытаний образцов с профилированным настилом, помимо описанных выше механизмов разрушений, в отдельных образцах были зафиксированы продавливание (рисунок 4 а) и срез бетонного ребра (рисунок 4 б). Было установлено, что разрушение по бетону происходит при уменьшении объема бетонного ребра: в образцах с профилированными настилами с соотношением ширины к высоте гофры $b_0/h < 2,35$, образцы разрушаются вследствие разрушения бетона, в то время как в образцах с более широкими гофрами влияние профилированного настила на работу упоров практически отсутствует. Также стоит отметить, что в образцах, которые разрушились вследствие разрушения бетона, зафиксировано снижение сопротивления сдвигу на 21-47% относительно образцов, устроенных по съемной опалубке при одной и той же высоте и ориентации упоров. Таким образом, в плитах с узкими гофрами ресурс уголковых анкерных упоров не используется в полной мере, что снижает надежность проектируемой конструкции.



Рисунок 4 – Механизмы разрушения уголковых упоров в перекрытиях по несъемной опалубке из профилированного настила: а – продавливание бетонного ребра; б – срез бетонного ребра

По результатам сдвиговых испытаний проведена статистическая обработка данных, получены нормативные сопротивления сдвигу для упоров высотой 95, 125 и 140 мм в перекрытиях, устроенных по съемной опалубке.

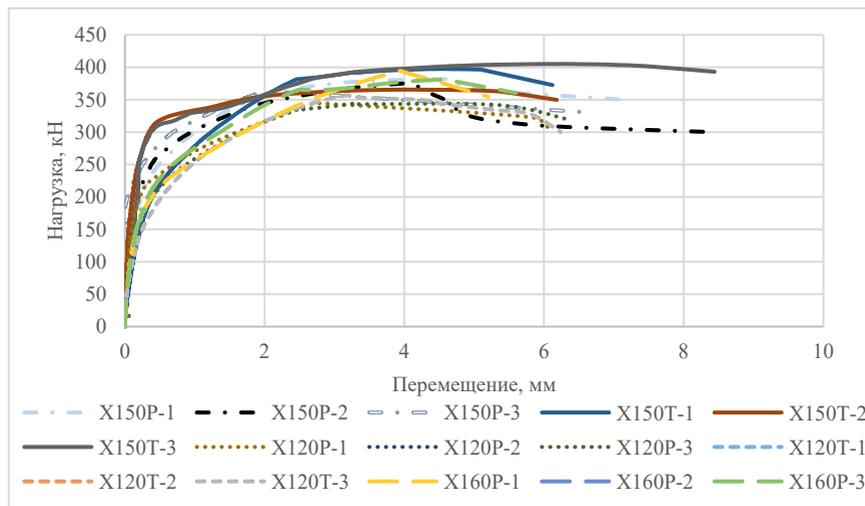


Рисунок 5 – Графики нагрузка перемещения для образцов по съемной опалубке

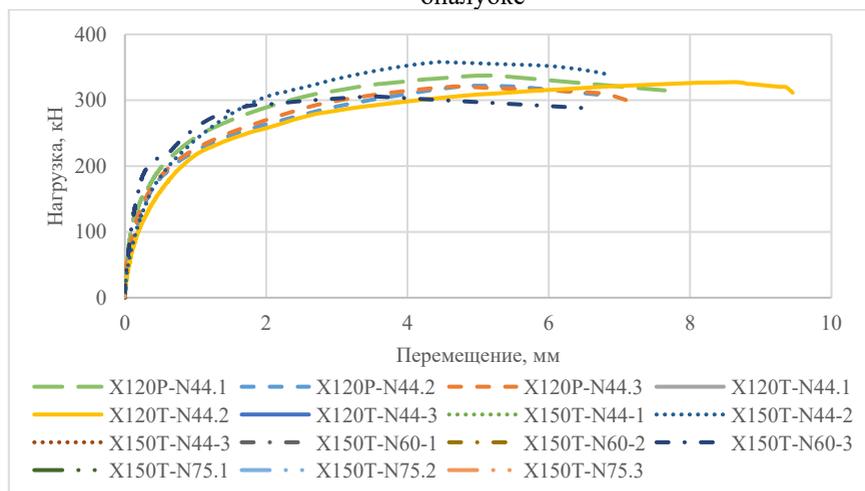


Рисунок 6 – Графики нагрузка перемещения для образцов по несъемной опалубке из профилированного настила

