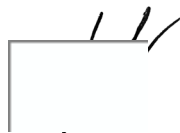


На правах рукописи



Коваль Павел Сергеевич

**НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ
И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО
НАПРЯЖЕННЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ
ДЕРЕВОПЛИТ ПРИ ИЗГИБЕ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции,
здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
ЧЕРНЫХ Александр Григорьевич.

Официальные оппоненты: **ЖАДАНОВ Виктор Иванович,**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Оренбургский государственный университет», кафе-
дра «Строительные конструкции», заведующий;
РОЩИНА Светлана Ивановна,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Владимирский государственный университет имени
А. Г. и Н. Г. Столетовых», кафедра «Строительные кон-
струкции», заведующий;

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
(г. Красноярск).

Защита состоится 03 июня 2021 года в 13:30 часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.03** 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 главного корпуса).

Факс: 8 (812) 316-58-72, Email: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/koval-pavel-sergeevich>.

Автореферат разослан «13» апреля 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета




Попов Владимир Мирович

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие строительной отрасли привело к возникновению потребности в конструкциях, сечения элементов которых превышают «природный» сортимент древесины. Существует два основных способа создания деревянных элементов больших сечений: склеивание и сплачивание пиломатериалов на механических связях, обладающих податливостью. Изменившаяся за последние десятилетия структура рынка строительной индустрии, а также более строгие технологические требования, предъявляемые к производству КДК по сравнению с составными конструкциями из цельной древесины, приводят к постепенному увеличению доли последних в общем объеме, это относится и к конструкциям построечного изготовления. Применение современных типов составных многослойных деревоплит позволяет повысить несущую способность, жесткость, огнестойкость покрытий, перекрытий и настилов из древесины по сравнению с балочными. Создавать аналогичные конструкции на основе КДК нерационально, ввиду неизбежности возникновения в них усилий, растягивающих древесину поперек волокон. В составных же многослойных деревоплитах они воспринимаются поперечными связями. Одним из наиболее перспективных решений деревоплит можно считать предварительно напряженные многослойные деревоплиты (ПНД). Вместе с тем, в нормах проектирования отсутствуют методики проектирования составных ДК, работающих в плоскости, параллельной швам сплачивания, а также методики расчета деревянных плит, изгибающихся в двух направлениях, т.е. работающих по пространственной схеме. Это позволяет сделать вывод об актуальности темы исследования.

Степень разработанности проблемы. В развитие теории расчета составных деревянных стержней внесли вклад А. Р. Ржаницын, П. Ф. Плешков, В. Г. Писчиков, А. Б. Губенко, Г. В. Свенцицкий, В. М. Коченов, М. Е. Каган, А. В. Дятлов, В. С. Деревягин, В. В. Пинаджан, К. С. Завриев, Н. Ю. Кушелев, А. В. Турков и др. Значительная часть исследований составных панелей и плит относится к ребристым многослойным конструкциям с деревянным каркасом и обшивками из листовых материалов. Их разработками и изучением занимались П. А. Дмитриев, В. И. Жаданов, И. С. Инжутов, Р. Б. Орлович, Д. А. Украинченко, М. М. Жербин, А. Г. Черных, А. С. Черных, Б. В. Лабудин, Е. В. Попов и др. Комбинированные ребристые деревожеле-

зобетонные плиты пролетных строений автодорожных мостов предложены В. П. Стуковым и В. И. Кулишем. Основой для этих разработок послужили в первую очередь труды в области теории упругости изотропных и анизотропных пластин Н. И. Мусхелишвили, С. П. Тимошенко, С. Войновского-Кригера, С. Г. Лехницкого, С. А. Амбарцумяна и др.

Исследованием предварительно напряженных и управляемых конструкций из дерева занимались Ю. М. Иванов, П. А. Дмитриев, В. А. Грачев, В. И. Кулиш, В. Н. Головач, И. С. Инжутов, Б. В. Накашидзе, С. Б. Турковский, И. М. Линьков, И. Г. Яшин, Л. В. Панченко, А. Б. Шмидт, А. Ф. Рожков, С. В. Деордиев, М. Б. Москалев и др.

ПНД были созданы с целью повышения эксплуатационных качеств гвоздевых деревоплит путем поперечного обжатия. Впервые данная технология была применена в 1976 году при восстановлении аварийного моста через р. Геберт в провинции Онтарио (Канада) инженерами P. F. Csagoly и R. J. Taylor. ПНД исследовались М. А. Ritter, A. G. Dimakis, M. G. Oliva, R. L. Tuomi, M. Accorsi, E. Sarisley, E. A. Geske, L. Mason, W. J. McCutcheon, R. C. Moody, J. P. Wacker, H. Ganga Rao и др., а также упоминаются в ряде публикаций Р. Б. Орловичем, Е. Н. Серовым, П. А. Дмитриевым, В. А. Уткиным, П. Н. Кобзевым, А. Ф. Рожковым. Существует несколько отличных друг от друга инженерных методик расчета ПНД, в которых используются упрощенные расчетные схемы (балочные). При этом обобщенная теория изгиба составных предварительно напряженных многослойных деревоплит отсутствует, а балочные схемы не адекватны рассматриваемой конструкции ПНД, что выражается, в частности, в несоответствии расчетных прогибов фактическим.

Цель и задачи исследований

Целью диссертационной работы является определение напряженно-деформированного состояния предварительно напряженных многослойных деревоплит при изгибе и разработка методики их расчета по первой и второй группам предельных состояний.

Для достижения цели необходимо было решить следующие **задачи**:

- теоретически определить НДС предварительно напряженной многослойной деревоплиты при изгибе с учетом анизотропии материала, а также действия сжимающих сил в ее срединной плоскости;
- исследовать работу конструкции как составной плиты с учетом податливости связей;

- исследовать упругие свойства соединения, создаваемого за счет сил фрикционного взаимодействия элементов ДК;
- разработать модель ПНД для лабораторных исследований, а также методику определения изогнутой поверхности плиты опытным путем;
- экспериментально исследовать деформативность и несущую способность предварительно напряженных многослойных деревоплит;
- разработать методику расчета ПНД по предельным состояниям и практические рекомендации по их проектированию.

Объект исследования – изгибаемая предварительно напряженная многослойная деревоплита (ПНД).

Предмет исследования – напряженно-деформированное состояние предварительно напряженной многослойной деревоплиты при изгибе.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения в части п. 3 «Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований вновь возводимых, восстанавливаемых и усиливаемых строительных конструкций, наиболее полно учитывающих специфику воздействий на них, свойства материалов, специфику конструктивных решений и другие особенности».

