

*На правах рукописи*



**Клеван Вадим Игоревич**

**НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ  
СОСТАВНЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК СО СТЕНКОЙ  
ИЗ ГОФРИРОВАННОЙ СТАЛИ И ПОЯСАМИ  
ИЗ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО КЛЕЕНОГО ШПОНА**

Специальность: 2.1.1. Строительные конструкции,  
здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: **Черных Александр Григорьевич**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Рощина Светлана Ивановна**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный  
университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых»,  
кафедра «Строительные конструкции»,  
заведующий кафедрой;

**Куправа Лали Романовна**,  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Петербургский государственный  
университет путей сообщения  
Императора Александра I»,  
кафедра «Строительные конструкции, здания  
и сооружения», доцент;

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный  
университет», г. Красноярск**

Защита состоится «04» июня 2024 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.01 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 220). Тел. 8 (812) 316-58-73; Email: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/klevan-vadim-igorevich>

Автореферат разослан «18» апреля 2024 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Попов Владимир Минович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В современной строительной отрасли России наблюдается устойчивая тенденция к росту объемов индивидуального жилищного строительства. Государство оказывает поддержку такому росту, в том числе через стимулирование ипотечного кредитования, развитие Дальнего Востока, Арктики и другие меры. Также ежегодно проводятся капитальные ремонты десятков тысяч многоквартирных жилых домов. Значительная часть вновь возводимых и ремонтируемых объектов содержит деревянные конструкции перекрытий и покрытий (стропильные системы, фермы и т.д.). С применением древесины возводятся инфраструктурные, спортивные, культовые здания и сооружения.

В 2020–2024 гг. последовательно наблюдаются разнообразные явления, дестабилизирующие рыночную конъюнктуру в сфере применения деревянных конструкций. К ним можно отнести: существенный рост цен на клееную древесину; осложнения в обслуживании и поставках оборудования, клеев для производства КДК; уменьшение экспорта стали, лесных материалов, высокотехнологичной продукции деревообрабатывающего комплекса, включая LVL. В связи с этим создаются предпосылки для более широкого применения составных ДК, включая конструкции, комбинированные из различных материалов. Например, высокие прочностные характеристики LVL при работе его на растяжение позволяют создавать эффективные конструкции двутавровых балок с поясами из этого композиционного материала. Появились новые соединители для ДК, проведены многочисленные исследования их работы. Стоит отметить изменения форм и технологии изготовления металлических зубчатых пластин и когтевых шайб.

Однако до настоящего времени анализ напряженно-деформированного состояния элементов составных ДК на податливых связях представляет определенные сложности. Теоретические исследования в этой области широко проводились в середине XX в., соответственно, не учитывают изменившихся тенденций, например, гибридных технологий производства несущих конструкций. В нормах по проектированию ДК не рассматривается работа податливых соединений в конструкциях, комбинированных из разнородных материалов (древесина, сталь, композиты). Решение этой проблемы позволит создавать новые эффективные типы плоских и пространственных составных деревянных конструкций, а также более полно анализировать работу уже существующих. Следовательно, развитие метода расчета составных двутавровых металлодеревянных балок с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL) и стенкой из гофрированной стали по предельным состояниям является актуальной и своевременной научно-исследовательской задачей, обладающей практической значимостью.

**Степень разработанности темы исследования.** Составные конструкции из древесины известны в практике строительства с древних времен, однако до разработки Д. И. Журавским теории касательных напряжений в балках их проектирование было возможно производить только на основании опыта. Одни из первых теоретических работ по расчету составных стержней выполнены Ф. Engesser, им дан метод определения их приведенного модуля упругости. Впоследствии развитие теории составных стержней из различных материалов проводилось R. Mises, J. Ratzerdorfer, H. Muller–Breslau, L. Gruning, J. Arnovlievic и др. Рассматривались они и в трудах С. П. Тимошенко. В области деревянных составных стержней наиболее значительные работы выполнены А. Р. Ржаницыным, П. Ф. Плешковым, В. Г. Писчиковым, А. Б. Губенко, Г. В. Свенцицким, В. М. Коченовым, М. Е. Каганом, А. В. Дятловым, В. С. Деревягиным, В. В. Пинаджаном, К. С. Завриевым, Н. Ю. Кушелевым и др. В последние годы в области составных конструкций, включая деревянные балки и плиты, выполнены исследования В. И. Колчуновым, А. В. Турковым, В. И. Жадановым, А. Г. Черных, Н. В. Клюевой, П. А. Гвозиковым, П. В. Сапожниковым, Е. А. Скобелевой, С. И. Горностаевым, Я. Е. Колчиной, О. В. Калашниковой, А. В. Карельским, А. С. Черных, С. Г. Каратаевым, П. С. Ковалем, Д. А. Украинченко, С. В. Калининим, С. В. Лисовым, J. F. Miller и др. Вместе с тем следует отметить, что составные многослойные (многоветвевые) балки, комбинированные из различных материалов, в т.ч. из профилированной стали и однонаправленного клееного шпона (LVL), других материалов на основе древесины по-прежнему остаются малоизученными, а в достаточной мере научно обоснованных методов их расчета не существует.

**Цель исследования** состоит в разработке метода расчета составных двутавровых металлодеревянных балок перекрытия с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа и со швами сплачивания элементов на металлических зубьях по 1 и 2 группам предельных состояний, наиболее полно учитывающего специфику их конструктивных решений.

**Задачи исследования:**

1. Провести критический анализ состояния вопроса по теории и практике применения составных конструкций, комбинированных из материалов на основе древесины и стали, выявить существующие проблемы и определить цели и задачи исследований.

2. Провести теоретический анализ напряженно-деформированного состояния элементов изгибаемых составных двутавровых металлодеревянных балок с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа и со швами сплачивания элементов на металлических зубьях с учетом податливости связей между ними.

3. Разработать методику определения коэффициента жесткости швов сплачивания элементов составной металлодеревянной балки на металлических зубьях.

4. Разработать методики и провести экспериментальное исследование несущей способности и деформативности изгибаемых составных двутавровых металлодеревянных балок с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа и со швами сплачивания элементов на металлических зубьях.