По результатам сдвиговых испытаний были получены графики нагрузка-перемещение для образцов со съёмной (рисунок 5) и несъёмной опалубкой (рисунок 6), которые были использованы для оценки высоты, ориентации относительно вектора сдвигающей силы, прочности бетона плиты и геометрических параметров профилированного настила на податливость уголков упоров. Был сделан вывод, что с точки зрения деформативности, образцы с профилированным настилом и параллельной ориентацией упоров продемонстрировали на 17% большую несущую способность, чем образцы без профилированного настила при прочих равных параметрах. При перпендикулярной ориентации упоров увеличение среднего перемещения балки относительно плиты в образцах с профилированным настилом составило 2%, что находится в пределах статистической погрешности.

По результатам анализа сдвиговых испытаний образцов с несъёмной опалубкой была произведена оценка влияния геометрии профилированного настила на прочность конструкции объединения. Для дальнейшего расчета конструкции объединения, предложена зависимость для вычисления коэффициента k_t , учитывающая влияние геометрии профилированного настила на несущую способность упора:

$$k_t = k_n \left(x_1 \frac{h_{an}}{h} + x_2 \frac{b_0}{h} + x_3 \left(\frac{b_0}{h} \right)^2 + x_4 \right), \quad (1)$$

где x_1, x_2, x_3, x_4 – коэффициенты, зависящие от конструктивных параметров узла, принимаемые по таблице 3;

k_n – коэффициент, зависящий от количества упоров в гофре, для одного упора равный 1,0; для двух и более – 0,8.

h_{an} – высота анкерного упора;

h – высота гофры настила;

b_0 – ширина гофры профилированного настила, определенная на половине высоты гофры.

Таблица 3 Численные коэффициенты к формуле (1)

Положение упора		x_1	x_2	x_3	x_4
$e > 100$ мм	$h_{an}/h \leq 1,56$	0,24	0,145	0,03	0
	$h_{an}/h > 1,56$	0,318	0,103	0,003	0
$55 < e \leq 100$ мм	$h_{an}/h \leq 1,56$	0,25	0,17	$6,79 \cdot 10^{-4}$	0
	$h_{an}/h > 1,56$	$6,83 \cdot 10^{-4}$	0,042	$5,34 \cdot 10^{-4}$	0,663
$e \leq 55$ мм	$h_{an}/h \leq 1,56$	0,305	0,004	0,036	-0,095
	$h_{an}/h > 1,56$	0,026	0,266	0,029	0
e – расстояние от анкерного упора, до стенки гофры настила					

Расчет коэффициента k_t по формуле (1) позволяет повысить надежность сталежелезобетонных балочных перекрытий с плитами, устроенными по профилированному настилу на 6-22% по сравнению с формулой, применяемой по СП 266.1325800.2016. Также стоит отметить, что для профилированных настилов марок Н60 и Н75 по ГОСТ 24045-2016, предлагаемый коэффициент дает запас 5-9% по отношению к результатам сдвиговых испытаний, в то время как расчетные значения сопротивлений по СП 266.1325800.2016 в отдельных случаях превышают результаты испытаний на 7-8%.

По результатам анализа испытаний уголкового упора, проведенных другими исследователями и испытаний, выполненных автором, был сделан вывод о допустимости классификации уголкового анкерного упора как гибких, что позволяет применять их для устройства сталежелезобетонных перекрытий с частичным объединением.

В четвертой главе приведены результаты численных исследований работы конструкции объединения сталежелезобетонного перекрытия на уголкового анкерного упорах.

Предложен способ конечно-элементного моделирования работы уголкового анкерного упора, закрепляемого с помощью дюбелей, который был верифицирован с помощью экспериментальных данных, полученных в третьей главе. На его основе в программном комплексе Ansys Mechanical 2021 R2 была реализована модель испытания уголкового упора на сдвиг в соответствии с методикой ГОСТ Р 58336-2018. Данная модель позволяет выполнить проверку несущей способности анкерного упора, закрепляемых с помощью дюбелей иной высоты и конфигурации без проведения дорогостоящих лабораторных испытаний.