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Установлены значения модулей упругости фрикционных связей при воздействиях вдоль и поперек волокон G_x и G_z .
2. Разработана оригинальная методика экспериментального исследования крупноформатных плоскостных объектов (ПНД) методом сплошного лазерного сканирования деформируемой поверхности. Получена математическая модель, описывающая изогнутую поверхность ПНД при изгибе.
3. Получены новые экспериментальные данные по несущей способности и характеру разрушения ПНД при изгибе. Подтверждено распределение усилий в поперечном сечении плиты как в изотропном теле.
4. Разработана методика расчета предварительно напряженных многослойных деревоплит по предельным состояниям при изгибе, учитывающая их характерные особенности, выявленные в ходе теоретических и экспериментальных исследований (анизотропия, характер НДС, составность конструкции).

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании расчетной модели для определения напряженно-деформированного состояния предварительно напряженных многослойных деревоплит при изгибе.

Практическая значимость работы заключается в:

- определении упругих свойств связей, создаваемых за счет сил фрикционного взаимодействия элементов ДК;
- разработке методики экспериментального исследования крупноформатных плоскостных объектов методом сплошного лазерного сканирования деформируемой поверхности;
- разработке методики расчета и рекомендаций по проектированию предварительно напряженных многослойных деревоплит по первой и второй группам предельных состояний.

Методология исследований основывается на применении научных методов познания, классических положений механики твердого деформируемого тела, а также теории расчета конструкций и сооружений с применением древесины, планирования экспериментов и математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Расчетная модель ПНД как трансверсально-изотропной пластинки, находящейся под совместным действием сил в срединной плоскости и в плоскости, перпендикулярной ей.
2. Результаты экспериментальных исследований упругих свойств связей, создаваемых за счет сил фрикционного взаимодействия элементов ДК.
3. Математическая модель деформирования ПНД под действием сосредоточенной силы, полученная при помощи оригинальной методики лазерного сканирования.
4. Результаты экспериментальных исследований несущей способности ПНД при изгибе сосредоточенной силой, приложенной в центре плиты.
5. Методика расчета ПНД по первой и второй группам предельных состояний.

Степень достоверности результатов обеспечивается применением общепринятых понятий, гипотез и допущений механики твердого деформируемого тела, современных подходов в анализе напряженно-деформированного состояния конструкций из дерева, использованием поверенного аттестованного измерительного оборудования; подтверждена удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований изгибаемых предварительно напряженных многослойных деревоплит при кратковременном нагружении.

Апробация работы. Основные выводы и результаты диссертационного исследования представлялись на следующих всероссийских и международных научных симпозиумах, конференциях и конгрессах:

- IV Международный съезд-конгресс Ассоциации деревянного домостроения, СПб, СПбГАСУ, 2011;

- 65-я Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов «Актуальные проблемы строительства и архитектуры», СПб, СПбГАСУ, 2012;

- II Международный конгресс молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства», СПб, СПбГАСУ, 2013;

- Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы переработки древесины», СПб, СПбГЛТУ, 2013;

- XLII научная и научно-практическая конференция НИУ ИТМО, СПб, 2013;

- XVII Международный симпозиум «Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмасс», Украина, Одесса, ОГАСУ, 2013;

- IV Международный конгресс молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства», СПб, СПбГАСУ, 2014;

- IX Международная научно-практическая конференция «Инновации в деревянном строительстве», СПб, СПбГАСУ, 2018;

- 75-я научная конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета «Архитектура – строительство – транспорт», СПб, СПбГАСУ, 2019;

- 73-я научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Актуальные проблемы современного строительства», СПб, СПбГАСУ, 2020.

Публикации. Материалы диссертационного исследования опубликованы в 12 печатных работах общим объемом 7,26 п.л., лично автором – 5,69 п. л., в т. ч. 7 работ опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ.

Внедрение результатов работы. Результаты исследований внедрены в практической области:

- при разработке рабочей документации в рамках реконструкции объекта капитального строительства «Здание Главного корпуса (восточная терраса) объекта строительства Пансионат в районе села Прасковеевка, г. Геленджик,

Краснодарский край» – соответствующий Акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы предоставлен в Приложении Б;

– в учебный процесс по дисциплине «Конструкции из дерева и пластмасс» (для обучающихся по направлению подготовки по специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений») – соответствующий Акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы предоставлен в Приложении В.

Структура и объем диссертационной работы. Работа включает в себя введение, четыре главы с выводами по каждой из них, заключение, список литературы и приложения. Объем работы – 208 страниц машинописного текста, включая 12 таблиц и 84 рисунка с приложениями (58 страниц машинописного текста, включая 45 таблиц). Список литературы содержит 240 наименования, в том числе 85 – на иностранных языках.

Во введении сформулирована и обоснована актуальность изучения и применения ПНД, раскрыта степень разработанности проблемы, поставлены цель и задачи исследования, указаны научная новизна, методология, а также теоретическая и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе «Анализ состояния вопроса и задачи исследований предварительно напряженных многослойных деревоплит» приведена общая характеристика составных деревянных элементов строительных конструкций на механических связях, обладающих податливостью, проведен анализ: литературных источников по развитию составных многослойных панелей и плит из древесины и древесных материалов; предпосылок и практики применения предварительно напряженных деревянных конструкций; влияния сил трения взаимного взаимодействия между элементами деревянных конструкций на их несущую способность; приведена история применения и исследований предварительно напряженных многослойных деревоплит, проанализированы основные существующие расчетные методики. Определены цель и задачи исследований.

Во второй главе «Определение напряженно-деформированного состояния предварительно напряженной многослойной деревоплиты при изгибе» Предложена и теоретически обоснована расчетная модель изгибаемой предварительно напряженной многослойной деревоплиты в виде трансверсально-изотропной тонкой пластинки с плоскостью трансверсальной изотропии, совпадающей с поперечным сечением плиты, шарнирно опертой по двум сто-

ронам и нагруженной силами в срединной плоскости и в плоскости, перпендикулярной ей, определено напряженно-деформированное состояние конструкции, как монолитной пластинки и как составной плиты на податливых связях.

В третьей главе «Экспериментальное исследование работы предварительно напряженной многослойной деревоплиты при изгибе» представлены модель ПНД; методика, результаты и анализ результатов экспериментальных исследований: несущей способности и деформативности фрикционных связей в деревянных конструкциях; несущей способности и деформативности ПНД при изгибе сосредоточенной силой; приведена разработанная методика экспериментального исследования крупноформатных плоскостных объектов методом сплошного лазерного сканирования деформируемой поверхности и результаты ее применения.

В четвертой главе «Разработка методики расчета предварительно напряженных многослойных деревоплит по предельным состояниям при изгибе» приведены критерии наступления предельных состояний по первой и второй группам, вычислены значения коэффициентов в уравнениях, описывающих изогнутую поверхность предварительно напряженной многослойной деревоплиты при изгибе для плит, изготовленных из пиломатериалов, отсортированных по классам прочности. Приведена методика и алгоритм расчета ПНД по первой и второй группам предельных состояний.

