

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

2023, Том 15, № 6 / 2023, Vol. 15, Iss. 6 <https://esj.today/issue-6-2023.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/71SAVN623.pdf>

2.1.9. Строительная механика (технические науки)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

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>

**For citation:**

Glukhikh V.N., Kondratieva L.N., Korsun V.I., Koval P.S., Tikhomirov D.V. Study of experimental data on the bending of CLT slabs supported on four sides. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(6): 71SAVN623. Available at: <https://esj.today/PDF/71SAVN623.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 624.073.11

**Глухих Владимир Николаевич**

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,  
Санкт-Петербург, Россия  
Профессор  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: [tehneh@spbgasu.ru](mailto:tehneh@spbgasu.ru)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=496436](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=496436)

**Кондратьева Лидия Никитовна**

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,  
Санкт-Петербург, Россия  
Профессор  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: [condratjevaln@yandex.ru](mailto:condratjevaln@yandex.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6174-5565>  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=349260](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=349260)

**Корсун Владимир Иванович**

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,  
Санкт-Петербург, Россия  
Профессор  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: [vkorsun@lan.spbgasu.ru](mailto:vkorsun@lan.spbgasu.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9445-5027>  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=758915](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=758915)  
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/C-6381-2019>  
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56226922300>

**Коваль Павел Сергеевич**

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

**Тихомиров Дмитрий Валерьевич**

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,  
Санкт-Петербург, Россия

## Исследование экспериментальных данных по изгибу CLT-плит, опертых по четырем сторонам

**Аннотация.** В работе на основе экспериментальных данных по изгибу перекрестно-клееных деревоплит (или CLT-плит), опертых по четырем сторонам, исследована применимость методов теории изгиба анизотропных многослойных пластин к расчёту перекрытий из данного материала. Объектом исследования являются плиты междуэтажных перекрытий из перекрестно-клееной древесины (ДПК) с опиранием по четырём сторонам. Предмет исследования — напряжённо-деформированное состояние междуэтажных плит перекрытия из перекрестно-клееной древесины с опиранием по четырём сторонам, возникающее при пространственном изгибе. Цель исследования состоит в том, чтобы проверить возможность использования методики С.Г. Лехницкого для определения деформаций и внутренних усилий в перекрытиях, составленных из ДПК как многослойных анизотропных пластин. Для этого необходимо рассчитать по указанной методике жёсткости, модули упругости и коэффициенты поперечной деформации перекрестно-клееных деревоплит, для которых имеются экспериментальные данные, а затем сравнить фактические значения их прогибов со значениями, рассчитанными по методу теории изгиба многослойных анизотропных пластин. На примере пятислойных плит из ДПК толщиной 95 мм и размером 2×2 м выполнен расчёт по определению их жесткостей и нахождению прогибов аналитическим способом. Произведено сравнение расчётных значений прогибов со значениями, полученными в эксперименте зарубежных исследователей. Установлено, что расчётные значения прогибов, полученные методами теории изгиба анизотропных многослойных пластин, практически совпадают с экспериментальными. Лишь при малых нагрузках наблюдается значительное отклонение фактических прогибов от расчётных значений (до 24 %). При увеличении нагрузки сходимости результатов улучшается и погрешность расчёта стремится к достаточно малым величинам. Предполагается, что читатель знаком с общими принципами изгиба многослойных пластинок.

**Ключевые слова:** CLT; ДПК; перекрытие; анизотропная пластина; пространственный изгиб; многослойная пластина; эксперимент; сосредоточенная нагрузка; приведённый модуль упругости; изгибная жесткость

### Введение

В связи с масштабным внедрением конструкций из перекрестно-клееных деревоплит (ДПК, CLT — от англ. *cross-laminated timber*) в отечественное строительство требуется создание нормативной базы и соответствующих рекомендаций, пособий по проектированию конструкций из этого материала. Предполагается массовое строительство многоквартирных жилых зданий высотой до двенадцати и более этажей. При этом следует отметить, что, не смотря на схожесть по форме деревянных крупнопанельных конструкций с железобетонными, для них неприменимы стандартные методики конструктивного анализа без проведения специального обоснования и внесения уточнений [1]. Существенную роль играют анизотропия древесины, многослойная структура материала, его малый вес, а также характеристики длительной прочности и ползучести перекрестно-клееных деревоплит [2].

Одним из наиболее важных направлений такой работы по уточнению применимости существующих расчетных методик является разработка методов расчёта междуэтажных перекрытий. Для различных деревоплит перекрытий, включая ДПК, характерно применение следующих конструктивных схем:

1. С опиранием по двум, трем и четырем сторонам.
2. С безригельным опиранием на отдельностоящие опоры.
3. Неразрезных многопролетных плит.