5. Создать конечно-элементную модель составной двутавровой металлодеревянной балки с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа и со швами сплачивания элементов на металлических зубьях с учетом податливости связей между ними для исследования влияния конструктивных параметров на НДС элементов.

6. Разработать алгоритм усовершенствованного метода расчета составных двутавровых металлодеревянных балок с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа и со швами сплачивания элементов на металлических зубьях по 1 и 2 группам предельных состояний с учетом податливости связей между их элементами.

**Объект исследования:** составная двутавровая металлодеревянная балка перекрытия с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа и со швами сплачивания элементов на металлических зубьях.

**Предмет исследования:** напряженно-деформированное состояние элементов изгибаемых составных двутавровых металлодеревянных балок перекрытия с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа и со швами сплачивания элементов на металлических зубьях с учетом податливости связей между ними.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

1. На основе развития метода расчета составных деревянных конструкций за счет применения подхода, состоящего в рассмотрении деформирования швов по разности деформаций в отдельных ветвях выбранных сечений на элементарном участке длины, предложена расчетная модель составной балки двутаврового сечения, комбинированной из гофрированной стали (стенка) и однонаправленного клееного шпона (пояса), как трехветвевое составное стержня с упруго-податливыми связями.

2. Путем физического моделирования определен коэффициент жесткости  $\eta$  швов сплачивания элементов составной металлодеревянной балки с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа.

3. Установлена зависимость условного модуля упругости  $E_{eb}$  металлодеревянной балки с поясами из LVL и стенкой из гофрированной стали от уровня нагрузки, учитывающего пластические деформации системы, определена зависимость модуля упругости фиктивной цельной балки аналогичного сечения  $E_S$  от ее конструктивных параметров и уровня нагрузки

4. Установлены зависимости несущей способности от размеров поясов и высоты стальной профилированной стенки составной двутавровой металлодеревянной балки на упруго-податливых связях с поясами из LVL.

**Теоретическая значимость диссертационной работы** заключается в обосновании методами строительной механики составных анизотропных стержней расчетной модели для определения напряженно-деформированного состояния изгибаемой составной двутавровой металлодеревянной балки с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа и со швами сплачивания элементов на металлических зубьях с учетом упругой податливости связей между ними.

**Практическая значимость диссертационной работы** состоит в:

1. Разработке методики и определении упругих свойств швов сплачивания элементов составной металлодеревянной балки с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа и со швами сплачивания элементов на металлических зубьях.

2. Разработке рекомендаций по проектированию составных двутавровых металлодеревянных балок с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа и со швами сплачивания элементов на металлических зубьях.

**Методология и методы исследования** основываются на применении научных методов познания, классических положений строительной механики составных анизотропных стержней, статистики и планирования эксперимента, а также теории расчета строительных конструкций, зданий и сооружений из древесины и материалов на ее основе.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Расчетная модель изгибаемой составной двутавровой металлодеревянной балки с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа и со швами сплачивания элементов на металлических зубьях в виде составного трехслойного стержня с податливыми связями продольного сдвига и абсолютно жесткими поперечными связями.

2. Результаты физического моделирования деформирования соединения поясов и стенки конструкции при действии сдвигающих усилий в швах сплачивания (значение коэффициента жесткости  $\eta$  шва).

3. Результаты экспериментальных исследований по деформативности, несущей способности и характеру разрушения изгибаемых составных

двухавровых металлодеревянных балок с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа и со швами сплачивания элементов на металлических зубьях.

4. Метод расчета составных двухавровых металлодеревянных балок с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа и со швами сплачивания элементов на металлических зубьях с учетом податливости связей между ними по 1 и 2 группам предельных состояний.

**Область исследования** соответствует паспорту научной специальности 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения в части п. 3 «Развитие теории и методов оценки напряжённого состояния, живучести, риска, надёжности, остаточного ресурса и сроков службы строительных конструкций, зданий и сооружений, в том числе при чрезвычайных ситуациях, особых и запроектных воздействиях, обоснование критериев приемлемого уровня безопасности».

**Степень достоверности** результатов обеспечена за счет использования общепринятых определений, допущений и гипотез механики твердого деформируемого тела, современных подходов к анализу напряженно-деформированного состояния элементов деревянных конструкций, включая численные методы, поверенного аттестованного измерительного оборудования, классических подходов к планированию и статистической обработке в экспериментальных исследованиях; подтверждается приемлемой сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, включая численные.

#### **Апробация работы.**

Основные положения диссертационной работы представлены на следующих конференциях:

1) Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Научные исследования современных проблем развития России: диалог поколений», г. Санкт-Петербург, СПбГЭУ, 19 декабря 2019 г.

2) 73-я научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Актуальные проблемы современного строительства», г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 2020 г.

3) Международная научно-техническая конференция «International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering» (MPCPE-2020), г. Владимир, ВлГУ им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, 27-28 апреля 2020 г.

4) XII Международная конференция «Актуальные проблемы архитектуры и строительства», г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 25-26 ноября 2020 г.

5) Международная научная конференция «Industrial and Civil Construction 2021», г. Белгород, БГТУ им. Шухова, 18-19 января 2021 г.

б) Международная научно-техническая конференция «International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering» (MPCPE-2021), г. Владимир, ВлГУ им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, 26-28 апреля 2021 г.

7) LXXV Научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Актуальные проблемы современного строительства», г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 11-14 октября 2022 г.

8) XII Международная научно-техническая конференция «Инновации в деревянном строительстве», г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 20–21 апреля 2023 г.

**Личный вклад автора** в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в непосредственном участии автора на всех этапах исследования; в постановке задач диссертационного исследования; в анализе и обобщении теоретических и экспериментальных материалов по теме исследования; в построении математических моделей; в верификации полученных теоретических результатов путем сравнения с данными натурных испытаний и численным моделированием; в подготовке основных научных публикаций по выполненной работе.

**Публикации.** Материалы диссертационного исследования опубликованы в 6 печатных работах общим объемом 25,32 п.л., лично автором – 2,47 п.л., в т.ч. 4 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ.