В заключении изложены основные выводы по результатам диссертационной работы, представлены рекомендации по проектированию предварительно напряженных многослойных деревоплит.

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

1. Расчетная модель ПНД как трансверсально-изотропной пластинки, находящейся под совместным действием сил в срединной плоскости и в плоскости, перпендикулярной ей.

В качестве расчетной модели ПНД рассмотрена прямоугольная тонкая транстропная пластинка, две противоположные стороны которой шарнирно оперты, а две другие – свободны (см. рисунок 1). Плоскости трансверсальной изотропии совпадают с поперечными сечениями (плоскости, параллель-

ные YOZ). Ось X направлена вдоль волокон древесины. Пластика нагружена силами, действующими в ее срединной плоскости и по нормали к ней. Поперечные силы представлены двумя составляющими: равномерной (от собственного веса и т.п.) и неравномерной. Силы в срединной плоскости возникают вследствие обжатия плиты.

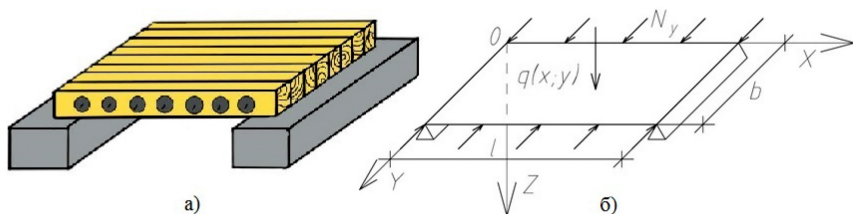


Рисунок 1. Схема ПНД: а) общий вид б) расчетная схема.

Приняты следующие допущения:

- прогибы малы по сравнению с толщиной плиты;
- работа происходит в упругой стадии;
- до разрушения плита работает как монолитная;
- справедлива гипотеза прямых нормалей;
- напряжения σ_z малы по сравнению с напряжениями σ_x , σ_y , τ_{xy} ;
- объемными силами пренебрегаем.

Дифференциальное уравнение изогнутой поверхности пластины имеет классический вид с добавлением сил, действующих в срединной плоскости:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + \frac{2D_3}{D_2} \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{D_1}{D_2} \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{N_y}{D_2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{q(x; y)}{D_2}. \quad (1)$$

Жесткости пластинки определяются выражениями:

$$D_1 = \frac{E_1 h^3}{12(1 - \nu_1 \nu_2)}, \quad D_2 = \frac{E_2 h^3}{12(1 - \nu_1 \nu_2)}, \quad (2)$$

$$D_k = \frac{Gh^3}{12}, \quad D_3 = D_1 \nu_2 + 2D_k.$$

Исследование НДС пластинки проводилось методом М. Леви. Решение бигармонического уравнения (1) найдено в виде:

$$w = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(y) \sin \frac{n\pi x}{l}. \quad (3)$$

Подстановка выражения (3) и его производных в (1), а также разложение правой части уравнения в ряд Фурье, дает неоднородное дифференциальное уравнение изогнутой поверхности пластины:

$$f_n^{IV}(y) + \left[\frac{N_y}{D_2} - \frac{2D_3}{D_2} \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 \right] f_n''(y) + \frac{D_1}{D_2} \left(\frac{n\pi}{l} \right)^4 f_n(y) = F_n(y). \quad (4)$$

Общее решение уравнения (4) представляется в виде суммы общего решения соответствующего однородного уравнения и частного решения неоднородного уравнения:

$$f_n(y) = f_n^o(y) + \bar{f}_n(y). \quad (5)$$

Предварительно напряженные многослойные древесноплиты изготавливаются из пиломатериалов, отсортированных по классам прочности по ГОСТ 33080-2014. Значения жесткостей пластинок единичной толщины вычислены по выражениям (2) с учетом их механических свойств, определенных в нормах. Для пиломатериалов всех классов прочности соотношения величин жесткостей одинаковы (разница в пределах 3%). Таким образом, получено, что общее решение однородного уравнения определяется выражением:

$$f_n^o(y) = e^{\alpha_n y} [A_n \cos \beta_n y + B_n \sin \beta_n y] + e^{-\alpha_n y} [C_n \cos \beta_n y + D_n \sin \beta_n y], \quad (6)$$

где

$$\alpha_n = \sqrt{\frac{2 \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 \cdot [D_3 + \sqrt{D_1 D_2}] - N_y}{4D_2}}, \quad (7)$$

$$\beta_n = \sqrt{\frac{N_y - 2 \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 \cdot [D_3 - \sqrt{D_1 D_2}]}{4D_2}}.$$

Частное решение неоднородного уравнения (4) по методу Коши имеет вид:

$$\bar{f}_n(y) = \int_0^y \bar{f}_n^o(y-t) F_n(t) dt. \quad (8)$$

Внешние воздействия $q(x; y)$ представляют собой сумму равномерно и неравномерно распределенных по площади ПНД сил. Равномерная часть находится по выражению (9), а неравномерная может быть сведена к сумме сосредоточенных сил по выражению (10).

I. Равномерное распределение сил по всей площади пластины.

$$q_I(x; y) = \frac{4q_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi x}{l}. \quad (9)$$

II. Сосредоточенная сила.

$$q_{II}(x; y) = \frac{4P}{lb} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi x_P}{l} \sin \frac{m\pi y_P}{b} \sin \frac{n\pi x}{l} \sin \frac{m\pi y}{b}. \quad (10)$$

Для случая совместного действия постоянных нагрузок от собственного веса конструкции (равномерно распределенного по всей площади) и сосредоточенной силы, приложенной в геометрическом центре плиты, получено следующее частное решение неоднородного уравнения:

$$\begin{aligned} \bar{f}_n(y) = & \frac{4}{D_2 [\xi_4 \alpha_n - \xi_3 \beta_n]} \times \left(\frac{q_0 \operatorname{sh} \alpha_n y \cdot \sin \beta_n y}{\pi} + \right. \\ & \left. + \frac{P\pi}{lb^2 \left[\pi^4/b^4 + 2\xi_1 \pi^2/b^2 + (\alpha_n^2 + \beta_n^2)^2 \right]} \right) \times \\ & \times \left[\operatorname{ch} \alpha_n y \cdot \sin \beta_n y \cdot \left(\alpha_n \left[\pi^2/b^2 + \xi_1 \right] + \beta_n \xi_2 \right) + \right. \\ & \left. + \operatorname{sh} \alpha_n y \cdot \cos \beta_n y \cdot \left(\beta_n \left[\pi^2/b^2 + \xi_1 \right] - \alpha_n \xi_2 \right) \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Где коэффициенты $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ равны:

$$\left. \begin{aligned} \xi_1 &= \alpha_n^2 - \beta_n^2, \\ \xi_2 &= 2\alpha_n \beta_n, \\ \xi_3 &= \alpha_n^3 - 3\alpha_n \beta_n^2, \\ \xi_4 &= 3\alpha_n^2 \beta_n - \beta_n^3 \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Внутренние усилия определяются по известным формулам:

$$\begin{aligned} M_x &= -D_1 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu_2 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \quad M_y = -D_2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu_1 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right), \\ H_{xy} &= -2D_k \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}, \quad Q_x = -\frac{\partial}{\partial y} \left(D_1 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + D_3 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \\ Q_y &= -\frac{\partial}{\partial y} \left(D_3 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + D_2 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Напряжения определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{12M_x}{h^3} z, \quad \sigma_y = \frac{12M_y}{h^3} z, \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{12H_{xy}}{h^3} z, \\ \tau_{xz} &= \tau_{zx} = \frac{6Q_x}{h^3} \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right), \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = \frac{6Q_y}{h^3} \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right).\end{aligned}\quad (14)$$