Напряженно-деформированное состояние конструкций при указанных различных конструктивных схемах будет различным, и нередко его определение аналитическим способом представляет существенные сложности. В связи с этим в российском (для малоэтажных зданий) и зарубежном (в т. ч. для многоэтажных зданий) строительстве наиболее распространённый подход к расчёту таких конструкций представляет собой расчёт плиты перекрытия по балочной схеме. Из плиты виртуально выделяется элементарная полоска вдоль короткого пролёта и рассчитывается как балка под действием нагрузки, равномерно распределенной по длине. Ширина фиктивной балки при этом может определяться различным путем в зависимости от применяемой конструкции.<sup>1</sup> Данный подход рекомендуется многими иностранными справочными руководствами по проектированию конструкций зданий из ДПК [3–5] в силу своей простоты, доступности и надёжности при оценке несущей способности конструкции. Его предлагается использовать при любом соотношении пролётов перекрытий [4]. Следует отметить, что при соотношении генеральных размеров плиты, равном два и более, такой подход оправдан, но при меньших значениях этого соотношения результаты расчета получаются завышенными. В этом случае рекомендуется учитывать действие изгиба в обоих направлениях.

Расчёт перекрытий, опирающихся на четыре стороны, для учёта их пространственной работы, то есть изгиба по двум направлениям, возможно производить методами теории изгиба изотропных и анизотропных многослойных пластин, разработанными такими учёными как Галеркин Б.Г. [6], Тимошенко С.П. [7], Лехницкий С.Г. [8] и Амбарцумян С.А. [9] и др. Такой подход к расчёту при соотношении сторон перекрытия в плане менее двух оправдан и позволяет более точно оценивать значения прогибов и изгибающих моментов по сравнению с расчётом перекрытия по балочной схеме (разница может составлять до 30–40 %).

Исследования по расчёту такого рода конструкций, в том числе из ДПК, а также гвоздевых и нагельных деревоплит, предварительно напряженных многослойных деревоплит с учётом сложного изгиба по схеме анизотропной пластины проводились в недостаточном объеме. Можно отметить работу [10] по изучению НДС многослойных деревоплит с перекрестным расположением досок, склеенных на месте строительства, и являющихся несущим элементом пролётных строений автодорожных мостов. Работы [11–16] посвящены экспериментальным и теоретическим исследованиям предварительно напряжённых многослойных деревоплит конструкций из досок, поставленных на ребро. Деформирование и устойчивость цилиндрических плит из ДПК исследовано в статьях [17; 18]. Конструкции междуэтажных перекрытий из CLT рассмотрены в [19], в которой автор исследовал изгиб перекрытия при четырёхточечном опирании на колонны по углам. Но данная работа носила чисто теоретический характер, без экспериментальной проверки применимости положений теории изгиба анизотропных многослойных пластин к определению НДС перекрестно-клееных деревоплит. Другие исследования междуэтажных перекрытий и пролётных строений мостов из перекрестно-клееных деревоплит представлены в [20–23].

В данной статье произведена расчётная проверка экспериментальных данных по изгибу ДПК-плит при опирании на четыре стороны, полученных G. Hochreiner, J. Fussl и J. Eberhardsteiner [24], методами теории изгиба анизотропных многослойных пластин [8; 9]. В строительстве деревянных зданий с применением ДПК такое опирание перекрытий является одним из наиболее распространённых, поэтому изучение изгиба таких плит является актуальной задачей.

<sup>1</sup> Eurocode 5: Design of timber structures.

### Постановка задачи

Объектом исследования являются плиты междуэтажных перекрытий из перекрестно-клееной древесины (ДПК) с опиранием по четырём сторонам.

Предмет исследования: напряжённо-деформированное состояние междуэтажных плит перекрытия из перекрестно-клееной древесины (ДПК) с опиранием по четырём сторонам, возникающее при пространственном изгибе.

Цель исследования: проверить возможность использования методики [8] для определения деформаций и внутренних усилий в перекрытиях, составленных из ДПК как многослойных анизотропных пластин. Для этого необходимо рассчитать по методике, изложенной в [8], жёсткости, модули упругости и коэффициенты поперечной деформации испытанных автором статьи [24] перекрестно-клееных деревоплит, а затем сравнить фактические значения их прогибов со значениями, рассчитанными по методу теории изгиба многослойных анизотропных пластин. Дополнительные сведения по эксперименту и материалу плит содержатся в статье [25].

### Описание эксперимента

Авторы работы [24] провели испытания пятислойной шарнирно опертой по контуру плиты из ДПК под действием сосредоточенной силы, приложенной в центре, и получил зависимость прогиба в центре плиты от величины нагрузки. График этой зависимости представлен на рисунке 1, а схема эксперимента на рисунке 2.

