

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2024, Том 16, № 4 / 2024, Vol. 16, Iss. 4 <https://esj.today/issue-4-2024.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/19SAVN424.pdf>

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Коваль, П. С. Несущая способность и деформативность шпренгельных плит на основе перекрестно-клееных деревоплит / П. С. Коваль, Л. Д. Никандров, Ю. Цао, М. Руба, Д. Б. Козырев, Н. А. Шапурова // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 4. — URL: <https://esj.today/PDF/19SAVN424.pdf>

For citation:

Koval P.S., Nikandrov L.D., Cao Yu., Rouba M., Kozyrev D.B., Shapurova N.A. Bearing capacity and deformability of sprengel plates based on cross-laminated timber. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(4): 19SAVN424. Available at: <https://esj.today/PDF/19SAVN424.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 692.4

Коваль Павел Сергеевич

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
Санкт-Петербург, Россия
Доцент
Кандидат технических наук
E-mail: pkoval@lan.spbgasu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1911-5169>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=736713

Никандров Леонид Дмитриевич

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: lena.nickandrov@yandex.ru

Цао Юпэн

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: 1053539452@qq.com

Руба Мерием

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
Санкт-Петербург, Россия
Аспирант
E-mail: meryemrouba@yandex.ru

Козырев Даниил Борисович

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: D.kozyreff02@gmail.com

Шапурова Наталия Александровна

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: shapurovan@yandex.ru

**Несущая способность
и деформативность шпренгельных плит
на основе перекрестно-клееных деревоплит**

Аннотация. Пространственные конструкции значимы в современной архитектуре и строительстве, так как данный тип конструкций обладает высокой несущей способностью, что позволяет создавать нестандартные формы зданий и сооружений и перекрывать большие пролеты. Наиболее часто данные конструкции представлены блок-фермами и блок-секциями, структурными и шпренгельными плитами. В настоящее время продолжают исследования таких конструкций, появляются новые конструкторские решения, в том числе благодаря появлению новых материалов. Одним из таких материалов является перекрёстно-клееная древесина, которая может быть использована в качестве плитной части шпренгельной плиты. Для разработки стандартов проектирования и расчёта конструкций из перекрёстно-клееной древесины необходимо провести обширные научные исследования. Поэтому одной из важных задач является изучение пространственной работы перекрёстно-клееной древесины. В статье авторами проведены испытания плиты из перекрёстно-клееной древесины для определения её деформативности. Создана конечно-элементная расчётная модель такой плиты, а также проведен расчет плиты численным методом. Обе методики расчета верифицируются на основе результатов, полученных после проведенного натурного испытания. Авторы также создают две конечно-элементные расчётные модели шпренгельной плиты на основе перекрёстно-клееной древесины с отличающейся конструкцией шпренгельной системы. С помощью расчетной модели на основе метода конечных элементов определяется деформативность шпренгельных плит при различных вариантах приложения нагрузки. В конце авторами формулируются основные выводы по результатам проведенных исследований.

Ключевые слова: деформативность; расчетная модель; перекрёстно-клеёная древесина; плита; численное моделирование; пространственные конструкции; шпренгель

Введение

В строительной отрасли регулярно разрабатываются новые материалы. Один из них — перекрёстно-клееная древесина (ДПК, от англ. CLT — cross-laminated timber). Материал получил широкое распространение во многих странах Европы, а также странах Северной Америки — США и Канаде. Плиту ДПК можно применять как самостоятельную конструкцию, а можно и включить ее в совместную работу с другими дополнительными элементами и системами, такими как стержни и шпренгельная система. В странах Европы и Северной Америки существует множество объектов, в покрытии которых применяются плиты ДПК и шпренгельные плиты на основе ДПК [1]. В Китае в последние годы материал так же активно исследуется и адаптируется под отрасль страны [2]. В России аналогичная ситуация и материал находится на ранней стадии внедрения в сферу и требуются исследования, которые позволят расширить возможности применения материала, в том числе при проектировании пространственных конструкций [3].

Постановка задачи

Объект исследования представлен плитой из перекрёстно-клееной древесины и шпренгельной плитой на основе ДПК.

Предмет исследования в данном случае — деформативность плиты из перекрёстно-клееной древесины и шпренгельной плиты на основе ДПК.

Цели:

Создать верифицированную расчетную модель трехслойной плиты ДПК в программном комплексе и определить деформативность такой плиты методом конечных элементов в программном комплексе и численным методом.

Задачи:

1. Создать конечно-элементную расчётную модель на основе метода конечных элементов трехслойной плиты ДПК в программном комплексе и верифицировать ее путем сравнения значений деформаций модели с экспериментальными данными.
2. На основе верифицированной расчётной модели на основе метода конечных элементов вывести результат деформативности трехслойной плиты ДПК.
3. Рассчитать деформативность трехслойной плиты ДПК численным методом используя методику предложенную С.Г. Лехницким.
4. Создать расчётную модель на основе метода конечных элементов шпренгельной плиты на основе ДПК с затяжками и стойкой в ПК Лири САПР и шпренгельную плиту на основе ДПК с развитой решеткой.

Эксперимент

Для проведения эксперимента [4–6] использовались три трёхслойные панели ДПК размерами 2 000×900 мм.



