

## Расчет деформативности CLT-панели перекрытия

*А.В. Рогожина*

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)*

**Аннотация:** В качестве объекта исследования были выбраны CLT-панели (англ. Cross Laminated Timber) — это многослойный материал, выполненный из хвойных и твердолиственных пород дерева, имеющий в своем составе систему перекрестно-клееной древесины. В рамках работы была проанализирована имеющаяся литература по данной тематике, произведен расчет и анализ полученных результатов. В статье предоставлены результаты расчета CLT-панели с рассмотрением возможности изотропного и ортотропного задания жесткости панели, с использованием модулей упругости вдоль и поперек волокон. Приведены результаты расчета в виде максимальных прогибов панели. Применения в расчете модуля упругости поперек волокон и учет ортотропной жесткости уточняет напряженно деформированное состояние панели перекрытия. На основании выполненных расчетов и проведенного анализа полученных результатов сделаны выводы.  
**Ключевые слова:** CLT-панель, поперечный изгиб, модуль упругости, жесткость, напряжение, прогиб, ортотропия.

Возможности технологий производства клееной древесины позволяют применять в качестве несущих изгибаемых элементов CLT-панели – систему перекрестно-клееной древесины [1-3]. Применение таких конструкций обусловлено высокой прочностью, достаточной жесткостью, долговечностью, экологической чистотой применяемых материалов [4-6]. Возможности современных САПР позволяют выполнять уточненные расчеты такого рода составных конструкций для того, чтобы добиться более рационального использования материала, оптимизации стоимости итоговой конструкции, увеличения сроков эксплуатации [7-9].

Цель работы – выполнить расчет CLT-панели в виде шарнирно опертой балки, получить результаты статического расчета, проверив панель по прочности в рамках 1-й и 2-й группы предельных состояний. Расчет в таком случае ведется с использованием модуля упругости вдоль волокон  $E_0$  [10]. Далее, после формирования расчетной модели CLT-панели в программном комплексе SCAD Office, будут рассмотрены варианты изотропного и

---

ортотропного задания жесткости панели, для уточнения напряженно-деформированного состояния.

За основу для расчета принята 5-ти слойная CLT-панель перекрытия размерами 1000x3500 мм. Материал – древесина хвойных пород 2-го и 3-го сортов. Основные технические характеристики CLT-панели представлены в таблице 1. Сбор нагрузок на панель выполнен в таблице 2.

Таблица 1

Технические характеристики

Параметр	Условное обозначение	Значение
Количество слоев, шт	<i>s</i>	5
Толщина, мм	<i>t</i>	165
Площадь, см <sup>2</sup>	<i>A</i>	1650
Момент сопротивления, см <sup>3</sup>	<i>W</i>	4537,5
Момент инерции, см <sup>4</sup>	<i>I</i>	37434
Расчетное сопротивление изгибу, МПа	<i>R<sub>u</sub></i>	9,38
Собственный вес плиты, кН\м <sup>2</sup>	<i>g</i>	0,825

Равномерно-распределённая погонная нагрузка на панель составит:

1. Нормативная нагрузка -  $q_n = 2,45 \times 1,0 = 2,5$  кН/м.
2. Расчетная нагрузка -  $q_p = 3,07 \times 1,0 = 3,1$  кН/м.

Таблица 2

Сбор нагрузок на панель

№	Наименование	Нормативная нагрузка, кН\м <sup>2</sup>	Коэффициент надежности по нагрузке	Расчетная нагрузка, кН\м <sup>2</sup>
1	5-ти слойная CLT-панель перекрытия толщиной 165 мм	0,825	1,1	0,908
2	Гидроизоляция	0,02	1,3	0,03
3	Пробковая подложка 200 кг\м <sup>3</sup>	0,004	1,3	0,005
4	Паркетная доска из дуба 720 кг\м <sup>3</sup>	0,1	1,3	0,13
	ИТОГО: постоянная нагрузка	0,949		1,118
5	Кратковременная нагрузка	1,5	1,3	1,95
	ИТОГО: полная нагрузка	2,45		3,07

Максимальный изгибающий момент в панели составляет:

$$M = q_p \times L^2 / 8 = 3,1 \times 3,5^2 / 8 = 4,7 \text{ кНм.}$$

Напряжения в панели составят:

$$\sigma = M/W = 4,7 \times 10^6 / 4,5 \times 10^6 = 1,04 \text{ МПа} < R_u = 9,4 \text{ МПа.}$$

Предельно-допустимый прогиб из эстетико-психологических требований составит:

$$f_{ult} = 1/172 \times L = 20,3 \text{ мм.}$$

Прогиб панели без учета деформаций сдвига составит:

$$f_0 = 5/384 \times q_n \times L^4 / E \times I = 5/384 \times 2,5 \times 3,5^4 \times 10^{12} / 10^4 \times 3,7 \times 10^8 = 1,32 \text{ мм.}$$

Прогиб панели с учетом деформаций сдвига составит:

$$f = f_0 / k [1 + C(h/L^2)] = 1,32 / 1 [1 + 19,2(165/3500^2)] = 1,4 \text{ мм} < f_{ult} = 20,3 \text{ мм.}$$

В качестве исходных данных для моделирования была принята 5-ти слойная CLT-панель перекрытия размерами 1000x3500 мм. Материал – древесина хвойных пород 2-го и 3-го сортов. Моделирование выполнялось в трех вариантах. В первом случае CLT-панель перекрытия моделировалась как шарнирно-опертая балка. Во втором случае CLT-панель перекрытия моделировалась как плита, состоящая из 4-х узловых пластинчатых конечных элементов, с изотропным параметром жесткости  $E_0$ . В третьем случае CLT-панель перекрытия моделировалась, как плита, состоящая из 4-х узловых пластинчатых конечных элементов, с ортотропным параметром жесткости  $E_0$  и  $E_{90}$ . Во всех трех случаях были заданы шарнирные условия крепления опорных узлов панели. Жесткостные назначения для стержней и пластинчатых элементов CLT-панели представлены в таблице 3.