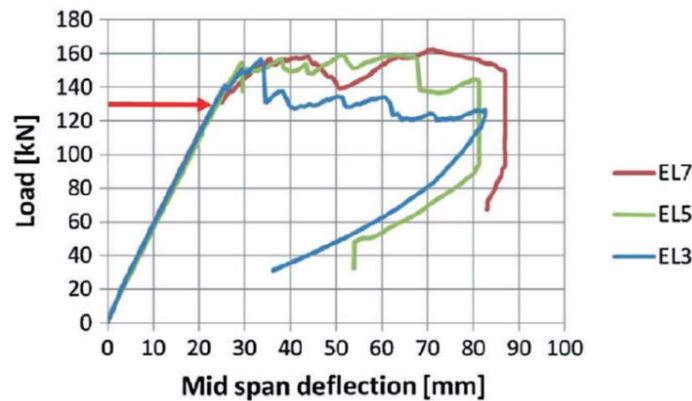
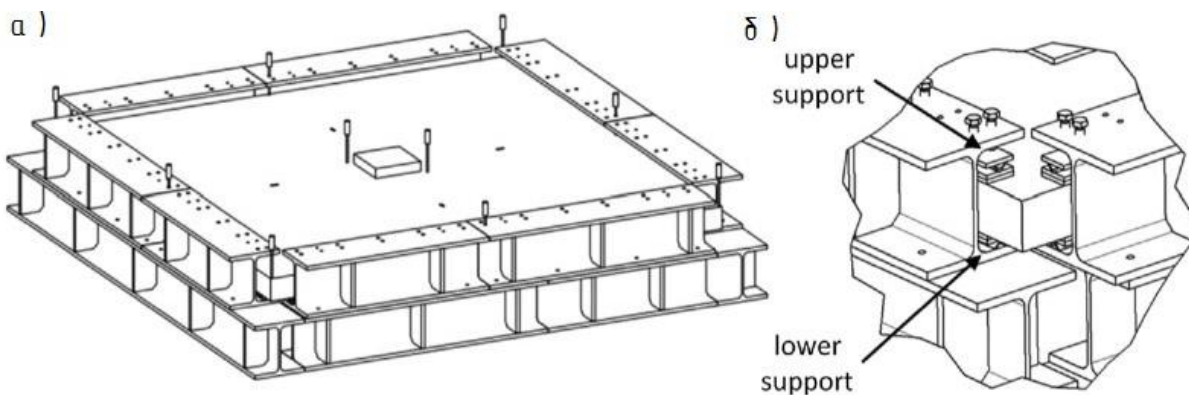


Рисунок 1. Зависимость прогиба от нагрузки пятислойной панели [24]

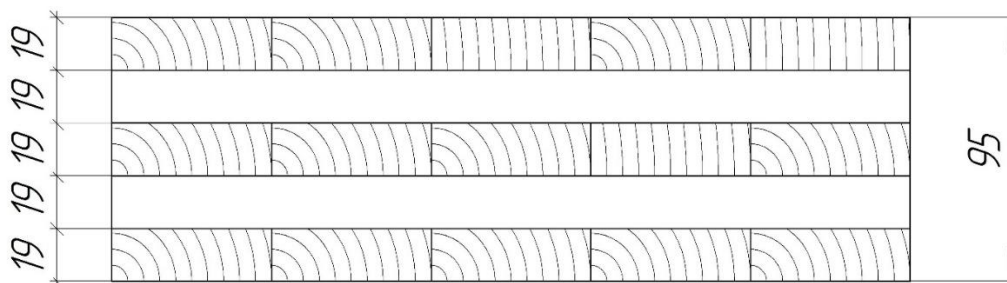






**Рисунок 2.** Схема эксперимента: а — схема крепления; б — узел опирания плиты; в — фото эксперимента [24]

Авторы испытали 3 образца — EL3, EL5, EL7. Размеры каждого образца в плане 2×2 м, толщина образца — 95 мм, толщина слоёв везде одинаковая и равна 19 мм (рис. 3). На рисунке 1 красной стрелкой обозначена нагрузка 130 кН, при которой началось разрушение образцов. Как видно для всех образцов эта нагрузка оказалась одинаковой.



**Рисунок 3.** Поперечное сечение образца из ДПК толщиной 95 мм (предоставлено авторами)

Класс прочности древесины образцов С24. Характеристики древесины досок, из которых изготовлены плиты, приведены в таблице 1 [25].