Рисунок 1. Уложенная на опоры панель в испытательной машине (фото авторов)



Рисунок 2. Доведенная до разрушения панель (фото авторов)

Толщина каждого слоя данных панелей составляет 30 мм. Плиты опираются в данном исследовании свободно с закреплениями по четырём сторонам. Измерение прогибов плиты от действия нагрузки производилось в 5 точках — одна по центру, четыре по бокам. Прогиб центральной точки плиты измерялся электронной системой самой испытательной машины. В остальных точках прогибы измерялись при помощи прогибомеров. В результате испытаний авторами были получены зависимости прогибов от действующей нагрузки. В процессе испытаний авторами проводилась фотосъёмка, представленная на рисунках 1–2.

Моделирование на основе метода конечных элементов плиты ДПК

По окончанию эксперимента авторами было произведено моделирование на основе метода конечных элементов [7; 8] в программном комплексе Лира САПР, повторяющее эксперимент. Плиты ДПК моделировались 3-слойными, толщиной 90 мм, аналогичные тем, что использовались при проведении натурального эксперимента. Класс прочности древесины — С24. Каждый слой моделировался отдельно. Связь между слоями обеспечивалась путем объединения перемещений узлов конечных элементов. Закрепление плиты осуществлялось по контуру, как при натуральных испытаниях. Конечно-элементная расчётная модель трехслойной плиты ДПК представлена авторами на рисунке 3.

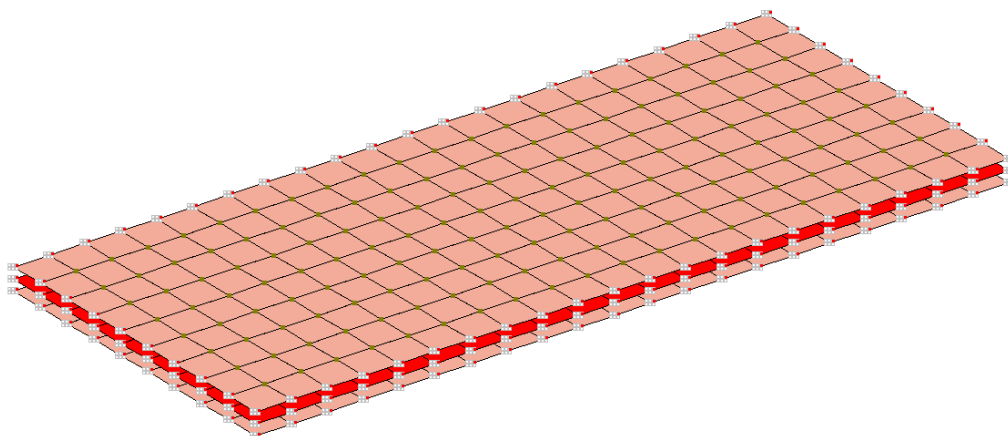


Рисунок 3. Конечно-элементная расчётная модель трехслойной плиты ДПК в ПК Лира САПР (получено авторами)

В центре плиты прикладывалась сосредоточенная нагрузка аналогичная ступеням нагружения при проведении эксперимента. Ступень и соответствующая ей нагрузка представлены в таблице 1.

Таблица 1

Ступени нагружения сосредоточенной нагрузкой

№ ступени	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нагрузка, кН	5	10	20	30	40	50	60	70	80

Составлено авторами

В результате были получены изополя прогибов плиты ДПК от действия сосредоточенной нагрузки в центре плиты, представленные на рисунке 4, и значения прогибов в центральной точке.

На основе полученных значений прогиба методом конечных элементов и экспериментальных данных авторами выполнен сравнительный анализ прогибов, представленный на рисунке 5.

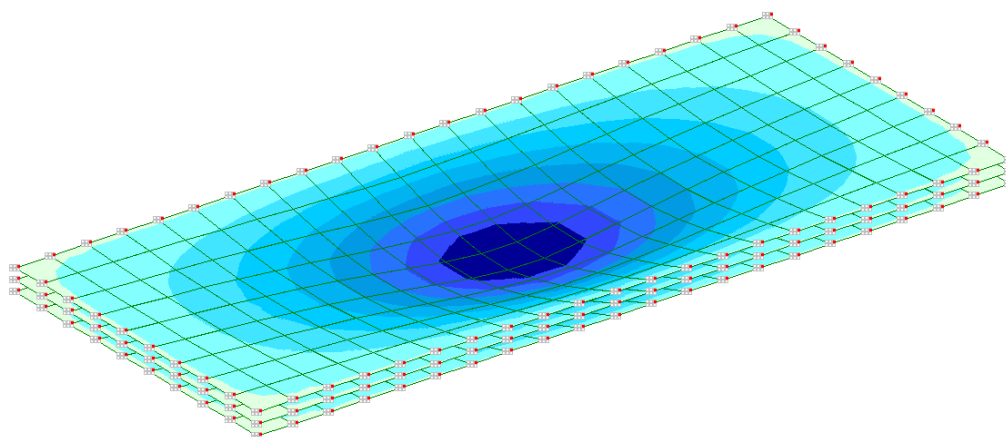


Рисунок 4. Изополя прогибов плиты ДПК от действия сосредоточенной нагрузки в центре плиты (получено авторами)