При недостаточной жесткости связей сдвига ПНД расслаивается от действия неравномерных сил, т.е. наблюдается взаимное смещение элементов относительно друг друга (так называемый «клавишный эффект»). В случае действия сосредоточенной силы в поперечном сечении деревоплиты следует выделять три характерные части (рисунок 2).

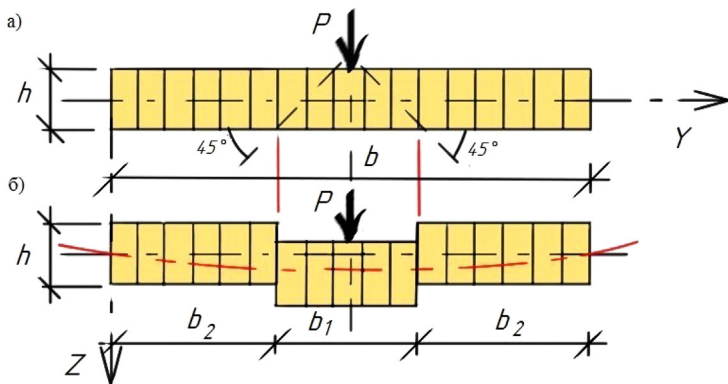


Рисунок 2. Поперечное сечение ПНД:

а) распределение силы между элементами б) расслоение плиты под нагрузкой.

Разработана теоретическая модель ПНД как составной плиты на податливых связях со смещениями, параллельными швам. Согласно предлагаемой теории:

– изгибающий момент в середине пролета плиты для смещающейся при расслоении части (нагруженной):

$$M_1 = E_1 I_1 \frac{4q\pi}{l^2} \cdot \frac{1 + G_z \frac{\pi^2 - 8}{\pi^2} \cdot \frac{l^4}{E_1 I_2 \pi^4}}{E_1 I_1 \frac{\pi^4}{l^4} + G_z \frac{\pi^2 - 8}{\pi^2} \cdot \frac{I_1 + I_2}{I_2}}, \quad (15)$$

– изгибающий момент в середине пролета для крайних частей (ненагруженных):

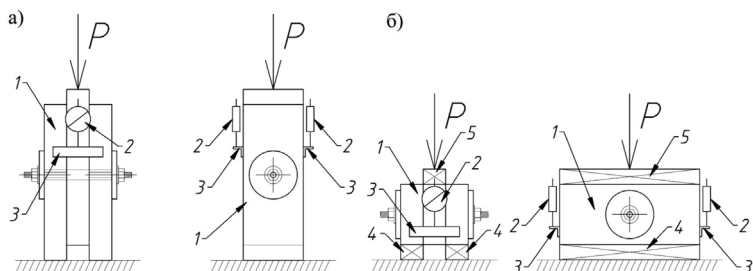
$$M_2 = E_1 I_2 \frac{4q\pi}{l^2} \cdot \frac{1 + G_z \frac{\pi^2 - 8}{\pi^2} \cdot \frac{l^4}{E_1 I_1 \pi^4}}{E_1 I_2 \frac{\pi^4}{l^4} + G_z \frac{\pi^2 - 8}{\pi^2} \cdot \frac{I_1 + I_2}{I_2}}. \quad (16)$$

Значение модуля упругости соединения G_z определяется экспериментально.

2. Результаты экспериментальных исследований упругих свойств связей, создаваемых за счет сил фрикционного взаимодействия элементов ДК.

Теоретическая модель ПНД как составной плиты на податливых связях со смещениями, параллельными швам, включает в себя экспериментально определяемую величину модуля (коэффициента) упругости соединения. Значение модуля упругости G определяется по линейному участку экспериментальной кривой зависимости «нагрузка-смещение». Так как коэффициенты трения древесины по древесине вдоль и поперек волокон различны, проведены два соответствующих эксперимента. Схемы испытаний приведены на рисунке 3.

Рисунок 3. Схемы испытания образцов: а) вдоль волокон б) поперек волокон;



1 – испытательный образец; 2 – индикатор перемещений;

3 – опорный столик индикатора; 4 – нижняя подкладка; 5 – верхняя накладка.

Диаметр винтовых стержней – 12 мм по резьбе (М12); класс прочности винтовых стержней – 8.8; диаметр распределительных траверс-шайб – 96 мм; материал центрального и крайних элементов – сосновые доски 2 сорта, сухие строганные.

Затяжка гаек осуществлялась при помощи динамометрического ключа. Зависимость между растягивающими усилиями в стержне и крутящим моментом, регистрируемым индикатором динамометрического ключа, предва-

рительно определена экспериментальным путем и имеет линейный характер. Исследование проводилось при различных усилиях натяжения винтовых стержней (по 3 образца вдоль и поперек волокон для каждого уровня затяжки): 7650 Н, 15300 Н, 22950 Н (35 Нм, 70 Нм, 105 Нм соответственно).

Нагружение производилось поэтапно со ступенью 2000 Н до разрушения с выдержкой на каждой ступени. Общий вид испытаний в лаборатории приведен на рисунке 4.

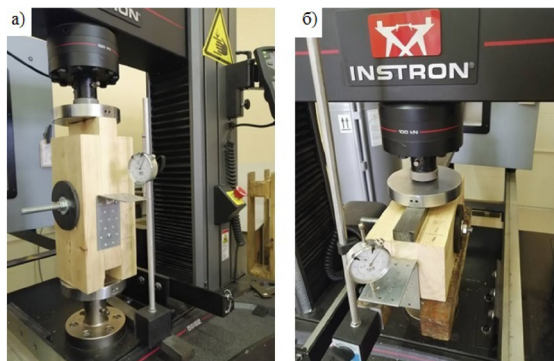


Рисунок 4. Лабораторные испытания образцов:
а) вдоль волокон б) поперек волокон.