**Таблица 1**

**Упругие характеристики древесины экспериментальных образцов из ДПК по [25]**

| $E_1$ , МПа | $E_2$ , МПа | $E_3$ , МПа | $G_{12}$ , МПа | $G_{13}$ , МПа | $G_{23}$ , МПа | $\nu_{12}^*$ | $\nu_{13}^*$ | $\nu_{23}^*$ |
|-------------|-------------|-------------|----------------|----------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
| 11 000      | 370         | 370         | 690            | 690            | 50             | 0,44         | 0,44         | 0,64         |

\* — направление 1 вдоль волокон; направление 2 — радиальное; направление 3 — тангенциальное

Далее будут вычислены значения прогибов для каждой ступени нагрузки на основе экспериментальных данных по рисунку 1.

### Описание метода расчёта

Для прямоугольной, ортотропной, многослойной пластины (рис. 4), шарнирно опертой по четырём сторонам, у которой главные направления ( $E_1$  и  $E_2$ ) направлены вдоль осей  $X$  и  $Y$ , и находящейся под действием сосредоточенной силы  $P$ , приложенной в точке  $(\xi, \eta)$ , выражение прогиба  $w(x, y)$  будет иметь следующий вид [8]:

$$w(x, y) = \frac{4P}{a \cdot b \cdot \pi^4} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\sin \frac{m\pi\xi}{a} \sin \frac{n\pi\eta}{b} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}}{\left( D_1 \frac{m^4}{a^4} + 2D_3 \frac{m^2 n^2}{a^2 b^2} + D_2 \frac{n^4}{b^4} \right)}, \quad (1)$$

где  $D_1$  — изгибная жёсткость пластинки в направлении оси  $X$ ;  $D_2$  — изгибная жёсткость пластинки в направлении оси  $Y$ ;  $D_3$  — главная жёсткость пластины.

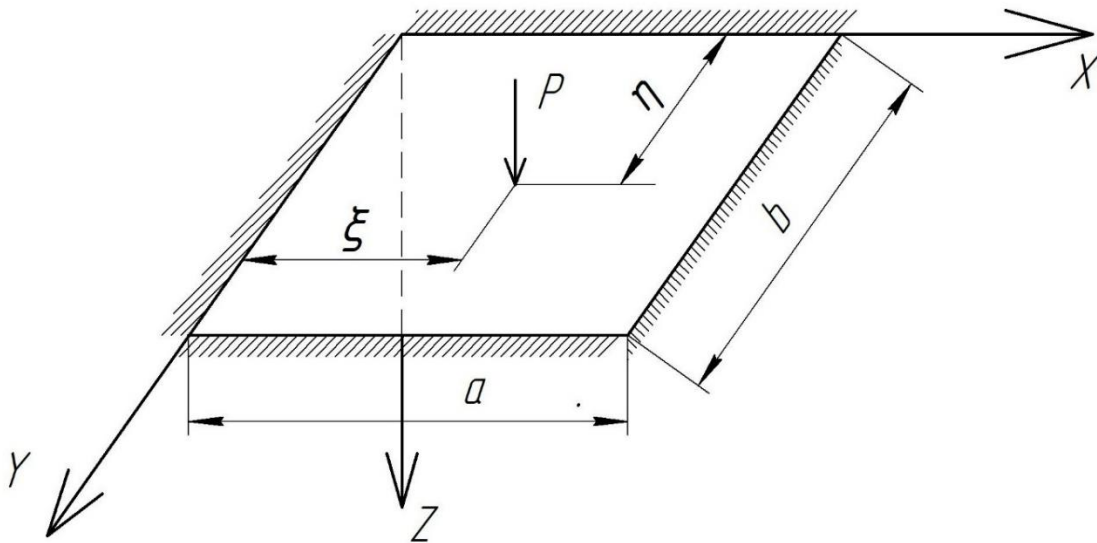


Рисунок 4. Шарнирно опертая пластина под действием сосредоточенной силы  $P$  (предоставлено авторами)

При силе  $P$ , приложенной в центре плиты в точке  $(\zeta = a/2, \eta = b/2)$ , выражение прогиба  $w(x, y)$  упростится и примет вид:

$$w(x, y) = \frac{4P}{a \cdot b \cdot \pi^4} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\sin \frac{m\pi}{2} \sin \frac{n\pi}{2} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}}{\left( D_1 \frac{m^4}{a^4} + 2D_3 \frac{m^2 n^2}{a^2 b^2} + D_2 \frac{n^4}{b^4} \right)}. \quad (2)$$

По этому выражению можно рассчитать прогибы в центре испытанных плит. Жёсткости плит  $D_1, D_2, D_3$  вычисляются по выражениям (3) [8]:

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= \frac{2}{3} \left[ \frac{E_1^{n+1} h_{n+1}^3}{1 - \nu_1^{n+1} \nu_2^{n+1}} + \sum_{m=1}^n \frac{E_1^m}{1 - \nu_1^m \nu_2^m} (h_m^3 - h_{m+1}^3) \right] \\ D_2 &= \frac{2}{3} \left[ \frac{E_2^{n+1} h_{n+1}^3}{1 - \nu_1^{n+1} \nu_2^{n+1}} + \sum_{m=1}^n \frac{E_2^m}{1 - \nu_1^m \nu_2^m} (h_m^3 - h_{m+1}^3) \right] \\ D_3 &= D_1 \nu_2 + 2D_K \\ D_K &= \frac{2}{3} \left[ G^{n+1} h_{n+1}^3 + \sum_{m=1}^n G^m (h_m^3 - h_{m+1}^3) \right] \\ \nu_2 &= \nu_1 \frac{D_2}{D_1} \\ \nu_1 &= \frac{2}{3D_2} \left[ \frac{E_2^{n+1} \nu_1^{n+1} h_{n+1}^3}{1 - \nu_1^{n+1} \nu_2^{n+1}} + \sum_{m=1}^n \frac{E_2^m \nu_1^m}{1 - \nu_1^m \nu_2^m} (h_m^3 - h_{m+1}^3) \right] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $2n + 1$  — число слоёв (крайние слои имеют номера 1 и  $2n + 1$ , средний слой имеет номер  $n + 1$  —  $m$ -ый по счету);  $h$  — полная толщина пластины;  $h_1, h_2, h_n \dots, h_{n+1}$  — расстояния от срединной плоскости до границ слоёв (рис. 5);  $E_1^m, E_2^m, \nu_1^m, \nu_2^m, G^m$  — модули Юнга, коэффициенты Пуассона, модуль сдвига для слоя с номером  $m$  вдоль направлений 1 (ось  $X$ ) и 2 (ось  $Y$ );  $\nu_1$  — приведённый коэффициент Пуассона для многослойной пластины, характеризующий сокращение пластины в направлении оси  $Y$  при растяжении в направлении оси  $X$ ;  $\nu_2$  — приведённый коэффициент Пуассона для многослойной пластины, характеризующий сокращение пластины в направлении оси  $X$  при растяжении в направлении оси  $Y$ .

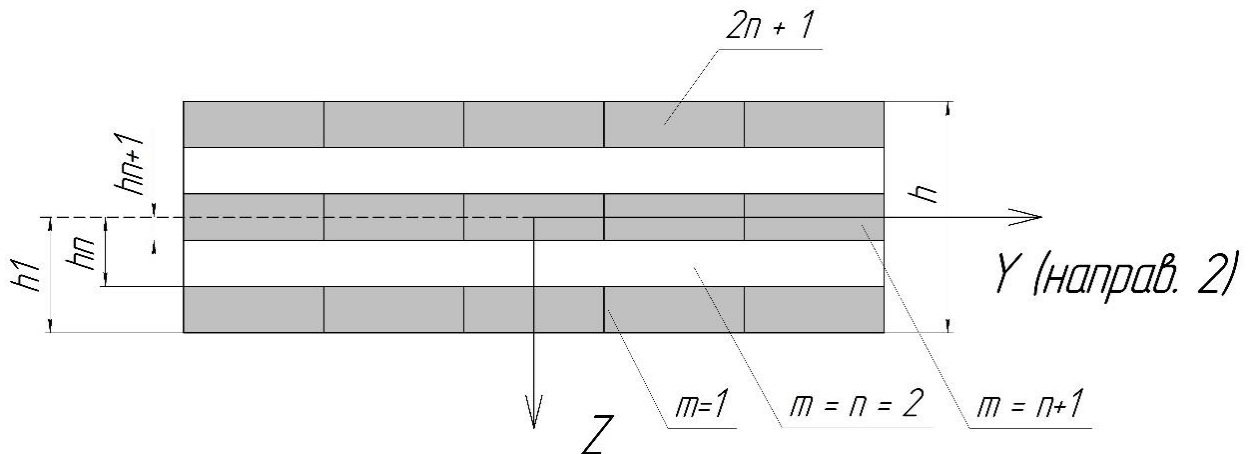


Рисунок 5. К расчёту упругих характеристик плиты по методике [8]

Жёсткости  $D_1, D_2, D_K$  можно представить в другом виде как для однородной, ортотропной пластины [8]:

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= \frac{E_1 h^3}{12(1-\nu_1 \nu_2)} \\ D_2 &= \frac{E_2 h^3}{12(1-\nu_1 \nu_2)} \\ D_K &= \frac{G h^3}{12} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где  $E_1, E_2, G', \nu_1, \nu_2$  — это главные (приведённые) упругие постоянные многослойной пластины ( $\nu_1, \nu_2$  — те же, что и в формулах (3)).

Зная  $D_1, D_2, D_K, \nu_1, \nu_2$ , можно из уравнений (4) определить приведённые модули упругости и сдвига перекрестно-клееных деревоплит, из которых изготовлены образцы.