**Внедрение результатов диссертационной работы.** Результаты выполненных научных исследований внедрены в практической области:

– в учебный процесс по дисциплине «Спецкурс по проектированию деревянных конструкций» (для обучающихся по направлению подготовки по специальности 08.04.01 «Промышленное и гражданское строительство: проектирование»);

– при разработке проектной документации ООО «Кровля+» на объект капитального строительства «Индивидуальный жилой дом, дер. Колтуши, Ленинградская обл.»;

– при разработке проектной документации ООО «Большепролет» на объект капитального строительства «Склад хранения готовой продукции.

#### **Структура и объем диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы и приложений. Объем работы – 263 страницы машинописного текста, включая 19 таблиц и 83 рисунка, 5 приложений. Список литературы содержит 226 наименований, в том числе 64 – на иностранных языках.

**Во введении** сформулирована и обоснована актуальность исследования и применения составных двутавровых металлодеревянных балок с поясами

из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа, раскрыта степень разработанности проблемы, поставлены цель и задачи исследования, указаны научная новизна, методология, а также теоретическая и практическая значимость диссертационной работы.

**В первой главе** приведена общая характеристика и опыт применения составных деревянных и металлодеревянных конструкций, конструкций балок с применением гофрированной стали, проведен анализ исследований составных конструкций, комбинированных из материалов на основе древесины и стали; выявлена проблема отсутствия расчетных методик для составных металлодеревянных конструкций (балок), учитывающих податливость связей между их составными элементами. Определены цель и задачи исследований.

**Во второй главе** предложена и теоретически обоснована математическая модель изгибаемой составной двутавровой металлодеревянной балки с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа и со швами сплачивания элементов на металлических зубьях в виде составного трехслойного стержня с податливыми связями продольного сдвига и абсолютно жесткими поперечными связями; определена зависимость изогнутой оси металлодеревянной балки от упругих свойств швов сплачивания ее элементов; определено напряженно-деформированное состояние элементов изгибаемых металлодеревянных балок для случаев распределенной нагрузки и системы сосредоточенных сил.

**В третьей** представлены методика и результаты экспериментальных исследований по определению: упругих свойств швов сплачивания стенки из гофрированной стали с поясами из однонаправленного клееного шпона; характера распределения напряжений в поясах и стенке металлодеревянных балок при изгибе; несущей способности и деформативности составных двутавровых металлодеревянных балок.

**В четвертой главе** представлена разработанная конечно-элементная модель составной двутавровой металлодеревянной балки со стенкой из стального профилированного листа и поясами из LVL, проведены ее численные исследования; определен характер напряженно-деформированного состояния элементов конструкции; выполнено сравнение результатов экспериментальных и численных исследований.

**В пятой главе** определены критерии наступления предельных состояний составных двутавровых металлодеревянных балок; представлены разработанные методика и алгоритм расчета составных двутавровых балок со стенкой из гофрированной стали и поясами из однонаправленного клееного шпона по 1 и 2 группам предельных состояний; даны рекомендации по проектированию таких конструкций.

**В заключении** изложены основные выводы по результатам диссертационной работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**1. Расчетная модель изгибаемой составной двутавровой металло-деревянной балки с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа и со швами сплачивания элементов на металлических зубьях в виде составного трехслойного стержня с податливыми связями продольного сдвига и абсолютно жесткими поперечными связями.**

В качестве объекта исследования рассмотрена двутавровая балка со стенкой из профилированного стального листа и поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL) – рисунок 1. В элементах стенки выштамповываются специальные зубья, внедряемые в материал поясов, что позволяет обеспечить надежность связей сдвига и отрыва (поперечных). Такое соединение в целом характеризуется как соединение нагельного типа и соответствует соединениям деревянных конструкций с применением металлических зубчатых пластин, а также когтевых шайб. Таким образом, при изгибе балки пояса и стенка стремятся к взаимному смещению вдоль оси стержня, однонаправленный клееный шпон в соединении сминается вдоль волокон, а металлические зубья работают на срез (изгибаются). Деформативность данной конструкции выше предполагаемой деформативности аналогичной «монолитной» балки, а напряжения в ее элементах – больше.

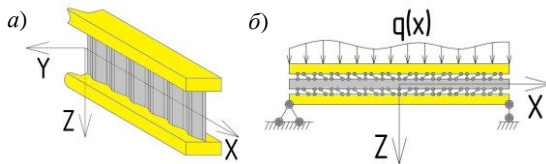


Рисунок 1 – Составной комбинированный стержень;  
а) – общий вид конструкции; б) – расчетная схема

Для определения НДС элементов изгибаемой конструкции необходимо найти дифференциальное уравнение ее изгиба. Использован подход на основании классической теории изгиба составных балок, разработанной П. Ф. Плешковым, А. Р. Ржаницыным, интерпретированной к данному конкретному случаю. Расчетной моделью балки является составной трехветвевой брус, опертый по краям и нагруженный поперечной силой. Для отдельных ветвей справедливы допущения:

- поперечные сечения, плоские до изгиба, остаются плоскими после изгиба и поворачиваются на некоторый угол;
- в вертикальном направлении продольные слои балки не оказывают давление друг на друга;

- вес элементов конструкции прикладывается в модели как внешняя распределенная нагрузка;
  - прогибы конструкции малы;
  - работа балки – упругая.
- Усилия в зубьях находятся по формуле:

$$T = \eta \delta, \quad (1)$$

где  $T$  – сдвигающее усилие в шве составного стержня, приходящееся на единицу длины шва, Н/мм;  $\eta$  – экспериментальный коэффициент жесткости шва, Н/мм<sup>2</sup>;  $\delta$  – сдвиг связи, мм.

Разность деформаций в соседних ветвях может быть найдена следующим образом:

$$\frac{d\delta}{dx} = \frac{\sigma_w}{E_w} - \frac{\sigma_c}{E_c}, \quad (2)$$

где  $\sigma_w$  – краевые нормальные напряжения в стенке, МПа;  $\sigma_c$  – краевые нормальные напряжения в поясах, МПа;  $E_w$  – модуль упругости стенки, МПа;  $E_c$  – модуль упругости материала пояса, МПа.