Экспериментально полученная зависимость смещений нагружаемой средней части образца относительно неподвижных крайних частей от нагрузки представлена на рисунке 5.

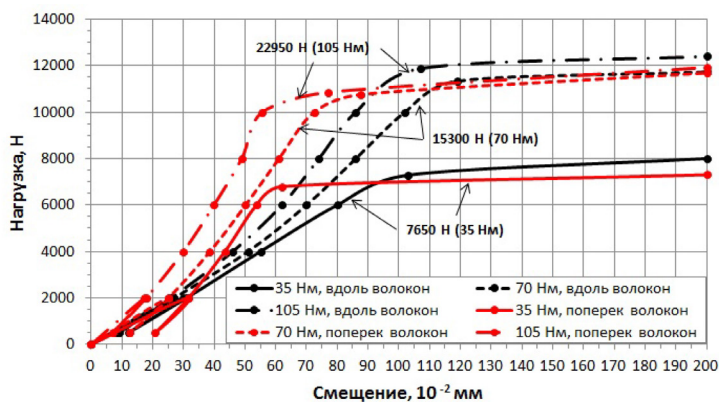


Рисунок 5. Зависимость смещений средней части образца относительно крайних от нагрузки.

Разрушение образцов наступало с исчерпанием несущей способности сил трения, но без непосредственной деструкции деревянных элементов. При этом смещения нагружаемой средней части образца относительно неподвижных крайних частей линейно зависят от действующих нагрузок. Выявлено, что жесткость соединений, нагруженных поперек волокон, на 40–55% выше, чем вдоль волокон. В то же время их несущая способность ниже на 7–18%. В результате эксперимента подтверждено, что деформативность и несущая способность соединения зависят от усилия прижима элементов друг к другу.

Исходя из полученных данных, определены модули упругости связей, возникающих за счет сил фрикционного взаимодействия элементов ДК (на единицу длины шва):

- при усилии растяжения стержней 7650 Н – модуль упругости соединения вдоль волокон $G_{x,1}=75,0$ Н/мм², поперек волокон – $G_{z,1}=111,6$ Н/мм²;
- при усилии растяжения стержней 15300 Н – модуль упругости соединения вдоль волокон $G_{x,2}=98,0$ Н/мм², поперек волокон – $G_{z,2}=138,1$ Н/мм²;
- при усилии растяжения стержней 22950 Н – модуль упругости соединения вдоль волокон $G_{x,3}=116,3$ Н/мм², поперек волокон – $G_{z,3}=179,8$ Н/мм².

3. Математическая модель деформирования ПНД под действием сосредоточенной силы, полученная при помощи оригинальной методики лазерного сканирования.

Существующие методики расчета ПНД не учитывают реальной расчетной схемы конструкции, заменяя плиту балкой фиктивной ширины. При этом наблюдаются весьма значительные отклонения расчетных прогибов конструкции от экспериментальных, в отдельных случаях – в сторону занижения значений. Однако для определения НДС пластин и плит необходимо выполнять построение их изогнутой поверхности. С целью установления применимости разработанной расчетной модели ПНД как трансверсально-изотропной пластинки, находящейся под совместным действием сил в срединной плоскости и в плоскости, перпендикулярной ей, произведено экспериментальное исследование деформативности деревоплит с различными конструктивными параметрами.

Для уменьшения трудозатрат при измерении прогибов ПНД была разработана методика экспериментального определения вертикальных деформаций крупноформатных плоскостных объектов (ПНД) методом сплошного

лазерного сканирования изгибаемой поверхности. Особенности разработанной методики являются:

- отсутствие ограничений по количеству точек, в которых будут определяться вертикальные деформации;
- шаг точечной сетки сканирования поддается регулированию;
- возможность проведения эксперимента до разрушения образца;
- точность измерений сканером – до 10^{-5} м;
- результаты эксперимента включают в себя фотофиксацию испытательных образцов на каждой ступени нагружения, совмещенную с облаками точек с зафиксированными координатами.

Алгоритм определения деформаций приведен на рисунке 6.

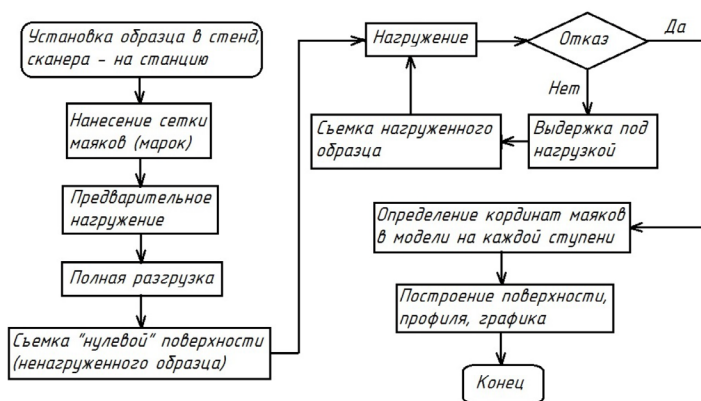


Рисунок 6. Алгоритм экспериментального определения вертикальных деформаций методом сплошного лазерного сканирования.

Экспериментальное исследование деформативности ПНД производилось в форме многофакторного эксперимента. Испытания проводились по плану Бокса В3. В качестве переменных факторов были выбраны: ширина плиты (945 мм, 1395 мм, 1845 мм); шаг винтовых стержней (250 мм, 500 мм, 750 мм); усилие растяжения стержней (7650 Н, 15300 Н, 22950 Н). Плиты изготавливались из сухих строганных сосновых досок 2 сорта. Пролет и толщина ПНД во всех случаях составляли 2760 мм и 120 мм соответственно. В качестве выходного параметра был принят прогиб центральной точки плиты.

Испытания проводились по схеме статического изгиба, плиты шарнирно опирались по двум противоположным сторонам, нагрузка прикладывалась сосредоточенно в центре плиты. Определение деформаций системы на

каждой ступени нагружения производилось путем сплошного лазерного сканирования верхней плоскости плиты (сканер Z+F IMAGER 5010C), контрольно – при помощи двух прогибомеров 6-ПАО (системы Аистова). Общий вид испытательной установки представлен на рисунке 7.

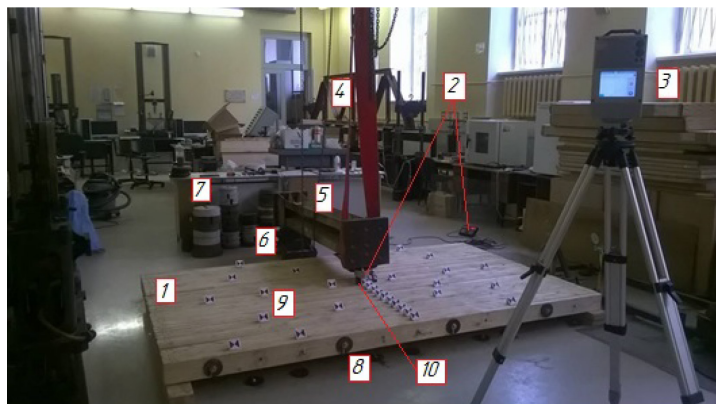


Рисунок 7. Лабораторные испытания: 1 – предварительно напряженная многослойная древесная плита; 2 – динамометр; 3 – лазерный сканер; 4 – подъемное устройство; 5 – нагружающая траверса; 6 – регулируемая опора; 7 – грузы; 8 – траверсы-шайбы, передающие нагрузку от растянутых стержней; 9 – маяки; 10 – стальной брус.