### Результаты и выводы

Для расчёта упругих характеристик экспериментальных образцов были приняты следующие исходные данные на основе таблицы 1 и [24; 25].

Плотность древесины —  $500 \text{ кг/м}^3$ .

Класс прочности древесины — С24.

Модуль упругости при изгибе (вдоль волокон)  $E_1 = 11\,000$  МПа.

Модуль упругости поперёк волокон  $E_2 = 370$  МПа.

Модуль сдвига  $G_{090} = G_{12} = 690$  МПа.

Модуль сдвига  $G_{9090} = G_{23} = 50$  МПа.

Коэффициент Пуассона поперёк волокон при напряжениях, направленных вдоль волокон  $\nu_{90,0} = 0,44$ .

Коэффициент Пуассона вдоль волокон при напряжениях, направленных поперёк волокон  $\nu_{0,90} = 0,015$ .

Толщина плиты: 95 мм.

Количество слоёв плиты: 5.

Толщина каждого слоя: 19 мм.

Схема поперечного сечения по рисункам 3 и 5.

Расчёт по формулам (2), (3) был выполнен с применением ПК MathCad. Из формул (4) по рассчитанным значениям  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_k$  были найдены приведённые модули упругости образцов  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G'$ . Результаты сведены в таблицу 2.

Таблица 2

**Упругие характеристики испытанных образцов, определённые по методу Лехницкого С.Г. [8]**

| Величина | Значение          | Размерность | Определение   |
|----------|-------------------|-------------|---|
| $D_1$    | $6,32 \cdot 10^5$ | Н*м         | Изгибная жёсткость вдоль оси X (напр. 1)                  |
| $D_2$    | $1,86 \cdot 10^5$ | Н*м         | Изгибная жёсткость вдоль оси Y (напр. 2)                  |
| $\nu_1$  | 0,063             |             | коэффициент Пуассона при растяжении вдоль оси X (напр. 1) |
| $\nu_2$  | 0,019             |             | коэффициент Пуассона при растяжении вдоль оси Y (напр. 2) |
| $D_k$    | $3,98 \cdot 10^4$ | Н*м         | Крутильная жёсткость                                      |
| $D_3$    | $9,13 \cdot 10^4$ | Н*м         | Главная изгибная жёсткость                                |
| $E_1$    | $8,84 \cdot 10^9$ | Па          | Приведённый модуль упругости вдоль оси X (напр. 1)        |
| $E_2$    | $2,60 \cdot 10^9$ | Па          | Приведённый модуль упругости вдоль оси Y (напр. 1)        |
| $G'$     | $0,56 \cdot 10^9$ | Па          | Приведённый модуль сдвига                                 |

Получено авторами

По (2) были рассчитаны прогибы в центре образца, с подстановкой  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  по таблице 2, от действия сосредоточенной силы, график которой изображён на рисунке 1. Результаты расчёта представлены в таблице 3 и на рисунке б.

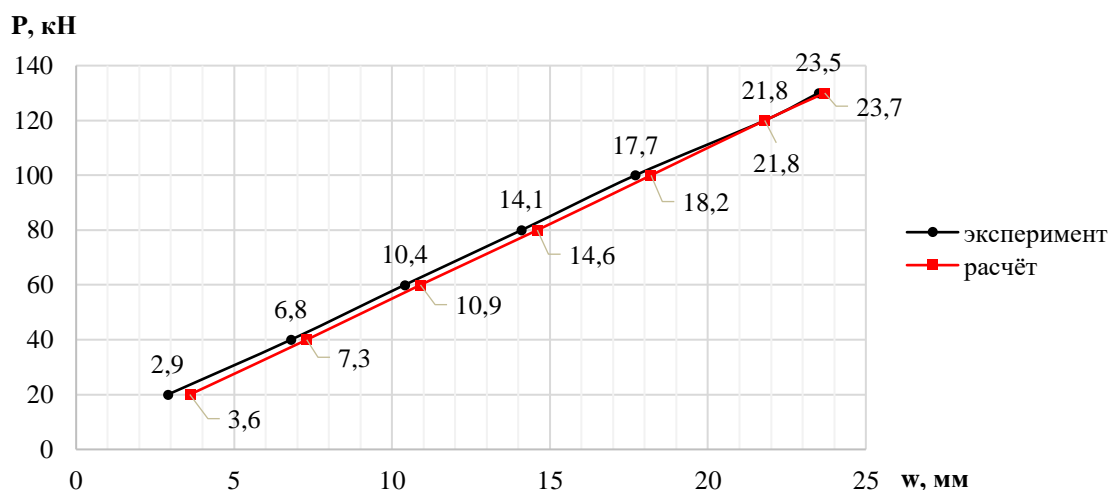
Таблица 3

**Экспериментальные и расчётные значения прогиба в центре пятислойной CLT-пластины размерами  $2 \times 2$  м, толщиной 95 мм**