Следовательно, продифференцировав (1) по  $x$ , можно записать

$$\frac{dT}{dx} = \eta \cdot \left( \frac{\sigma_w}{E_w} - \frac{\sigma_c}{E_c} \right). \quad (3)$$

Представим изгибающий момент в балке как следующую сумму

$$M(x) = M_S + M_A, \quad (4)$$

где  $M(x)$  – изгибающий момент в составном стержне, Нмм;  $M_S$  – изгибающий момент в фиктивной цельной балке, Нмм;  $M_A$  – добавочный изгибающий момент от сдвига отдельных ветвей, Н·мм.

Аналогично прогибы составной балки:

$$z(x) = z_S + z_A, \quad (5)$$

где  $z(x)$  – прогиб составного стержня, мм;  $z_S$  – прогиб фиктивной цельной балки под действием момента  $M_S$ , мм;  $z_A$  – добавочный прогиб отдельных ветвей под действием  $M_A$ , мм.

Для двутаврового сечения уравнение запишется

$$E_S I_S \frac{d^2 z_S}{dx^2} + (E_w I_w + 2E_c I_c) \frac{d^2 z_A}{dx^2} = -M(x), \quad (6)$$

где  $E_S$  – модуль упругости фиктивной цельной балки, МПа;  $I_S$  – момент инерции фиктивной цельной балки,  $\text{м}^4$ ;  $I_w$  – момент инерции стенки,  $\text{м}^4$ ;  $I_c$  – момент инерции пояса,  $\text{м}^4$ .

Дважды дифференцируя (6) по  $x$ , получим

$$E_S I_S \frac{d^4 z_S}{dx^4} + (E_w I_w + 2E_c I_c) \frac{d^4 z_A}{dx^4} = q(x). \quad (7)$$

После преобразования

$$\frac{d^4 z_S}{dx^4} = -\frac{\eta}{E_S F_c} \cdot \frac{d^2 z_A}{dx^2}, \quad (8)$$

где  $F_c$  – площадь поперечного сечения пояса,  $\text{мм}^2$ .

С учетом (8) выражение (7) приобретает вид

$$(E_w I_w + 2E_c I_c) \frac{d^4 z_A}{dx^4} - \frac{\eta}{E_S F_c} \cdot E_S I_S \frac{d^2 z_A}{dx^2} = q(x). \quad (9)$$

Учитывая (5), (8)

$$\begin{aligned} & (E_w I_w + 2E_c I_c) \frac{d^4 z}{dx^4} - \frac{\eta}{E_S F_c} \cdot E_S I_S \frac{d^2 z}{dx^2} + \\ & + \frac{\eta}{E_S F_c} \cdot \left[ (E_w I_w + 2E_c I_c) \cdot \frac{d^2 z_A}{dx^2} + E_S I_S \frac{d^2 z_S}{dx^2} \right] = q(x). \end{aligned} \quad (10)$$

Согласно (6), запишем

$$(E_w I_w + 2E_c I_c) \frac{d^4 z}{dx^4} - \frac{\eta I_S}{F_c} \cdot \frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{\eta M}{E_S F_c} - \frac{d^2 M}{dx^2}. \quad (11)$$

В выражении (11) геометрические и упругие характеристики конструкции можно разделить на две категории:

– варьируемые известные – геометрические характеристики конструкции ( $F_c$ ,  $E_w$ ,  $E_c$ ,  $I_w$ ,  $I_c$ ,  $I_S$ );

– неизвестные, определяются на основе экспериментальных данных ( $E_S$ ,  $\eta$ ).

При изготовлении стенки балки из гофрированной стали не имеет практического смысла учитывать ее жесткость в направлении вдоль оси балки (поперек гофров), т.к. момент инерции стенки  $I_w$  в этом случае значительно меньше моментов инерции поясов  $I_c$  и общего момента инерции сечения  $I_S$ .

$$I_w \ll I_c \ll I_S. \quad (12)$$

Исходя из указанных обстоятельств, жесткость стенки составной балки, комбинированной из гофрированной стали и LVL, принимается равной нулю. Тогда (11) приобретет вид искомого линейного неоднородного дифференциального уравнения изгиба такой балки, выведенное в общем виде на основе теории составных стержней:

$$2E_c I_c \cdot \frac{d^4 z}{dx^4} - \frac{\eta I_s}{F_c} \cdot \frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{\eta M}{E_s F_c} - \frac{d^2 M}{dx^2}. \quad (13)$$

Величины  $E_s$ ,  $\eta$  определяются по результатам экспериментальных исследований.

Решение уравнения (13) открывает возможности для анализа НДС элементов составной конструкции.

Для случая равномерно распределенной нагрузки решение уравнения (13) будет:

$$z(x) = \frac{5ql^4}{384E_s I_s} + \frac{qx^2(2x^2 - 3l^2)}{48E_s I_s} + \frac{qF_c}{I_s \eta} \cdot \left[ 1 - \frac{2E_c I_c}{E_s I_s} \right] \cdot \left( \frac{l^2}{8} - \frac{1}{\xi^2} \cdot \left[ 1 - \frac{\operatorname{ch} \xi x}{\operatorname{ch} \xi l/2} \right] - \frac{x^2}{2} \right), \quad (14)$$

где  $q$  – интенсивность распределенной нагрузки, Н/мм;  $l$  – пролет балки, мм;  $\xi$  – характеристика конструкции, вычисляемая по формуле (15):

$$\xi = \sqrt{\frac{\eta I_s}{2E_c I_c F_c}}. \quad (15)$$

В случае действия системы двух сил, приложенных в третях пролета:

$$z(x) = \frac{P}{E_s I_s} \cdot \left( \frac{l^3}{48} + \frac{x^2}{4} \cdot \left[ \frac{x}{3} - \frac{l}{2} \right] - \frac{1}{\xi^2} \cdot \left[ x + \frac{l}{2} \right] + \frac{1}{\xi^3} \cdot \left[ \frac{\operatorname{sh} \xi l/2 \cdot \operatorname{ch} \xi x}{\operatorname{ch} \xi l/2} - \operatorname{sh} \xi x \right] \right). \quad (16)$$

Уравнения (14), (16) устанавливают взаимосвязь между прогибами и модулем упругости фиктивной цельной балки. На основании экспериментальных значений прогибов определяется величина модуля упругости фиктивной цельной балки. В случае четырехточечного изгиба (рисунок 2) по формуле (17).