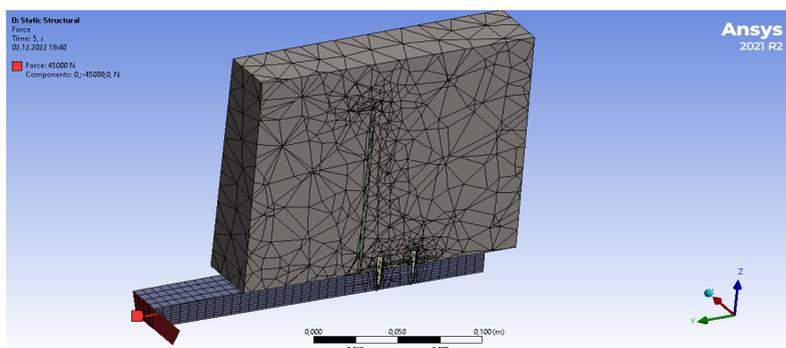


Рисунок 7 – Общий вид расчетной модели (разрез)

Для оптимизации времени расчета в Ansys Mechanical, на этапе отладки параметров модели была создана модель 1 упора в бетоне, закрепленного к пластине с помощью двух дюбелей: сдвиговая нагрузка прикладывалась к торцу пластины, в то время как модель имела жесткую заделку по опорной грани плиты. Тип и размер сетки конечных элементов подбирался исходя из относительного масштаба сопрягаемых частей образца и условий сходимости численного решения (рисунок 7).

Для моделирования отдельных частей образца были применены модели материалов с заданными нелинейными свойствами (характеристики бетона были приняты с учетом критерия прочности Друкера-Прагера, характеристики стали опорной пластины, дюбелей и упоров были приняты по данным производителей. Для того, чтобы замоделировать податливый характер работы анкерных упоров и дюбельных соединений, допускающий пластические деформации данных элементов, в свойствах материала был задан параметр мультилинейного изотропного упрочнения.

Нагружение модели было задано через силу, приложенную ступенями 5, 15, 25, 35 и 45 кН, которые в последствии разбивались решателем на более мелкие подшаги автоматически исходя из условий сходимости. Были проанализированы полученные данные по сдвигающей нагрузке и перемещению в наиболее нагруженном элементе дюбеля (таблица 4), построен график нагрузка-перемещение (рисунок 8), который сравнивался с результатами испытаний серии X-150P, выбранный в качестве геометрического прототипа модели.

Таблица 4 Сопоставление результатов моделирования с результатами эксперимента (фрагмент)

Перемещение, мм	Модель. Нагрузка, кН	X-150P-1		X-150P-2		X-150P-3	
		Нагрузка	Разница	Нагрузка	Разница	Нагрузка	Разница
0,00	1,0	1,9	47%	2,6	61%	4,1	75%
0,49	28,1	31,3	10%	33,1	15%	35,2	20%
1,08	36,44	38,2	5%	38,4	5%	40,3	9%
1,50	39,90	41,9	5%	40,9	2%	42,9	7%
2,06	42,90	44,4	3%	43,3	1%	45,1	5%
2,61	44,54	46,2	4%	44,7	0%	45,1	1%
3,03	44,10	46,9	6%	45,7	3%	45,0	2%
3,54	44,69	47,4	6%	46,0	4%	44,9	0%
4,10	44,81	47,7	6%	47,0	5%	44,8	0%
4,57	44,92	47,7	6%	43,8	-2%	43,9	-2%

4,92	45,04	46,1	2%	40,7	11%	42,7	-6%
5,30	45,08	45,3	1%	39,6	14%	42,2	-7%
6,20	45,00	44,6	-1%	38,6	17%	41,4	-9%