| Нагрузка P, кН | Фактический прогиб $w_{экс}$ , мм [24] | Расчётный прогиб $w_{расч}$ , мм [8] | $\Delta = (w_{расч} - w_{экс})/w_{экс}$ , % |
|----------------|--|--------------------------------------|---|
| 20             | 2,9                                    | 3,6                                  | 24  |
| 40             | 6,8                                    | 7,3                                  | 7,3   |
| 60             | 10,4                                   | 10,9                                 | 4,8   |
| 80             | 14,1                                   | 14,6                                 | 3,5   |
| 100            | 17,7                                   | 18,2                                 | 2,8   |
| 120            | 21,8                                   | 21,8                                 | 0   |
| 130            | 23,5                                   | 23,7                                 | 0,9   |

Получено авторами





**Рисунок 6.** График экспериментальной и расчётной зависимости прогиба панели от нагрузки (получено авторами)

Из сравнительного анализа по таблице 3 видим в целом достаточно хорошую сходимость результатов. Лишь при малых нагрузках ( $P = 20$  кН) наблюдается значительное отклонение фактических прогибов от расчётных значений. При увеличении нагрузки сходимость результатов улучшается и погрешность расчёта стремится к достаточно малым величинам.

Такие результаты позволяют сделать выводы о применимости методики Лехницкого С.Г. для определения упругих свойств перекрестно-клееных деревоплит (модули упругости и коэффициенты поперечной деформации). Найденные таким образом параметры можно в дальнейшем использовать, например, при анализе конструкций в различных расчётных программах, в том числе основанных на методе конечных элементов, в которых перед расчётом необходимо вводить данные по материалу. Тот же вывод следует и относительно формул типа (1) и (2) теории изгиба пластин, из которых далее путём дифференцирования можно получить выражения для определения изгибающих моментов и других внутренних сил, действующих в плитах ДПК (см. [8; 9]).

Подобные расчёты можно проводить и для распределённой нагрузки [8; 9], что представляет большой интерес, так как в основном инженерные расчёты выполняются на действие этого типа нагрузки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Наружные ограждающие конструкции жилых и общественных зданий из железобетона с применением панелей на деревянном каркасе: монография / А.Г. Черных [и др.]; М-во образования и науки Рос. Федерации, С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т. — СПб.: [б. и.], 2012. — 151 с.
2. Исследование работы металлических и деревянных конструкций и оценка срока их службы с учетом условий эксплуатации: монография / А.Г. Черных, Е.И. Рыбнов, Н.А. Сенькин [и др.]; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. — Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2021 — 358 с. — Текст: непосредственный.
3. Borgström E., Fröbel J., 2019. The CLT Handbook. CLT structures — facts and planning. Stockholm: Swedish Wood, 188 p.

4. Karacabeyli E., Gagnon S., 2019. Canadian CLT Handbook. Quebec: FPIInnovations, 812 p.
5. Karacabeyli E., Douglas B., 2013. CLT Handbook: Cross-laminated timber. US Edition. Quebec: FPIInnovations, 572 p.
6. Галёркин Б.Г. Собрание сочинений в 2 томах. т. 2 / [Отв. ред. Н.И. Мухелишвили] М.: Акад. наук СССР, 1952–1953.
7. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М.: 1966. 636 с.
8. Лехницкий С.Г. Анизотропные пластинки. М.: 1947. 355 с.
9. Амбарцумян С.А. Теория анизотропных пластин. М.: Наука, 1967. 268 с.
10. Уткин В.А., Кобзев П.Н. К вопросу об исследовании многослойной клееной древесной плиты из перекрестных досок на изгиб // Промышленное и гражданское строительство. 2009. № 7, с. 51–53.
11. Коваль П.С. Изгиб предварительно напряженной древесной плиты сосредоточенной нагрузкой // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 6(47), с. 52–57.
12. Коваль П.С., Глухих В.Н. Распределение напряжений в пакете из тангенциальных досок как упругой ортотропной полуплоскости, нагруженной сосредоточенной силой на границе // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2014. № 208, с. 90–102.
13. Коваль П.С. Сравнительный анализ современных методов расчета предварительно напряженных древесных плит // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 6(59), с. 97–101.
14. Коваль, П.С. Экспериментальное исследование работы предварительно напряженной древесной плиты на изгиб / П.С. Коваль // Вестник гражданских инженеров, СПбГАСУ. — СПб, 2017. — № 4(63). — с. 81–86.
15. Коваль, П.С. Разработка методики расчета предварительно напряженных древесных плит / П.С. Коваль // Вестник гражданских инженеров, СПбГАСУ. — СПб, 2017. — № 5(64). — с. 47–52.
16. Черных А.Г., Петров А.Н., Коваль П.С., Данилов Е.В. Экспериментальное исследование деформативности предварительно напряженных многослойных древесных плит методом сплошного лазерного сканирования // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 5(76), с. 97–104.
17. Каменев И.В., Карпов В.В., Кондратьева Л.Н. Устойчивость цилиндрических CLT-панелей // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 6(95), с. 30–38.
18. Каменев И.В. Верификация математической модели деформированного состояния цилиндрических CLT-панелей // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 3(98), с. 25–32.
19. Черных А.Г., Кузьминова Е.В. Сравнительный анализ видов соединения CLT-панелей // Инновации в деревянном строительстве. Материалы 11-й Международной научно-практической конференции. СПбГАСУ, Санкт-Петербург, 2021. — с. 13–25.
20. Chapman, J. Cross laminated timber construction for resisting lateral loads on six level buildings / J. Chapman // New Zealand timber design journal. — Auckland, 2018. — Vol. 18, issue 4. — pp. 3–9.