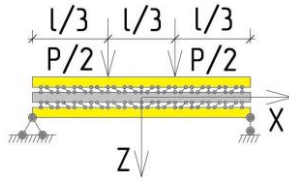


Рисунок 2 – Схема четырехточечного изгиба двутавровой балки

$$E_s = \frac{P}{z(l/6)I_s} \cdot \left( \frac{23l^3}{1296} - \frac{2l}{3\xi^2} + \frac{1}{\xi^3} \cdot \left[ \frac{\text{sh}\xi l/2 \cdot \text{ch}\xi l/6}{\text{ch}\xi l/2} - \text{sh}\xi \frac{l}{6} \right] \right). \quad (17)$$

Для применения вышеизложенных формул экспериментальным путем предварительно определяется коэффициент жесткости шва сплачивания поясов из LVL со стенкой из гофрированной стали и прогиб балки в сечении, в котором приложена одна из сил в зоне упругой работы балки.

## 2. Результаты физического моделирования деформирования соединения поясов и стенки конструкции при действии сдвигающих усилий в швах сплачивания (значение коэффициента жесткости $\eta$ шва).

Для определения  $\eta$  был отсечен фрагмент конструкции длиной 100 мм для удобства проведения испытаний (рисунок 3). При этом, выбранном участке размещены по 2 зуба, внедренные в каждый деревянный пояс конструкции. Один из зубьев каждого пояса расположен вблизи края и способствует местному разрушению путем скалывания волокон, что может нарушать чистоту показаний исследования. Для исключения данных воздействий, был выполнен дополнительный пропил стенки вблизи зуба. Таким образом в образце остаются всего 2 рабочих зуба.

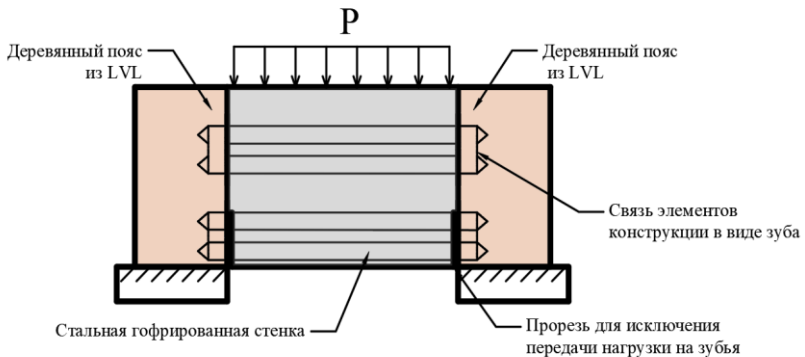


Рисунок 3 – Схема проведения испытаний

Образец был поставлен на опорные пластины, чтобы была возможность перемещения стенки отдельно от поясов конструкции (рисунок 4, *а*). Испытания производились с постоянной нагрузкой 2 мм/мин, при этом фиксировались усилия и соответствующие смещения. Все образцы были доведены до разрушения (рисунок 4, *б*). В результате проведенных опытов получена зависимость нагрузки от возникающего смещения (рисунок 5).

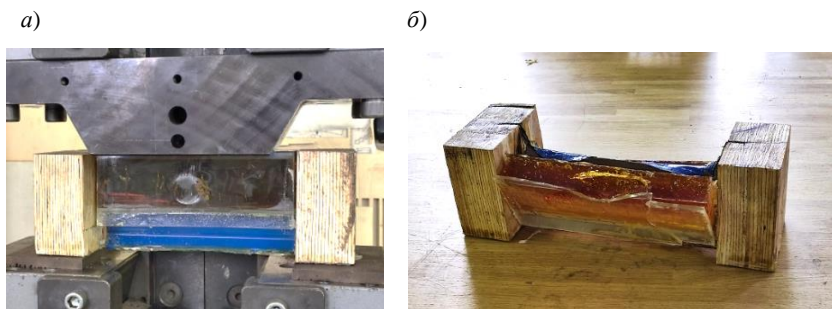


Рисунок 4 – Определение коэффициента жесткости шва:  
*а*) образец в испытательной установке *б*) разрушенный образец

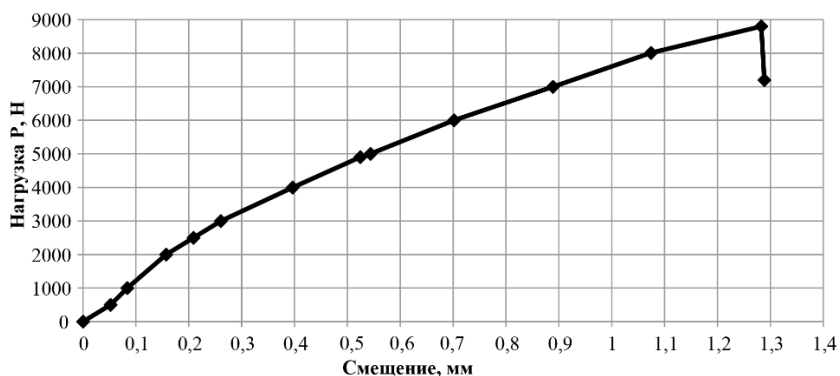


Рисунок 5 – Зависимость смещения от нагрузки для испытываемых образцов (2 шва сплавления)

Разрушение образцов наступало с исчерпанием несущей способности соединения, а именно – с разрывом стального профилированного листа (стенки). При этом зависимость смещений нагружаемой средней части образца относительно неподвижных крайних частей имеет слабовыраженную нелинейность на всех этапах нагружения. Согласно выражению (18) и рисунку 5 определим

коэффициент жесткости шва, с учетом количества связей в шве  $n_c$  18,5 шт./м и количества швов  $n_{ш}$  2 шт.:

$$\eta = \frac{T_c n_c}{\delta_c}, \quad (18)$$

$$\eta = \eta_x n_c = 5000 \times 0,0185 = 92,5 \text{ Н/мм}^2, \quad (19)$$

где  $\eta_x$  - линейная жесткость шва, Н/мм, определяемая по формуле:

$$\eta_x = \frac{T_c}{n_{ш} \delta_c} = \frac{4000}{2 \cdot 0,4} = 5000 \text{ Н/мм}. \quad (20)$$

Экспериментально полученное значение (19) для коэффициента жесткости швов сплачивания стенки из гофрированной стали с поясами из однонаправленного клееного шпона при помощи металлических зубьев, выштампованных в стенке, может быть использовано при оценке несущей способности и деформативности конструкций двутавровых металлодеревянных балок при изгибе.