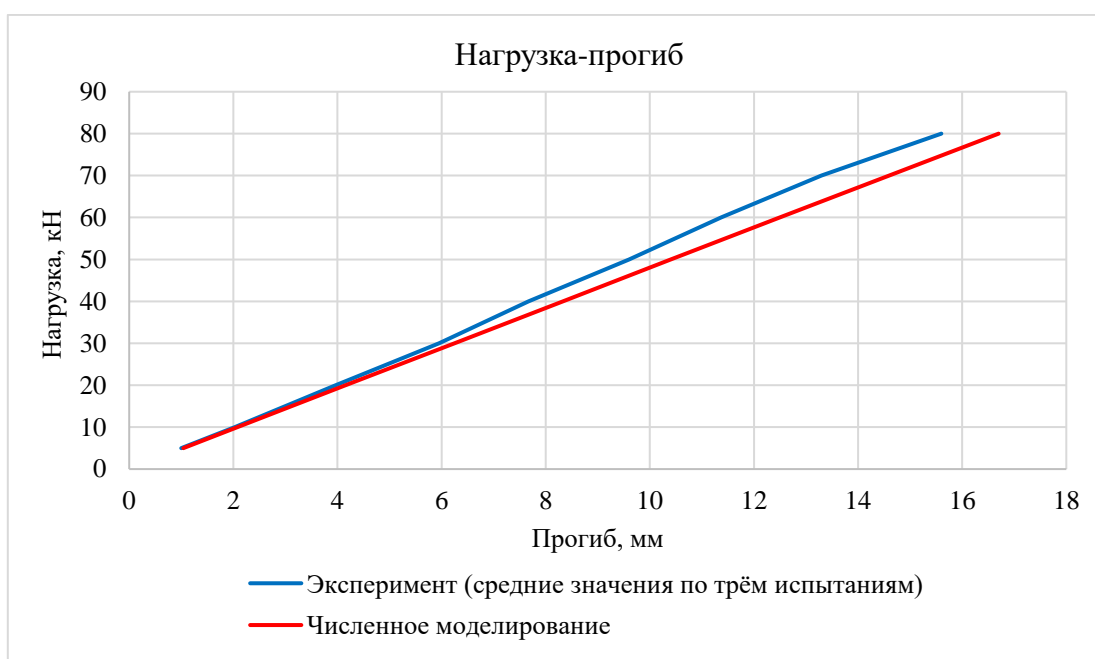


Рисунок 5. Сравнительный анализ прогибов эксперимента и численного моделирования (получено авторами)

Сравнительный анализ показал сходимость результатов прогибов на каждой ступени нагружения от 2,4 % до 9,04 %, что свидетельствует о хорошей сходимости результатов. Такие данные позволяют верифицировать расчетную модель и использовать ее для дальнейших исследований.

Расчет плиты ДПК численным методом

В качестве основного метода расчёта перекрытий, опирающихся на четыре стороны, авторами применяется теория изгиба тонких многослойных анизотропных пластин [9], так как панели CLT имеют слоистую структуру, где каждый слой является ортотропной пластиной.

Дифференциальное уравнение изогнутой срединной поверхности многослойной ортотропной пластины (уравнение Софи Жермен) под действием постоянной нагрузки имеет следующий вид:

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

где: $w = w(x, y)$ — прогиб пластины вдоль оси Z ; $q(x, y)$ — функция распределённой нагрузки, действующей по поверхности пластины, при постоянной нагрузке $q(x, y) = q$; D_1 — изгибная жёсткость пластинки в направлении оси X ; D_2 — изгибная жёсткость пластинки в направлении оси Y ; D_3 — главная жёсткость пластины; D_K — жёсткость кручения; ν_1 — коэффициент Пуассона, характеризующий сокращение пластины в направлении оси Y при растяжении в направлении оси X ; ν_2 — коэффициент Пуассона, характеризующий сокращение пластины в направлении оси X при растяжении в направлении оси Y ; E_1, E_2 — модули упругости в направлении осей X, Y ; G — модуль сдвига; h — толщина пластины.

Расчет прогиба 3-слойной плиты CLT толщиной 90 мм выполнен в программе Mathcad авторами с использованием уравнения Софи Жермен, а также формулами предложенными С.Г. Лехницким [10]. В результате был получен прогиб в центральной точке плиты под действием сосредоточенной нагрузки в центре плиты. Результаты расчета представлены авторами в таблице 2.

Таблица 2

Расчетные прогибы в центральной точке плиты

Нагрузка, кН	5	10	20	30	40	50	60	70	80
Прогиб, мм	1,01	2,021	4,041	6,062	8,083	10,01	12,12	14,14	16,17

Составлено авторами

На основе полученных значений прогиба численным методом и экспериментальных данных авторами выполнен сравнительный анализ прогибов, представленный на рисунке 6.

Сравнительный анализ показал сходимость результатов прогибов на каждой ступени нагружения от 0,99 % до 6,19 %, что свидетельствует хорошей сходимости результатов.

Общий сравнительный анализ экспериментальных прогибов, прогибов, полученных на основе расчета методом конечных элементов в программном комплексе и расчетных прогибов приведен авторами в графическом виде на рисунке 7.