В результате обработки полученных данных построены поверхности ПНД в деформированном состоянии (рисунок 8).

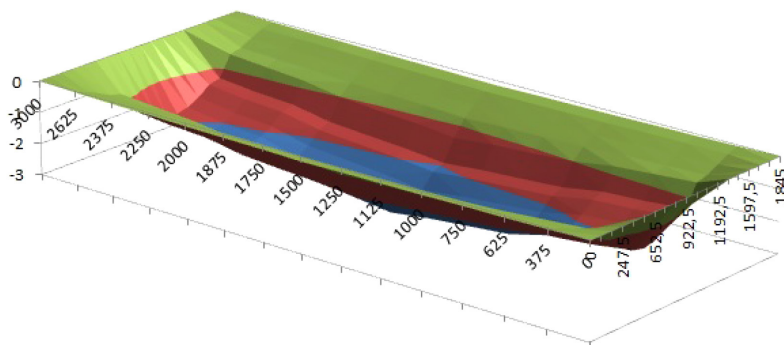


Рисунок 8. Изогнутая поверхность ПНД по результатам испытаний (ширина 1845 мм, шаг стержней 250 мм, усилие растяжения 22,95 кН).

В результате обработки результатов эксперимента получена математическая модель изгиба ПНД в виде регрессионного уравнения (17) с ограничениями (18):

$$w = 2,79375 + 0,1x_1 + 0,22x_2 - 0,17x_3 + 0,45625x_1^2 - 0,14375x_2^2 - 0,0875x_1x_2 - 0,0625x_2x_3. \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} 945 \text{ мм} &\leq x_1 \leq 1845 \text{ мм}, \\ 250 \text{ мм} &\leq x_2 \leq 750 \text{ мм}, \\ 7650 \text{ Н} &\leq x_3 \leq 22950 \text{ Н} \end{aligned} \right\}. \quad (18)$$

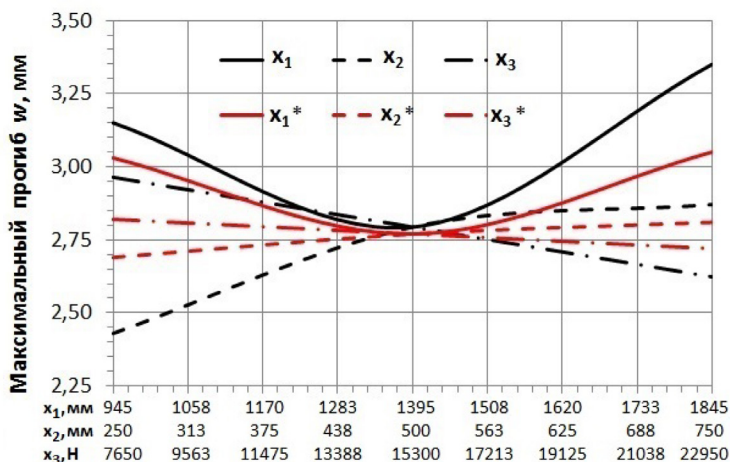


Рисунок 9. Зависимости $w(x_i)$, $w(x_i^*)$ прогибов от переменных факторов. Факторы: x_1, x_2, x_3 — по математической модели (17)–(18); x_1^*, x_2^*, x_3^* — по расчетной модели

На основании проведенного анализа результатов эксперимента, графических зависимостей (рисунок 9) установлено, что деформативные свойства ПНД зависят от сочетания ее конструктивных параметров: ширины плиты, шага напрягаемых стержней и усилия их предварительного напряжения. Выявлено, что наиболее значимым из рассмотренных переменных факторов является ширина ПНД — при увеличении её прогибы конструкции возрастают нелинейно, причем, при уменьшении этого параметра прогибы также возрастают, что, вероятно, можно объяснить снижением момента инерции сечения. Шаг постановки предварительно напрягаемых стержней оказывает наибольшее влияние на прогиб при минимальных значениях, а при увеличении расстояния между стержнями данное влияние значительно снижается, характер

кривой также нелинейный. Усилия растяжения в стержнях оказывают существенное влияние на жесткость ПНД, причем, при увеличении их прогиб конструкции линейно снижается. По значениям, соответствующим переменным факторам x_1, x_2, x_3 в натуральном виде согласно выражению (18), вычислены прогибы ПНД по расчетной модели. Выявлена достаточно хорошая сходимость (расхождение от 1,9 до 15,3%) расчетных прогибов ПНД по математической модели, полученной по экспериментальным данным, со значениями прогибов по расчетной модели трансверсально-изотропной пластинки, находящейся под совместным действием сил в срединной плоскости и в плоскости, перпендикулярной ей. Подтверждена теоретически обоснованная работа деревоплиты на изгиб в двух направлениях (продольном и поперечном).

4. Результаты экспериментальных исследований несущей способности ПНД при изгибе сосредоточенной силой, приложенной в центре плиты.

С целью выявления характера работы ПНД при разрушении было проведено экспериментальное исследование их несущей способности при изгибе. Лабораторным испытаниям подвергнуты плиты пролетом 2760 мм, шириной 945 мм, толщиной 120 мм, шаг предварительно напрягаемых стержней – 250 мм, усилие натяжения – 22950 Н. Испытание проводилось в универсальной гидравлической испытательной машине BISS 2500 kN. Прогибы измерялись при помощи электронного многоканального измерительного комплекса (тензометрической станции) TDS-530 (производитель TOKIO SOKKI KENKYUJO) с применением 4 электронных индикаторов перемещений. Прогибы в центральной точке плиты измерялись по перемещению штока испытательной машины. Нагрузка прикладывалась ступенями по 4,0 кН с выдержкой на каждой ступени. Общий вид испытательной установки представлен на рисунке 10, фотофиксация разрушения – на рисунке 11.