**3. Результаты экспериментальных исследований деформативности, несущей способности и характера разрушения изгибаемых составных двутавровых металлодеревянных балок с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа и со швами сплачивания элементов на металлических зубьях.**

Для выявления характера работы составных двутавровых металлодеревянных балок с поясами из LVL и стенкой из гофрированной стали, было произведено исследование их несущей способности и деформативности. Схема нагружения представлена на рисунке 6, балка, установленная в испытательную машину – на рисунке 7. Нагрузка прикладывалась со скоростью 2 мм в минуту с шагом 3 кН. На каждой ступени производилась выдержка в течение 60 секунд для снятия показаний с приборов. Каждая балка доводилась до разрушения. В процессе проведения испытаний фиксировали величину прилагаемого усилия, прогиб, сдвиг стенки, разрушающую нагрузку и характер разрушения.

Во время проведения испытаний фиксировались видимые повреждения, которые в себя включали: смятие на опоре, разрушение поясов, смятие и скалывание древесины в месте контакта с металлическими элементами, расслаивание поясов, потеря устойчивости металлических элементов, разрывы, повышенный прогиб. В результате эксперимента были определены перемещения, деформации и напряжения в исследуемых балках (рисунок 8).

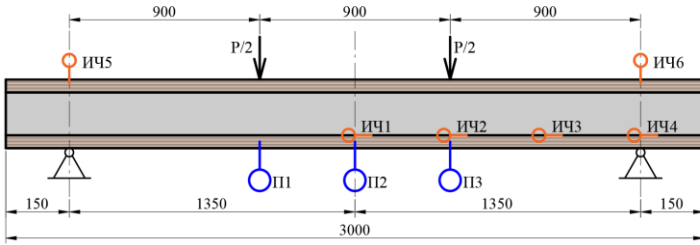


Рисунок 6 – Схема испытания составных металлодеревянных балок: ИЧ1 – индикаторы перемещений часового типа, П1 – индикаторы перемещений тип ПАО6

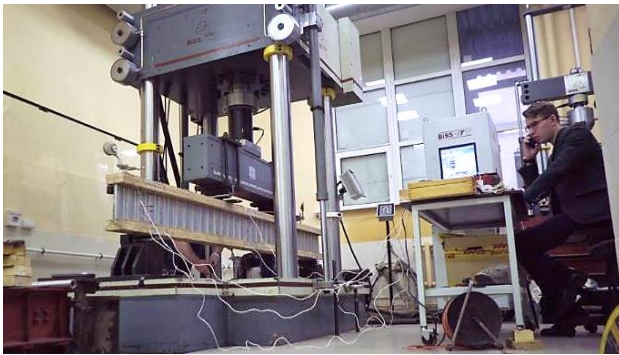


Рисунок 7 – Конструкция перед испытанием

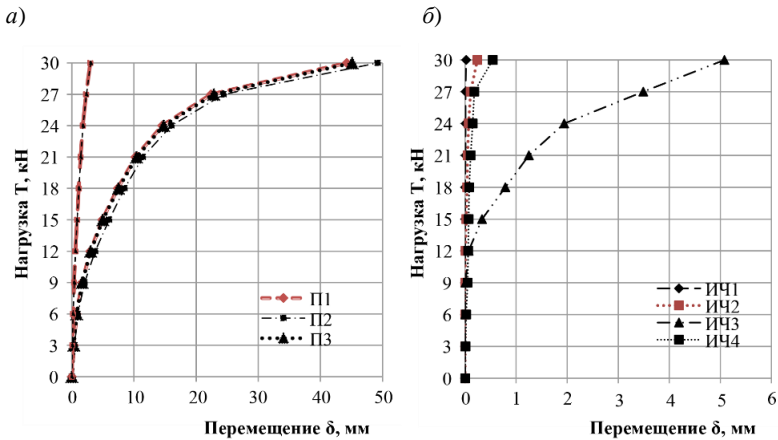


Рисунок 8 – Средние результаты испытания: а) прогибы, смятие на опорах, б) сдвиги

По результатам проведенных экспериментальных исследований установлено:

1) экспериментально определен коэффициент жесткости шва стального и деревянных элементов исследуемой металлодеревянной балки для одного зуба от действия кратковременной нагрузки –  $\eta = 92,593 \text{ Н/мм}^2$ ; линейная жесткость шва на один зуб принята  $5 \text{ кН/мм}$ ;

2) физическая работа балок под нагрузкой может считаться не упругой; определено, что разрушение двутавровых балок носило пластический характер и происходило вследствие разрыва или смятия гофрированной стенки на участках с наибольшими касательными напряжениями в сжатой или растянутой зоне;

3) определен условный модуль упругости металлодеревянной балки с гофрированной стенкой с учетом пластических деформаций в швах сплачивания элементов ( $E_{eb} = 3587 \text{ МПа}$ ), требуемый для выполнения численных исследований по определению НДС составных металлодеревянных балок;

4) вычислен модуль упругости фиктивной цельной балки  $E_s$ , равный для средних значений упругой работы балки –  $6567 \text{ МПа}$ , что позволяет сделать вывод о важности учета влияния нелинейных зависимостей упругих параметров связей и материалов при теоретическом описании работы рассматриваемых конструкции;

5) разрушение металлодеревянных балок с поясами из LVL наступает вследствие смятия и разрыва стенки на участках с наибольшими сдвигающими усилиями в швах, что позволяет обосновать рациональность применения конструктивного решения с утолщенной (двойной) гофрированной стальной стенкой.

Для верификации результатов эксперимента по определению НДС элементов составной металлодеревянной балочной конструкции была составлена расчетная схема в ПК SCAD Office. Нагружение выполнялось по схеме четырехточечного изгиба.

В результате проведения расчетов было определено распределение перемещений по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ , а также нормальные и касательные напряжения для различных уровней нагрузки. Поля распределения значений нагрузки и деформации с учетом физической и геометрической нелинейности получены при уровне нагрузки в  $18 \text{ кН}$ . Деформации балки показаны на рисунке 9.