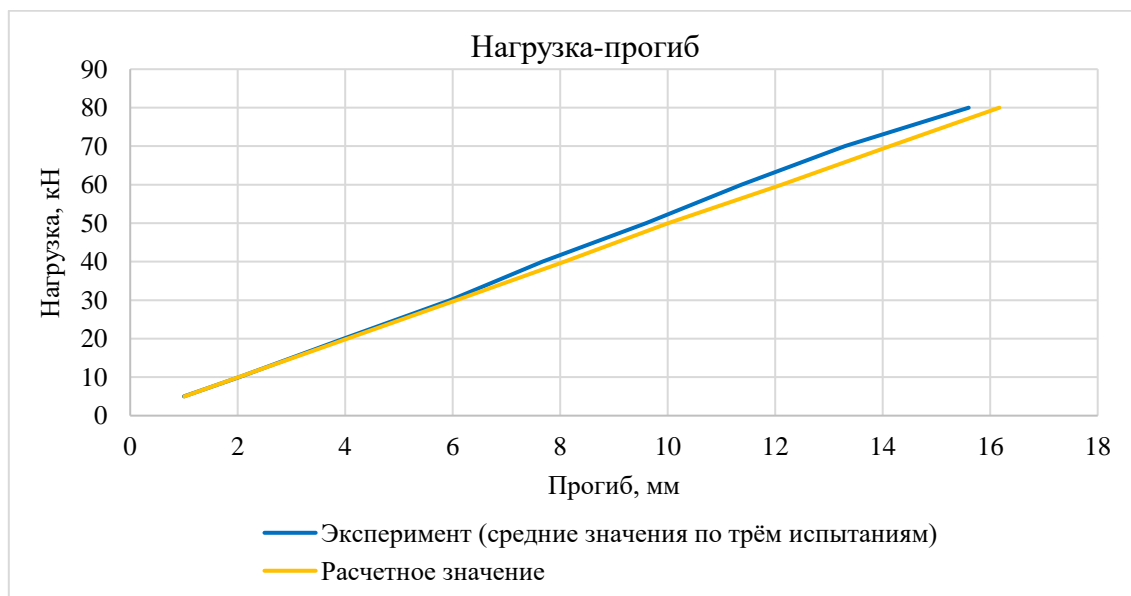


Рисунок 6. Сравнительный анализ экспериментальных прогибов и расчетных прогибов (получено авторами)

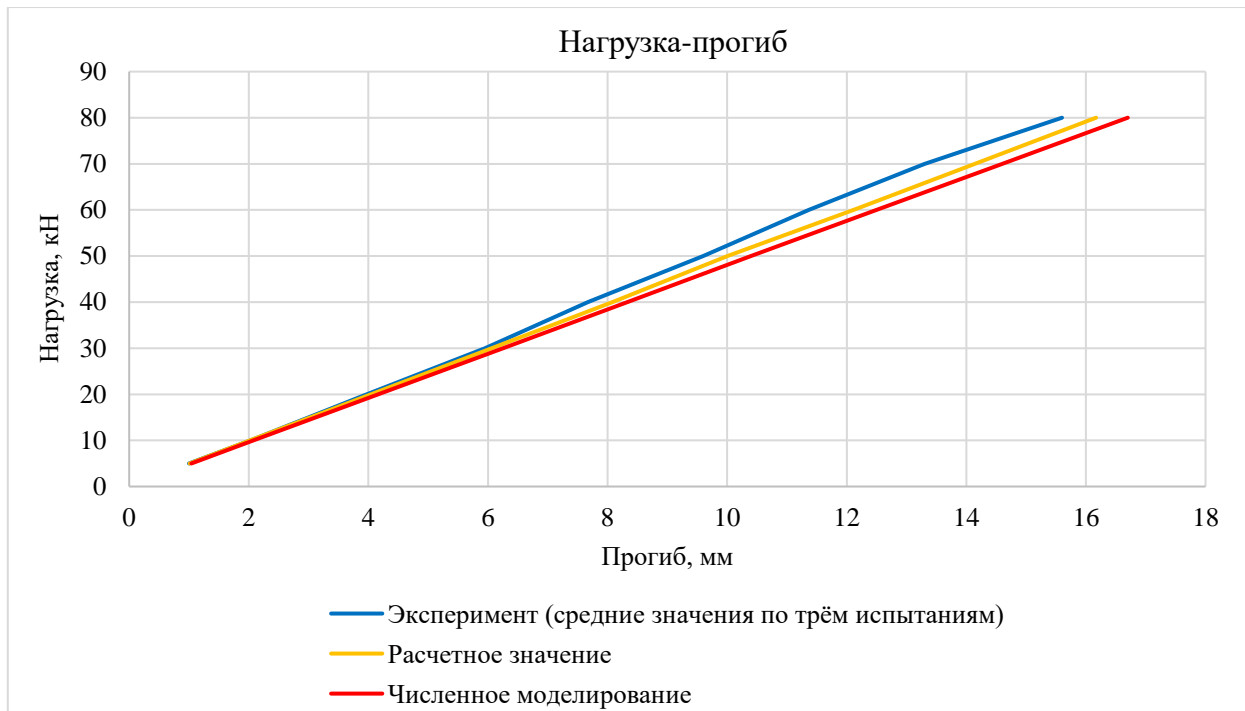


Рисунок 7. Сравнительный анализ экспериментальных прогибов, расчетных прогибов и прогибов, полученных расчетом методом конечных элементов (получено авторами)

Моделирование на основе метода конечных элементов шпренгельной плиты на основе ДПК

После проведенного анализа существующих конструкций шпренгельных и структурных плит [11], авторами замоделирован концептуальный 3D вид шпренгельной плиты на основе ДПК, представленный на рисунке 8.