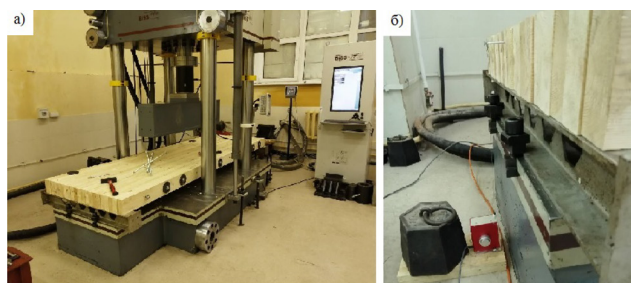


Рисунок 10. Испытательная установка:

а) общий вид б) струнный электронный индикатор перемещений (на опоре).

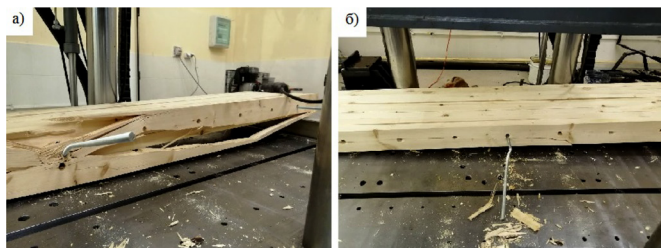


Рисунок 11. Разрушение образца: а) трещина в центральном элементе (нагруженном) б) трещина в элементе на границе сдвигаемой части сечения.

Несущая способность плиты составила 49,0 кН, максимальный прогиб – 32,0 мм (см. рисунок 12). Разрушение происходило скачкообразно со «срывами» фрикционных связей. Характер работы в упругой стадии – нелинейный (при нагрузке более 24 кН заметны отклонения от пунктирной линии на графике). На графике синим цветом изображена линия, показывающая средние прогибы крайних точек центрального сечения плиты, значение которых меньше максимального прогиба до 2,2 раза. Это подтверждает пространственный характер работы ПНД.

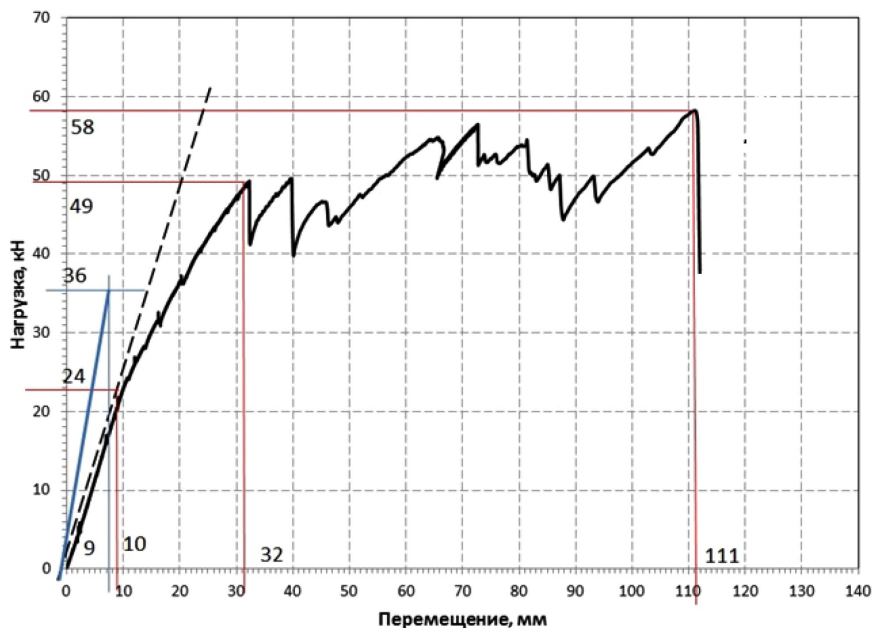


Рисунок 12. Зависимость прогибов центра плиты от нагрузки.

Расслоение плиты (так называемый «клавишный эффект») происходит вследствие истощения несущей способности соединений, создаваемых силами трения на поверхностях элементов, из которых состоит конструкция. Центральная часть плиты смещается относительно крайних, причем ширина смещающейся части соответствует части сечения, попадающей в сектор 90° от линии действия силы. Таким образом, экспериментально подтверждено, что распределение действующих сил между элементами плиты по ширине происходит как для трансверсально-изотропного тела. При дальнейшем нагружении в элементах центральной части сечения ПНД происходит хрупкое разрушение.

5. Методика расчета ПНД по первой и второй группам предельных состояний.

В результате теоретических и экспериментальных исследований ПНД была разработана методика расчета по первой и второй группам предельных состояний. Выделены основные критерии наступления предельного состояния ПНД при изгибе. По первой группе – превышение:

– нормальными напряжениями в продольном направлении расчетного сопротивления изгибу вдоль волокон

$$\sigma_x \leq R_{\text{и}}^p; \quad (19)$$

– нормальными напряжениями в поперечном направлении расчетного сопротивления сжатию поперек волокон

$$\sigma_y \leq R_{\text{с},90}^p; \quad (20)$$

– суммарными касательными напряжениями в продольном направлении от действия поперечной силы и крутящего момента расчетного сопротивления скалыванию вдоль волокон

$$\tau_{xy} + \tau_{xz} \leq R_{\text{ск}}^p; \quad (21)$$

– суммарными касательными напряжениями в поперечном направлении от действия поперечной силы и крутящего момента расчетного сопротивления скалыванию поперек волокон

$$\tau_{yx} + \tau_{yz} \leq R_{\text{ск},90}^p; \quad (22)$$

– напряжениями от смятия древесины под траверсами-шайбами расчетного сопротивления местному смятию поперек волокон

$$\sigma_{\text{т.-ш.}} \leq R_{\text{см}90}^p; \quad (23)$$

– касательными напряжениями (вертикальными) от действия поперечной силы несущей способности фрикционного соединения сдвигу

$$\tau_{zy} \leq R_{\text{тр}}^p; \quad (24)$$

– нормальными напряжениями в поперечном направлении в растянутой зоне нормальных напряжений от обжатия ПНД

$$\sigma_y \leq \sigma_{N,y}. \quad (25)$$

По второй группе – превышение максимальных допустимых прогибов плиты

$$f_{\text{max}} \leq f_u. \quad (26)$$

Напряжения в формулах (19)-(25) определяются согласно (1)-(12). Порядок проектирования ПНД, согласно разработанной методики:

1. Компоновка конструкции, определение пролета и ширины плиты, конструктивного решения опорного узла и узла обжатия.
2. Определение шага предварительно напрягаемых стержней и усилия их натяжения; расчет необходимой площади траверс-шайб или рандбалок, исходя из условия местного смятия древесины поперек волокон.
3. Определение нагрузок и воздействий, а также расчетных моделей распределения сил, действующих на ПНД.
4. Определение прогибов плиты, как монолитной конструкции, проверка по второй группе предельных состояний.
5. Вычисление напряжений и внутренних усилий в ПНД, как в монолитной плите; проверка несущей способности плиты по нормальным и касательным напряжениям по первой группе предельных состояний.
6. Проверка обеспечения целостности ПНД по несущей способности сил фрикционного взаимодействия по второй группе предельных состояний.
7. Проверка смятия на опорах по первой группе предельных состояний.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя результаты проведенных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Предложена и теоретически обоснована расчетная модель ПНД как трансверсально-изотропной пластинки, находящейся под совместным действием сил в ее срединной плоскости и в плоскости, перпендикулярной ей.