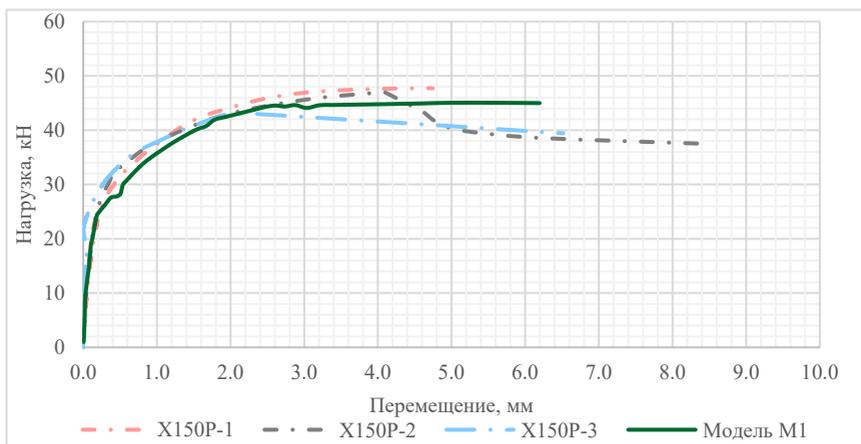


Рисунок 8 – Графики нагрузка-перемещение для исследуемых образцов

Предложенный способ моделирования образца показал хорошую сходимость с результатами эксперимента: средняя разница по нагрузке между результатами моделирования с серией X-150P-1 – 2%; с серией X-150P-2 – 5%; с серией X-150P-3 – 14%.

Результат моделирования отражает общий характер работы упоров в составе железобетонной плиты и напряженно-деформируемое состояние упоров.

Следующая часть четвертой главы посвящена разработке авторской программы «СТЖБ-1», позволяющей проводить расчет усилий в сталежелезобетонных балочных перекрытиях и определять требуемое количество упоров при полном или частичном объединении. Рассмотрен пример расчета сталежелезобетонного балочного перекрытия с полным объединением по СП 266.1325800.2016 и авторской методике. Сравнение результатов расчета показало, что при расчете 9-метровой комбинированной балки с частичным объединением ($\eta=0,57$) требуется на 21% меньшее количество анкерных упоров при дополнительном запасе прочности сечения (на 20% больше). При данной степени объединения прогиб сталежелезобетонного перекрытия увеличился на 29%

относительно перекрытия с полным объединением, однако не превысил нормативный.

Для учета совместной работы железобетонной плиты и стальной балки в составе пространственной расчетной схемы здания при практических инженерных расчетах был предложен алгоритм, позволяющий выполнить моделирование комбинированного перекрытия в программном комплексе Лира-САПР или его аналоге (рисунок 12).

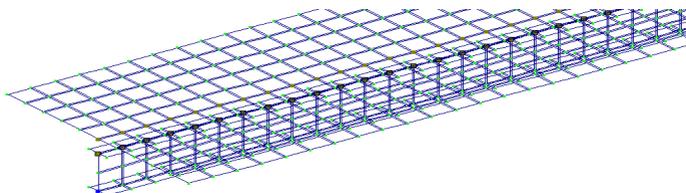


Рисунок 12 – Общий вид КЭ-модели сталежелезобетонного балочного перекрытия в программном комплексе Лира-САПР (фрагмент)

Особенностью предложенной модели является возможность учета податливости анкерных упоров при расчете перекрытия с частичным объединением путем введения в расчетную схему КЭ 56. Для настройки параметров данного КЭ были вычислены жёсткости уголковых анкерных упоров на основании экспериментальных данных, полученных в третьей главе.

Таблица 5 Расчет жесткости анкерных упоров

Серия	P_{rd} , кН	δ , мм	R_x , т/м
X-150P	34,93	7,33	476,8
X-150T	33,95	6,89	492,5
X-120P	31,92	6,16	518,2
X-120T	33,69	8,38	401,9
X-160P	35,45	5,36	661,8
X120P-N44	38,23	7,21	530,3
X120T-N44	36,96	8,52	433,9
X150T-N44	41,15	6,55	628,5
X150T-N60	38,09	5,69	668,9
X-150P-N60	35,01	6,70	522,6
X-150T-N75	23,94	6,00	399,1

Сравнение результатов численного и ручного расчетов показало, что предложенная модель демонстрирует больший прогиб, однако разница составила 11%, что является приемлемым результатом для подобной задачи. Предложенный способ моделирования может быть применен для расчета конструкции как с полным, так и частичным объединением при применении коэффициента надежности, учитывающего погрешность моделирования.