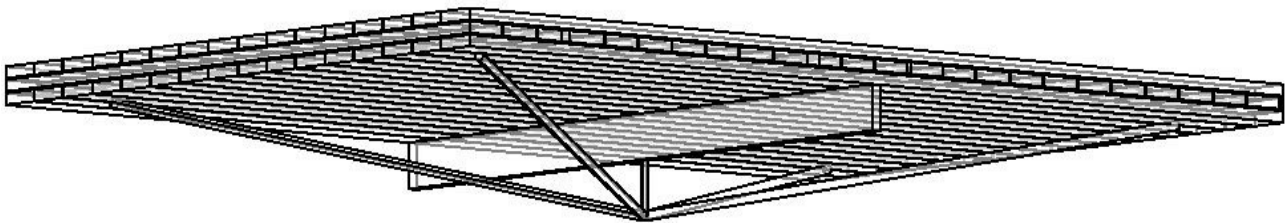


Рисунок 8. Концепция шпренгельной плиты на основе ДПК (разработано авторами)

После создания концепции следующим шагом было создание конечно-элементной расчётной модели такой плиты. Авторами разработана расчётная модель на основе метода конечных элементов в ПК Лира САПР шпренгельной плиты на основе ДПК с размерами плитной части аналогичными тем, что были при проведении натурального эксперимента.

Конструкция шпренгеля в данном случае представляет собой шпренгельную стойку и распределительный брус из LVL (от англ. Laminated Veneer Lumber — «пиломатериал из слоёного шпона»).

Шпренгельные тяги замоделированы из металлического троса. Авторами замоделировано 3 варианта приложения нагрузки. В результате получены изополя прогибов от каждого варианта нагружения (рис. 9–11).

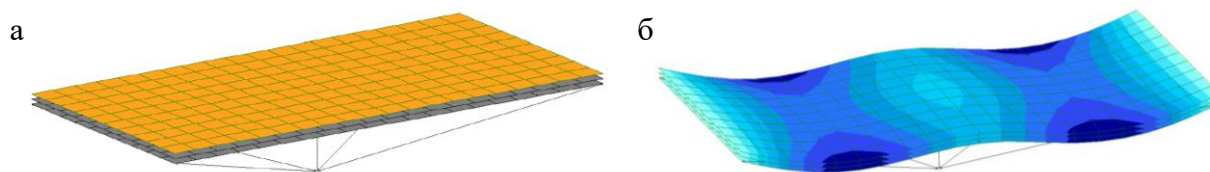


Рисунок 9. (а) Расчетная модель шпренгельной плиты ДПК с равномерно распределенной нагрузкой по всей плите; (б) изополю прогибов плиты ДПК от действия нагрузки (получено авторами)

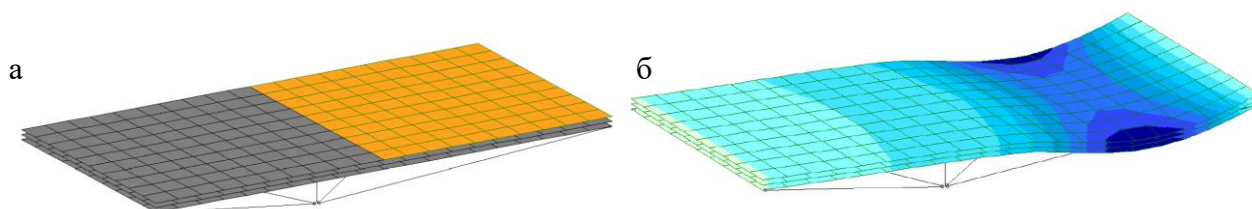


Рисунок 10. (а) Расчетная модель шпренгельной плиты ДПК с равномерно распределенной нагрузкой на 1/4 площади плиты; (б) изополю прогибов плиты ДПК от действия нагрузки (получено авторами)

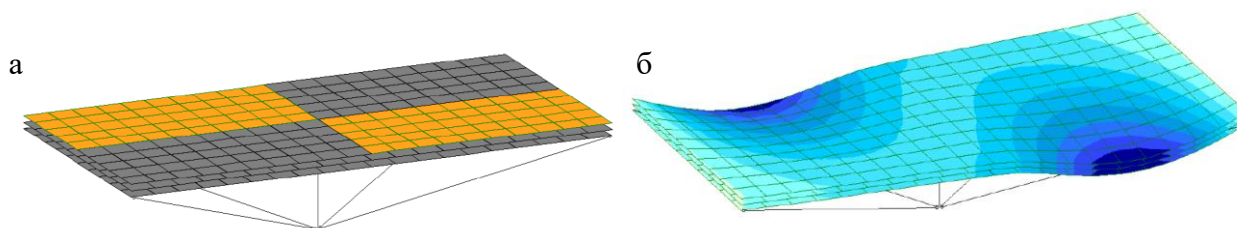


Рисунок 11. (а) Расчетная модель шпренгельной плиты ДПК с равномерно распределенной нагрузкой в двух четвертях площади плиты; (б) изополю прогибов плиты ДПК от действия нагрузки (получено авторами)

После создания расчётной модели на основе метода конечных элементов шпренгельной плиты с затяжками авторами выполнена конечно-элементная расчётная модель шпренгельной плиты на основе ДПК с развитой решёткой [12; 13] в SAP2000. Шпренгельная стержневая конструкция выполнена из LVL. Плитная часть из ДПК замоделирована авторами в данном случае как однослойная пластина с приведенными характеристиками. Габариты плиты составляют 6 300×2 100 мм. В SAP2000 авторами разработана следующая структура сетки: высота — 500 мм, размер сетки — 700×700 мм, как показано на рисунке 12. Остальные характеристики элементов плиты представлены авторами в таблицах 3; 4.