Разработана модель ПНД как составной пластины на податливых связях со смещениями, параллельными швам.

2. Уточнен характер работы фрикционных связей в ДК, возникающих на боковых поверхностях соединяемых элементов при направлении сдвигающих усилий вдоль и поперек волокон. Выявлено, что в работе соединения можно выделить упругую стадию и условно пластическую; однако, фактически соединение разрушается хрупко.

3. Определены модули упругости фрикционных связей при воздействиях вдоль и поперек волокон G_x и G_z . Установлено, что в направлении поперек волокон жесткость узла значительно выше, чем вдоль волокон (40–55%).

4. Экспериментально подтверждено, что ПНД в упругой стадии проявляет свойства «монолитной» конструкции, в которой нет смещения отдельных элементов относительно друг друга. Доказано, что изгиб плиты происходит в двух направлениях (продольном и поперечном).

5. Получена математическая модель в виде уравнения регрессии, описывающая изогнутую поверхность предварительно напряженной многослойной деревоплиты при изгибе. Выявлено, что деформативные свойства ПНД зависят от сочетания ее конструктивных параметров: ширины плиты, шага напрягаемых стержней и усилия их предварительного напряжения.

6. Экспериментально подтверждено, что распределение действующих сил между элементами плиты по ширине происходит как для изотропного (трансверсально-изотропного) тела. Выявлено, что при превышении несущей способности соединения элементов за счет сил трения, ПНД проявляет свойства составной конструкции на податливых связях.

7. Разработаны методика и алгоритм расчета предварительно напряженной многослойной деревоплиты по первой и второй группам предельных состояний.

Рекомендации к практическому применению:

Результаты, полученные в диссертационном исследовании, могут быть применены в инженерной практике при проектировании новых деревянных конструкций (предварительно напряженных многослойных деревоплит) в зданиях и сооружениях различного назначения в качестве покрытий, перекрытий и настилов, а также для усиления существующих конструкций.

Дальнейшая разработка темы предусматривает: расширение номенклатуры расчетных схем предварительно напряженных многослойных деревоплит,

в т. ч. с измененными условиями опирания; исследование вопроса регулирования напряжений в конструкции; исследование НДС ребристых предварительно напряженных многослойных деревоплит, в т.ч. с применением ребер из LVL.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии и приравненные к ним:

1. Черных, А. Г., Петров, А. Н., **Коваль, П. С.**, Данилов, Е. В. Экспериментальное исследование деформативности предварительно напряженных многослойных деревоплит методом сплошного лазерного сканирования / А. Г. Черных, А. Н. Петров, П. С. Коваль, Е. В. Данилов // Вестник гражданских инженеров, СПбГАСУ. – СПб, 2019. – №5 (76). – С. 97–104 (0,92 п.л. / 0,50 п.л.).

2. **Коваль, П. С.** Разработка методики расчета предварительно напряженных деревоплит / П. С. Коваль // Вестник гражданских инженеров, СПбГАСУ. – СПб, 2017. – № 5 (64). С. 47–52 (0,69 п.л.).

3. **Коваль, П. С.** Экспериментальное исследование работы предварительно напряженной деревоплиты на изгиб / П. С. Коваль // Вестник гражданских инженеров, СПбГАСУ. – СПб, 2017. – №4 (63). – С. 81–86 (0,69 п.л.).

4. **Коваль, П. С.** Сравнительный анализ современных методов расчета предварительно напряженных деревоплит / П. С. Коваль // Вестник гражданских инженеров, СПбГАСУ. – СПб, 2016. – №6 (59). – С. 97–101 (0,58 п.л.).

5. **Коваль, П. С.**, Глухих, В. Н. Распределение напряжений в пакете из тангенциальных досок как упругой ортотропной полуплоскости, нагруженной сосредоточенной силой на границе / П. С. Коваль, В. Н. Глухих // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, СПбГЛТА. – СПб, 2014. – № 208. – С. 90-102 (0,69 п.л. / 0,35 п.л.).

6. **Коваль, П. С.** Изгиб предварительно напряженной деревоплиты сосредоточенной нагрузкой / П. С. Коваль // Вестник гражданских инженеров, СПбГАСУ. – СПб, 2014. – № 6 (47). – С. 52–57 (0,69 п.л.).

7. Черных, А. Г., Черных, А. С., **Коваль, П. С.**, Григорьев, К. С. Прочность и жесткость стеновых панелей на деревянном каркасе [Электронный ресурс] / А. Г. Черных, А. С. Черных, П. С. Коваль, К. С. Григорьев // Современные

проблемы науки и образования. – 2012. – №3. URL: <https://science-education.ru/103-6527> (0,92 п.л. / 0,25 п.л.).

Статьи в других изданиях

8. **Коваль, П. С.** Экспериментально-теоретические исследования преднатянутых деревоплит / П. С. Коваль // В сборнике: «Инновации в деревянном строительстве. Материалы 9-й Международной научно-практической конференции», СПбГАСУ. – СПб, 2018. – С. 44–53 (1,04 п.л.).

9. **Коваль, П. С.** К вопросу определения напряженно-деформированного состояния составной деревоплиты на растянутых связях / П. С. Коваль // В сборнике: «Современные строительные конструкции из металла и древесины. Материалы XVII Международного симпозиума», ОГАСА. – Одесса, 2013. – С. 114–119 (0,29 п.л.).

10. Глухих, В. Н., **Коваль, П. С.** К вопросу о напряжениях в ортотропной плите при сжатии сосредоточенными силами / В. Н. Глухих, П. С. Коваль // В сборнике: «Современные проблемы переработки древесины: материалы XLII Международной научно-практической конференции», НИУ ИТМО. – СПб, 2013. – С. 147–151 (0,29 п.л. / 0,15 п.л.).

11. **Коваль, П. С.** Определение напряжений в ортотропной плите при сжатии сосредоточенными силами / П. С. Коваль // В сборнике: «Актуальные проблемы современного строительства. Материалы II Международного конгресса молодых ученых», СПбГАСУ. – СПб, 2013. – С. 98–101 (0,23 п.л.).

12. **Коваль, П. С.** Учет дополнительных факторов в расчете несущей способности нагельных соединений элементов из инженерной древесины / П. С. Коваль // В сборнике: «Актуальные проблемы строительства и архитектуры. Материалы 65-ой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов» Ч. 1, СПбГАСУ. – СПб, 2012. – С. 101–104 (0,23 п.л.).

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 29.03.2021. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 11.

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.