В дополнение к предложенной методике расчета и алгоритма моделирования перекрытия были сформулированы практические рекомендации по конструированию узлов объединения сталежелезобетонного балочного перекрытия с плитами, устроенными по профилированному настилу марок НС44, Н57, Н60 и Н75 по ГОСТ 24045-2016 и уголковыми анкерными упорами, закрепляемыми с помощью дюбелей. Данные рекомендации составлены с учетом опыта изготовления образцов для испытаний по ГОСТ Р 58336-2018, конструктивных требований СП 266.1325800.2016 и рекомендаций производителя упоров. В предложенных рекомендациях по конструированию узлов рассмотрены случаи для установки двух и трех уголковых анкерных упоров в гофре при минимально допустимых краевых и осевых расстояниях (рисунок 13).

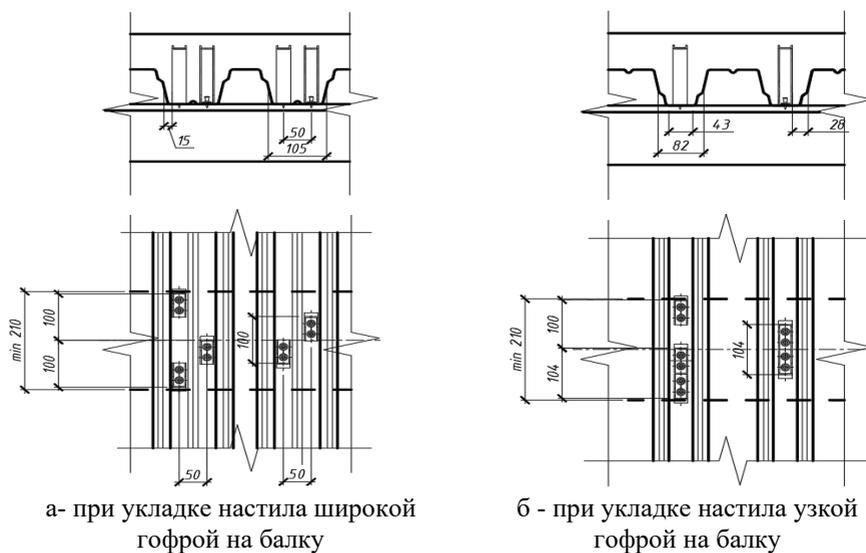


Рисунок 13 – Предложения по расстановке упоров в профилированном настиле марки Н75 по ГОСТ 24045-2016 (фрагмент)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Согласно полученным новым экспериментальным данным, уголкового упоры испытывают сложное напряженно-деформируемое состояние, обусловленное особенностями распределения сдвигающих сил по контактной поверхности упоров, их геометрией и особенностями работы дюбельных соединений. Уголкового упоры в составе сталежелезобетонных перекрытий под воздействием сдвигающих сил в шве объединения испытывают комбинированное воздействие сдвигающих и растягивающих усилий. Величина растягивающей и сдвигающей составляющих зависит от высоты анкерного упора, его ориентации относительно вектора сдвигающих сил и наличия профилированного настила в составе перекрытия.

2. Применение профилированного настила в качестве несъемной опалубки с соотношением ширины гофры к высоте $b_0/h < 2,35$ в общем случае оказывает негативное влияние на несущую способность и деформативность конструкции объединения: по результатам испытаний было зафиксировано снижение расчетного сопротивления упоров сдвигу на 21-47% и снижение деформативности на 5-17% по отношению к результатам испытаний упоров в плитах без профилированного настила.

3. По результатам испытаний предложена конечно-элементная модель фрагмента сталежелезобетонного перекрытия на уголкового анкерном упоре, закрепляемом дюбель-гвоздями, для программного комплекса Ansys Mechanical, средняя сходимости которой по несущей способности с результатами эксперимента составила 2-14%. Применение численной модели позволит в дальнейшем заменить сдвиговые испытания численным моделированием и получать результаты с достаточной для практических расчетов точностью.