Таблица 3

Характеристики плиты ДПК

ДПК-плита	Значение
Количество слоёв, шт	3
Длина, м	6,3
Ширина, м	2,1
Толщина, мм	90
Модуль упругости вдоль волокон E_0 , МПа	10 000
Модуль упругости поперёк волокон E_{90} , МПа	400
Объёмный вес, кг/м ³	450

Составлено авторами

Таблица 4

Характеристики стержней из LVL

LVL	Значение
Длина стойки, м	0,65
Длина, мм	75
Ширина, мм	75
Модуль упругости, МПа	11 000
Объёмный вес, кг/м ³	450

Составлено авторами

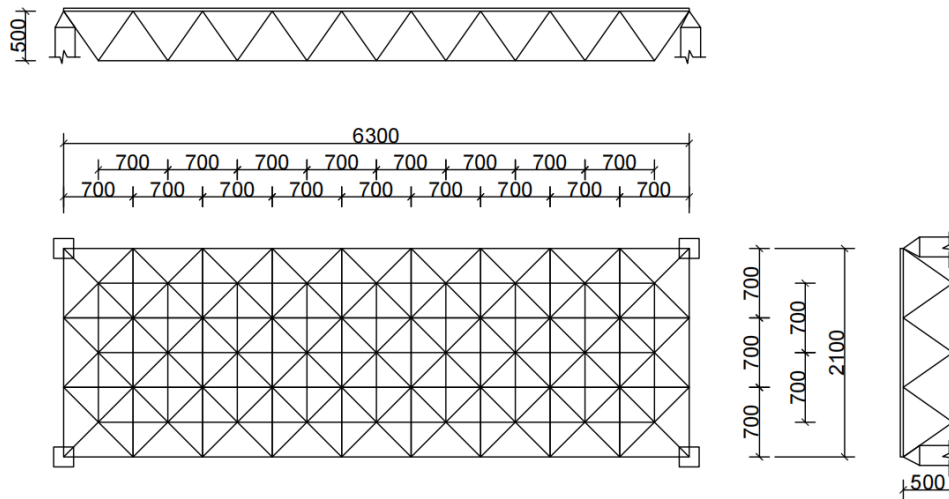


Рисунок 12. Схематическое изображение структуры шпренгельной конструкции плиты на основе ДПК (разработано авторами)

Авторами замоделировано 3 варианта приложения нагрузки:

Вариант 1 — равномерно распределенная нагрузка по всей плите, вариант 2 — равномерно распределенная нагрузка на левой половине плиты и вариант 3 — равномерно распределенная нагрузка в двух четвертях плиты. В результате получены изополя прогибов от каждого варианта нагружения (рис. 13–15).

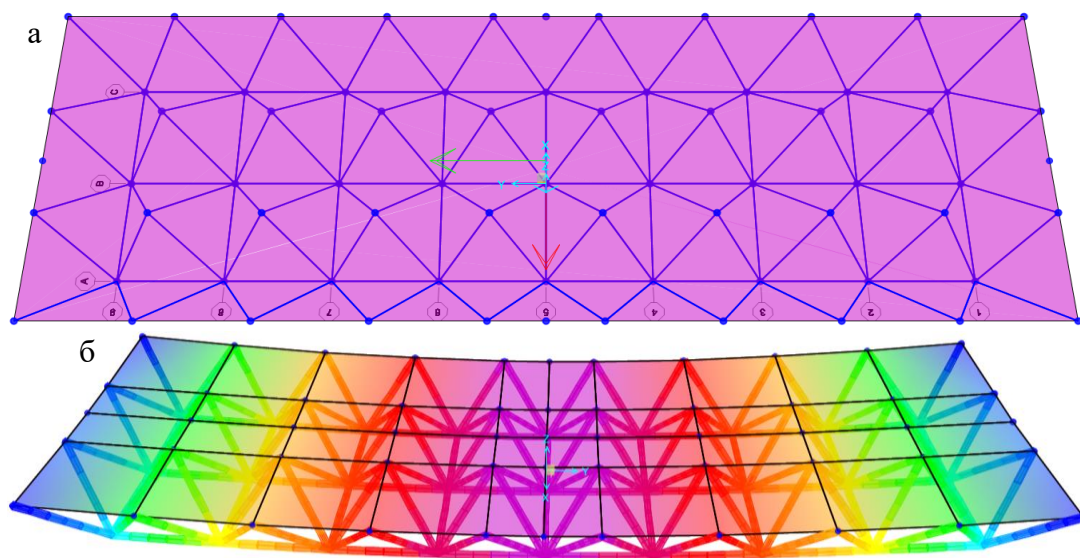


Рисунок 13. (а) Расчетная модель шпренгельной плиты ДПК с равномерно распределенной нагрузкой по всей плите; (б) изополя прогибов плиты ДПК от действия нагрузки (получено авторами)