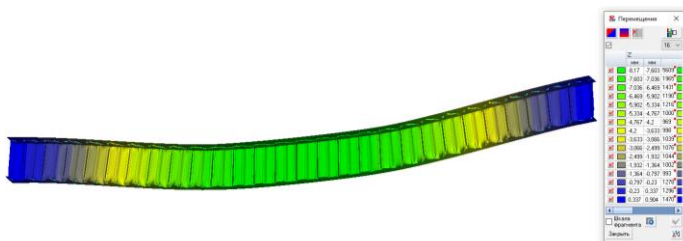


Рисунок 9 – Результаты расчета модели балки: прогибы балки

Сравнения перемещений, полученные расчетным и экспериментальным путем представлены на рисунке 10, где приведены значения смещения осей балки при уровнях нагрузок 12 - 24 кН для наглядности отображения данных. При сопоставлении экспериментальных значений и расчетных перемещений определена близость полученных значений с расхождением до 35% при уровне нагрузки выше 15 кН. При расчете на основе аналитических зависимостей принимались постоянные значения модуля упругости фиктивной балки  $E_s$  (принимаемые 6567 МПа), а также изменяющиеся значения в зависимости от уровня нагрузки  $P$ . Для фиксированного  $E_s=6583$  МПа и переменного  $E_s$  результат приведены на рисунке 10. Значения перемещений при математическом и численном моделировании достаточно близки к экспериментальным данным. Отмечаются схожие тенденции в нарастании перемещений при уровне нагрузки 18 кН и выше.

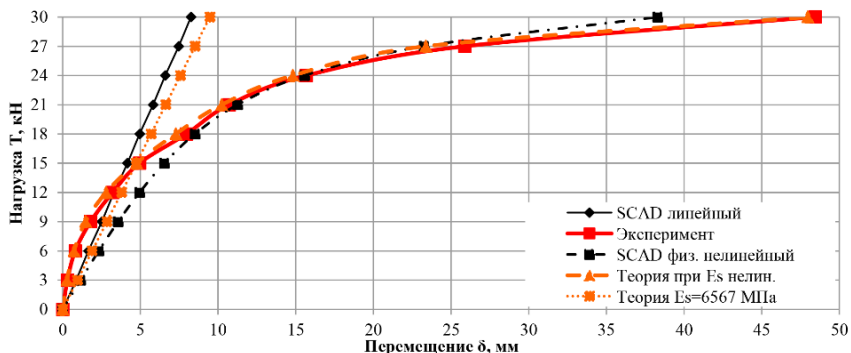


Рисунок 10 – Сравнение теоретических и экспериментальных максимальных вертикальных перемещений балок по нижней кромке конструкции

При сравнении прогибов балки, вычисленных по разработанной теории (см. главу 2), с данными, полученными с помощью ПО SCAD при

постоянных параметрах жесткости материалов и их соединений, установлена хорошая сходимость (9–12%).

Наибольшую сходимость с экспериментальными значениями имеют результаты расчетов по разработанной теории с учетом нелинейных свойств упругости шва и материалов.

**4. Метод расчета составных двутавровых металлодеревянных балок с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа и со швами сплачивания элементов на металлических зубьях с учетом податливости связей между ними по 1 и 2 группам предельных состояний.**

В результате выполненных исследований сформулированы основные требования к методу расчета составных двутавровых металлодеревянных балок с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа и со швами сплачивания элементов на металлических зубьях по 1 и 2 группам предельных состояний, наиболее полно учитывающему специфику их конструктивных решений.

Критерии наступления предельных состояний 1 группы (расчетные значения нагрузок):

- потеря прочности нижнего (растянутого) пояса по нормальным напряжениям;
- потеря прочности верхнего (сжатого) пояса по нормальным напряжениям;
- потеря устойчивости из плоскости изгиба верхнего (сжатого) пояса;
- потеря прочности стенки на срез (по касательным напряжениям);
- потеря местной устойчивости стенки;
- потеря прочности нижнего пояса в приопорных зонах от смятия поперек волокон перпендикулярно плоскости слоев шпона (по пласти).

Критерий наступления предельного состояния 2 группы (нормативные значения нагрузок):

- превышение максимального допустимого прогиба по СП 20.13330.2017 – в зависимости от пролета, особенностей конструкции (например, наличия или отсутствия перегородок), наличия подвесных кранов, тельферов и других функциональных и конструктивных особенностей – по эстетико-психологическим, конструктивным, физиологическим и технологическим требованиям.

На основе анализа, выполненного в соответствии с предложенной теорией расчета составных двутавровых металлодеревянных балок перекрытия с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа и со швами сплачивания элементов на металлических зубьях с учетом податливости связей, разработан усовершенствованный метод расчета (рисунок 11).