4. Существующая методика расчета сталежелезобетонных перекрытий, приведенная в СП 266.1325800.2016, имеет ряд ограничений, что снижает эффективность использования прочностных свойств материалов при проектировании. По результатам проведенного исследования предложена методика, учитывающая деформативные свойства уголкового упоров, закрепляемых с помощью дюбелей. Предложенная методика позволяет повысить несущую способность проектируемых конструкций за счет применения уточненного коэффициента редукции k_t , учитывающего влияние геометрии профилированного настила на несущую способность упора.

5. Для инженерных расчетов разработана программа для ЭВМ (Авторское свидетельство №2022669022 от 14.10.2022), позволяющая выполнить расчет геометрических характеристик сталежелезобетонного сечения, расчет величины сдвиговых усилий по СП 266.1325800, расчет величины сдвигового сопротивления упоров и подбор количества угловых анкерных упоров, требуемых для обеспечения совместной работы частей сталежелезобетонного перекрытия.

6. Для инженерных расчетов предложен алгоритм моделирования комбинированного перекрытия в программном комплексе Лира-САПР или его аналоге. Особенностью предложенной модели является возможность учета податливости анкерных упоров при расчете перекрытия с частичным объединением путем введения в расчетную схему КЭ 5б. Для настройки параметров данного КЭ были вычислены коэффициенты жёсткости угловых анкерных упоров на основании экспериментальных данных, полученных в третьей главе. Сравнение результатов численного и ручного расчетов показало, что предложенная модель показала больший прогиб, однако разница составила 11%, что является приемлемым результатом для подобной задачи. Предложенный способ моделирования может быть применен для расчета конструкции как с полным, так и частичным объединением при применении коэффициента надежности, учитывающую погрешность моделирования.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. В ходе исследования были выявлены следующие направления для дальнейшего изучения работы сталежелезобетонных перекрытий с монолитными железобетонными плитами, объединенными угловыми анкерными упорами и устроенных по несъемной опалубке из стального профилированного настила:

1. Применение гибких анкерных упоров для повышения энергоемкости и живучести сталежелезобетонных балочных перекрытий при динамических нагрузках высокой интенсивности;

2. Сейсмостойкость сталежелезобетонных балочных перекрытий, объединенных гибкими анкерными упорами;

3. Напряженно-деформируемое состояние угловых упоров в сталежелезобетонных балочных перекрытиях с монолитными плитами, устроенными по профилированному настилу с высотой гофры более 80 мм.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:

1. Тонких Г.П., Чесноков Д.А. Огнестойкость конструкции, обеспечивающей сдвиговое соединение сталежелезобетонных балок // Строительство и реконструкция, 2020. №6(92). С. 59-65.
2. Тонких Г.П., Чесноков Д.А. Экспериментальное исследование сдвигового соединения монолитных сталежелезобетонных перекрытий на угловых анкерных упорах // Вестник МГСУ, 2021. №2. С. 144-152. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.144-152
3. Конин Д.В, Крылов А.С., Чесноков Д.А. Оценка результатов испытания угловых анкерных упоров на сдвиговое воздействие // Строительная механика и расчет сооружений, №3. 2021. С. 16-26.
4. Тонких Г.П., Чесноков Д.А. Влияние податливости анкерных упоров на сейсмостойкость сталежелезобетонного перекрытия // Сейсмостойкое строительство, 2021. №4. С. 28-35.
5. Тонких Г.П., Чесноков Д.А. Расчет сдвигового сопротивления угловых анкерных упоров в плитах сталежелезобетонных перекрытий, устроенных по профилированному настилу // Промышленное и гражданское строительство, 2022. №7. С. 17-23.

Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science:

6. Тонких Г.П., Чесноков Д.А. Behavior investigation of powder actuated shear connectors in composite beams with profiled sheeting // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2021 №1070. С. 10. doi:10.1088/1757-899X/1070/1/012104
7. Тонких Г.П., Чесноков Д.А. Design Of Composite Beams With Concreted Slabs On Steel Metal Deck // Proceedings of the II Scientific Conference “Modelling and Methods of Structural Analysis” AIP Conf. Proc. 2497, 020006, 2023. С. 12.

Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:

8. Чесноков Д.А., Плуталов М.С. Применение анкерных упоров в сталежелезобетонных плитах // Сборник докладов научно-технической конференции по итогам исследовательских работ студентов института строительства и архитектуры НИУ МГСУ. Москва, 2020. С. 329-331.