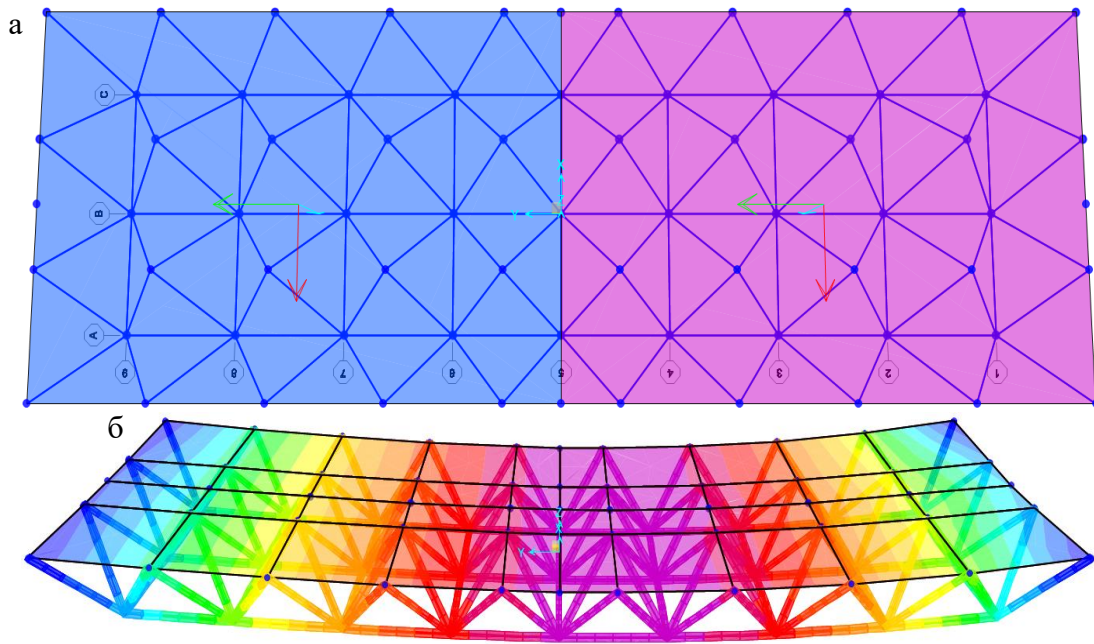


Рисунок 14. (а) Расчетная модель шпренгельной плиты ДПК с равномерно распределенной нагрузкой на половине пролёта; (б) изополю прогибов плиты ДПК от действия нагрузки (получено авторами)

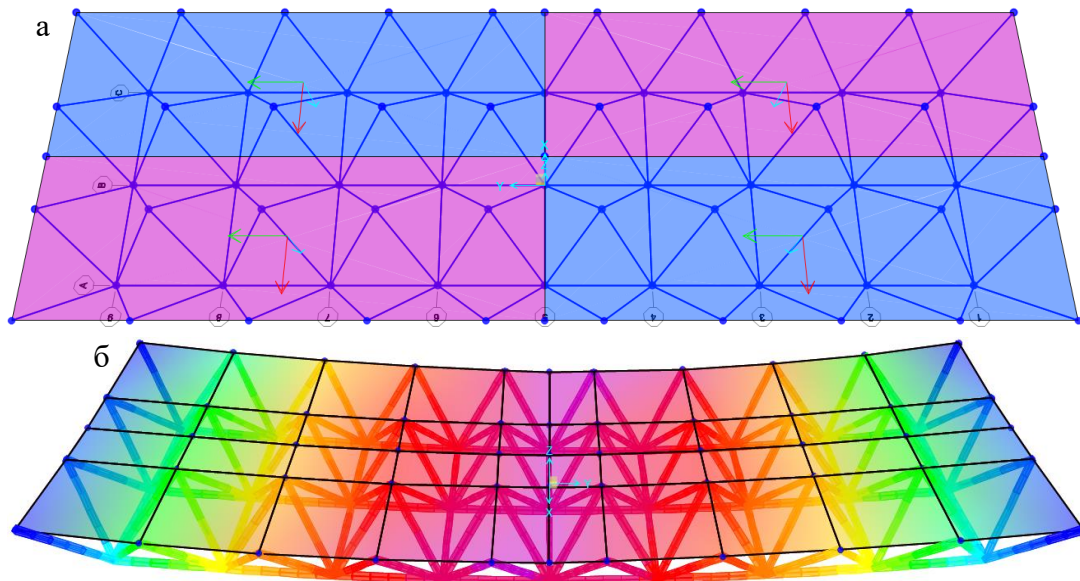


Рисунок 15. (а) Расчетная модель шпренгельной плиты ДПК с равномерно распределенной нагрузкой в двух четвертях площади плиты; (б) изополю прогибов плиты ДПК от действия нагрузки (получено авторами)

Выводы

Проведено экспериментальное и численное исследование пространственной работы плиты ДПК при опирании на 4 стороны. На основе натурального эксперимента верифицирована численная модель в программном комплексе. Сходимость результатов прогибов на каждой ступени нагружения составила от 2,4 % до 9,04 %.

Произведен расчет по методике С.Г. Лехницкого той же плиты ДПК, опёртой по четырём сторонам. В результате получены жесткости и приведенные коэффициенты Пуассона. Далее выполнен расчет по определению прогиба центральной точки трёхслойной плиты ДПК. Сравнительный анализ экспериментальных данных и расчетных значений показал сходимость результатов от 0,99 % до 6,19 %, что свидетельствует хорошей сходимости.