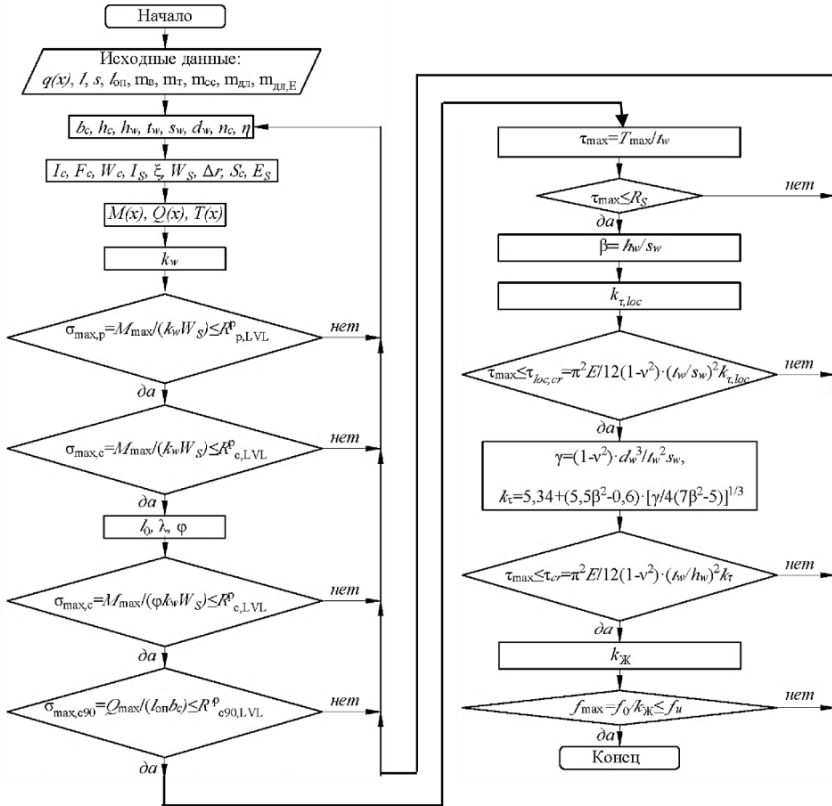


Рисунок 11 – Алгоритм усовершенствованного метода расчета двутавровых составных балок с гофрированной стенкой из стали и поясами из однонаправленного клееного шпона

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные итоги выполненного экспериментально-теоретического исследования составных двутавровых металлодеревянных балок перекрытия с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа и со швами сплачивания элементов на металлических зубьях с учетом упругой податливости связей:

1. Произведен критический анализ состояния вопроса по теории и практике применения составных конструкций, комбинированных из материалов на основе древесины и стали на основе 226 источников; в результате анализа обнаружено отсутствие рекомендаций по определению внутренних усилий,

возникающих в конструкции рассматриваемых металлодеревянных балок с гофрированной стенкой с учетом податливости связей между ее элементами, отсутствие непосредственного учета критериев прочности применяемых материалов, отсутствие возможностей для учета нелинейности деформирования;

2. Разработана расчетная модель составной балки двутаврового сечения, комбинированной из гофрированной стали (стенка) и однонаправленного клееного шпона (пояса), как трехветвевое составного стержня с упруго-податливыми связями, которая может быть применена для составных металлодеревянных балок иной конструкции;

3. Разработана методика лабораторного определения коэффициента жесткости  $\eta$  в зависимости от прилагаемого усилия для швов сплачивания элементов составной металлодеревянной балки на основе экспериментального исследования;

4. Разработана методика и проведено экспериментальное исследование несущей способности и деформативности изгибаемых составных двутавровых металлодеревянных балок при действии кратковременной нагрузки; определены режимы разрушения конструкции, определен коэффициент безопасности при эксплуатационной нагрузке  $K_{б(нп)}=1,834$ ;

5. Создана конечно-элементная модель составной двутавровой металлодеревянной балки с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа и со швами сплачивания элементов на металлических зубьях с учетом податливости связей между ними для исследования влияния параметров на НДС элементов, обеспечивающая определение деформаций с невысоким расхождением: 7–32% в неупругой зоне с экспериментальными значениями;

6. Установлена зависимость условного модуля упругости  $E_{eb}$  металлодеревянной балки с поясами из LVL и стенкой из гофрированной стали от уровня нагрузки, учитывающего пластические деформации системы:

$$E_{eb} = 836,84 P^{-2,101},$$

определена зависимость модуля упругости фиктивной цельной балки аналогичного сечения  $E_S$  от ее параметров и уровня нагрузки:

$$E_S = 30,886e^{-0,099P};$$

7. Предложен алгоритм усовершенствованного метода расчета составных двутавровых металлодеревянных балок с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL), стенкой из стального профилированного листа и со швами сплачивания элементов на металлических зубьях по 1 и 2 группам предельных состояний с учетом податливости связей между их элементами.

**Дальнейшая разработка темы** предусматривает: рассмотрение более широкого круга расчетных схем составных двутавровых металлодеревянных

балок с поясами из однонаправленного клееного шпона (LVL) и стенкой из стального профилированного листа, в т.ч. находящихся в условиях сложного напряженного состояния; определение рациональных областей применения для балок с двойной стенкой из стального профилированного листа.

## СПИСОК РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в журналах, включённых в перечень ВАК

1. Коваль, П. С., Черных, А. Г., Данилов, Е. В., **Клеван, В. И.**, Белов, В. В. О работе составных двутавровых балок со стенкой из профилированного стального листа и поясами из однонаправленного клееного шпона / П. С. Коваль, А. Г. Черных, Е. В. Данилов, В. И. Клеван, В. В. Белов // Вестник гражданских инженеров, СПбГАСУ. – СПб, 2022. – №6 (95). – С. 5–9.

2. **Клеван В.И.** Расчет составных изгибаемых деревянных элементов с учетом нелинейной работы / В.И. Клеван // Инженерный вестник Дона. – 2023. – №9. – URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n9y2023/8695>

3. **Клеван В.И.** Проблемы ограниченного применения металлодеревянных конструкций / А.Г. Черных, С.Г. Головина, В.И. Клеван // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 6 (83). – С. 83–89.

4. **Клеван В.И.** Экспериментальное исследование деформативности и несущей способности составных двутавровых балок со стенкой из профилированного стального листа и поясами из LVL // Вестник гражданских инженеров. – 2023. – № 4 (99). – С. 17–23.

### Статьи в других печатных изданиях

5. Черных А. Г., Рыбнов Е. И. и др. Исследование работы металлических и деревянных конструкций и оценка срока их службы с учетом условий эксплуатации / А. Г. Черных, Е. И. Рыбнов, Н. А. Сенькин, А. Б. Шмидт, В. Е. Гордиенко, И. В. Астахов, В. В. Михаськин, Е. В. Данилов, П. С. Коваль, Д. И. Корольков, Т. Н. Казакевич, **В. И. Клеван**, Д. В. Нижегородцев, М. Б. Москалев, К. Ф. Чан, Ш. М. Мамедов // Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – СПб: СПбГАСУ. – 2022. – 354 с.

6. **Клеван В.И.** Экспериментальные исследования металлодеревянных балок двутаврового сечения со стальной гофрированной стенкой / А.Г. Черных, В.И. Клеван, А.В. Игнатович, М.М. Мухаммедов, // Инновации в деревянном строительстве. Материалы 11-й Международной научно-практической конференции. – СПб: СПбГАСУ, 2021. – С. 26–37.

---

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 29.03.2024. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 40.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А