21. Quenneville, P., Morris, H. Japan Kobe earthquake shake table simulation. Earthquake performance of multi-storey cross laminated timber buildings / P. Quenneville, H. Morris // New Zealand timber design journal. — Auckland, 2015. — Vol. 15, issue 4. — pp. 3–8.
22. Teibinger, M., Charwat-Pessler, J. Multi-storey Timber Houses in Urban Regions in Austria / M. Teibinger, J. Charwat-Pessler // The 11th World Conference on Timber Engineering 2010 (WCTE 2010), June 20–24. — Trentino, 2010. — pp. 2536–2543.
23. Abrahamsen, R.B., Nyløkken, T.E. Bridge deck rehabilitation using cross-laminated timber / R.B. Abrahamsen, T.E. Nyløkken // International conference timber bridges, September 12–15. — Lillehammer, Norway, 2010. — pp. 371–382.
24. Hochreiner G., Fussl J. and Eberhardsteiner J., 2014. Cross-laminated timber plates subjected to concentrated loading: experimental identification of failure mechanisms. Strain, № 50(1): 68–81.
25. Albostami A.S, Wu Z. and Cunningham L., 2017. Structural behavior of cross-laminated timber panels by the state space approach. International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements, № 5(6): 834–846.

### Glukhikh Vladimir Nikolaevich

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia  
E-mail: [tehmeh@spbgasu.ru](mailto:tehmeh@spbgasu.ru)  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=496436](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=496436)

### Kondratieva Lidiia Nikitovna

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia  
E-mail: [condratjevaln@yandex.ru](mailto:condratjevaln@yandex.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6174-5565>  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=349260](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=349260)

### Korsun Vladimir Ivanovich

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia  
E-mail: [vkorsun@lan.spbgasu.ru](mailto:vkorsun@lan.spbgasu.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9445-5027>  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=758915](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=758915)  
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/C-6381-2019>  
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56226922300>

### Koval Pavel Sergeevich

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

### Tikhomirov Dmitry Valerievich

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

## Study of experimental data on the bending of CLT slabs supported on four sides

**Abstract.** In this work, based on experimental data on the bending of cross-laminated wood slabs (or CLT slabs) supported on four sides, the applicability of the methods of the theory of bending of anisotropic multilayer plates to the calculation of floors made of this material is investigated. The object of the study is interfloor slabs made of cross-laminated timber (WPC) supported on four sides. The subject of the study is the stress-strain state of interfloor floor slabs made of cross-laminated wood supported on four sides, which occurs during spatial bending. The purpose of the study is to test the possibility of using S.G. Lekhnitsky's technique to determine deformations and internal forces in floors composed of WPC as multilayer anisotropic plates. To do this, it is necessary to calculate, using the specified method, the rigidity, elastic moduli and transverse deformation coefficients of cross-laminated wood slabs for which experimental data are available, and then compare the actual values of their deflections with the values calculated using the method of bending theory of multilayer anisotropic plates. Using the example of five-layer WPC slabs with a thickness of 95 mm and a size of 2×2 m, a calculation was made to determine their rigidities and find deflections using an analytical method. A comparison was made of the calculated values of deflections with the values obtained in the experiment of foreign researchers. It has been established that the calculated values of deflections obtained by the methods of the theory of bending of anisotropic multilayer plates practically coincide with the experimental ones. Only at low loads is there a significant deviation of the actual deflections from the calculated values (up to 24 %). As the load increases, the convergence of results improves and the calculation error tends to fairly small values. It is assumed that the reader is familiar with the general principles of bending of multilayer plates.

**Keywords:** CLT; WPC; overlap; anisotropic plate; spatial bending; multilayer plate; experiment; concentrated load; reduced modulus of elasticity; flexural rigidity