По результатам сравнительного анализа экспериментальных прогибов, прогибов, полученных на основе расчета методом конечных элементов в программном комплексе и расчетных прогибов численным методом можно сделать вывод, что расчеты методом конечных элементов и расчет по методике С.Г. Лехницкого могут использоваться в дальнейшем при расчете таких конструкций.

Проведено пробное моделирование конечно-элементной расчётной модели шпренгельной плиты на основе ДПК с простой шпренгельной системой и с развитой решеткой. Получены зависимости прогибов от приложенной нагрузки при различных вариантах приложения распределенной нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bejder et al. 2008, 'MCDM in Practice: An Architectural Point of View', in Passiv House Norden 2008 Conference Proceedings: The first Nordic Conference on passive houses. SINTEF, 2008. s. 134–143.
2. Hao Li, Brad Jianhe Wang, Peixing Wei, et al., 2019. Cross-laminated timber (CLT) in China: a state-of-the-art. Journal of Bioresources and Bioproducts. Journal of Bioresources and Bioproducts, 4(1): 22–30.
3. Пространственные индустриальные конструкции для покрытий зданий / П.А. Дмитриев, Ю.Д. Стрижаков, В.И. Жаданов, И.С. Инжутов // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. — 1989. — № 2. — С. 23–27.
4. Коваль П.С. Экспериментальное исследование работы предварительно напряженной древесоплиты на изгиб / П.С. Коваль // Вестник гражданских инженеров, СПбГАСУ. — СПб, 2017. — № 4(63). — с. 81–86.
5. Глухих, В.Н. Исследование экспериментальных данных по изгибу CLT-плит, опертых по четырем сторонам / В.Н. Глухих, Л.Н. Кондратьева, В.И. Корсун, П.С. Коваль, Д.В. Тихомиров // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 6. — URL: <https://esj.today/PDF/71SAVN623.pdf>.
6. Черных А.Г. Экспериментальное исследование деформативности предварительно напряженных многослойных древесоплит 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.
7. Рогожина А.В. Расчет деформативности CLT-панели перекрытия [Текст] / Рогожина А.В. // Инженерный вестник Дона. — 2022. — № 6. — С. 77–87.
8. Расчет и анализ НДС CLT панели перекрытия / С.В. Деордиев, Н.И. Марчук, О.Д. Курбаковских [и др.] // Экономика строительства. — 2023. — № 10. — С. 72–76.
9. Лехницкий С.Г. Анизотропные пластинки. — 2-е изд., перераб. и доп. изд. — М.: Гостехиздат, 1957. — 463 с.

10. Тихомиров, Д.В. Расчет перекрытия из ДПК, опирающегося по четырем сторонам, с применением теории изгиба пластин / Д.В. Тихомиров // Инновации в деревянном строительстве: Материалы 12-й Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 20–21 апреля 2023 года. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. — С. 68–80.
11. Москалёв М.Б. Структурные конструкции из древесины с регулированием усилий в элементах // Доклады 65-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. Ч. 1. — СПб.: СПб. гос. архит.-строит. ун-т, 2008. — С. 76–77.
12. Михайлов Б.К., Заварихин Д.С. Конструкция и расчет структурных конструкций с применением клефанерных труб // Докл. 60-й науч. конф. профессоров, преподавателей, науч. работников, инженеров и аспирантов ун-та / С.-Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т. — СПб., 2003. — Ч. 1. — С. 59–60.

Koval Pavel Sergeevich

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
E-mail: pkoval@lan.spbgasu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1911-5169>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=736713

Nikandrov Leonid Dmitrievich

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
E-mail: lenya.nickandrov@yandex.ru

Cao Yupeng

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
E-mail: 1053539452@qq.com

Rouba Meryem

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
E-mail: meryemrouba@yandex.ru

Kozyrev Daniil Borisovich

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
E-mail: D.kozyreff02@gmail.com

Shapurova Natalia Alexandrovna

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
E-mail: shapurovan@yandex.ru

Bearing capacity and deformability of sprengel plates based on cross-laminated timber

Abstract. Spatial structures are significant in modern architecture and construction, as this type of structure has a high load-bearing capacity, which allows you to create non-standard shapes of buildings and structures and overlap large spans. Most often, these structures are represented by block trusses and block sections, structural and sprengel slab. Currently, research on such structures is continuing, new design solutions are emerging, including due to the appearance of new materials. One of these materials is cross-laminated timber, which can be used as a slab part of a sprengel plate. Extensive scientific research is required to develop standards for the design and calculation of cross-laminated timber structures. Therefore, one of the important tasks is to study the spatial work of cross-laminated timber. In the article, the authors tested a slab made of cross-glued wood to determine its deformability. A finite element calculation model of such a slab has been created, and the slab has been calculated using the numerical method. Both calculation methods are verified based on the results obtained after the field test. The authors also create two finite element computational models of a sprengel slab based on cross-laminated timber with a different design of the sprengel system. Using a computational model based on the finite element method, the deformability of the sprengel plates is determined for various load applications. At the end, the authors formulate the main conclusions based on the results of the conducted research.

Keywords: deformability; design model; cross-laminated timber; slab; numerical simulation; spatial constructions; strut-frame