Таблица 3

Жесткостные назначения

Параметр	№ варианта моделирования CLT-панели		
	№1 (балка)	№2 (изотропная пластина)	№3 (ортотропная пластина)
Ширина $b$ , мм	1000	-	-
Высота $h$ , мм	165	-	-
Толщина $t$ , мм	-	165	165
Об.вес, кг\м <sup>3</sup> .	500	500	500
Модуль упругости вдоль волокон $E_0$ , МПа	10000	10000	10000
Модуль упругости поперек волокон $E_{90}$ , МПа	-	-	400

Были сформированы 2 загрузки CLT-панели расчетным и нормативным значением полной нагрузки, суммарной от действия постоянных и временных нагрузок на перекрытие, соответственно. Общий

вид расчетных моделей в шарнирно-стержневой и пластинчатой постановке представлены на рис. 1 и рис. 2.

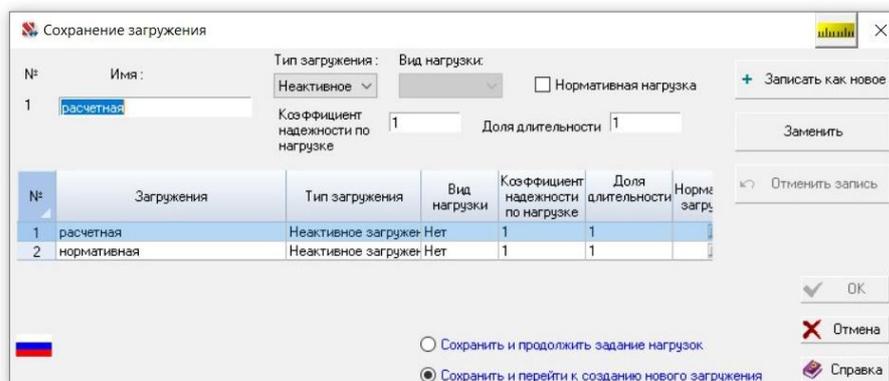
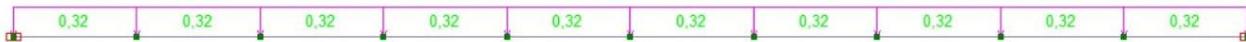


Рис.1 - Расчетная модель в шарнирно-стержневой постановке

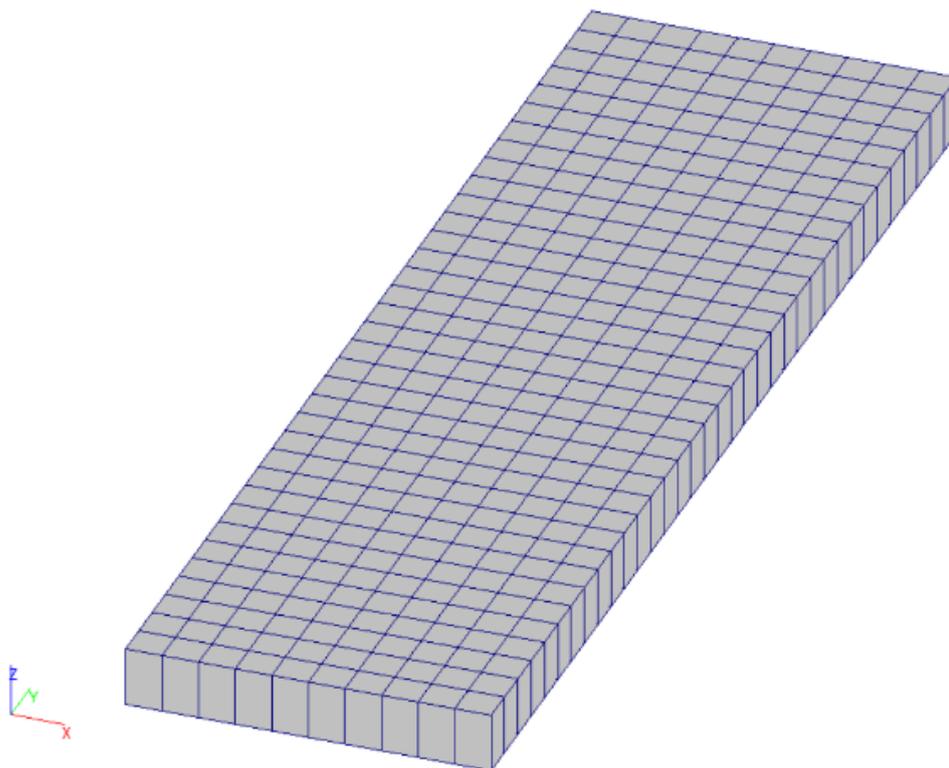


Рис.2 - Расчетная модель в пластинчатой постановке

После проведенных расчетов созданных моделей были получены следующие результаты:

1. Прогиб CLT-панели модели №1 от нормативного значения нагрузки при задании изотропного значения модуля упругости составил  $f = 1,28$  мм;
2. Максимальный изгибающий момент в CLT-панели модели №1 от расчетного значения нагрузки составил  $M = 4,75$  кНм.
3. Прогиб CLT-панели модели №2 от нормативного значения нагрузки при задании изотропного значения модуля упругости составил  $f = 1,29$  мм.
4. Максимальные напряжения в CLT-панели модели №2 от расчетного значения нагрузки составили  $\sigma_y = 1,04$  МПа.
5. Прогиб CLT-панели модели №3 от нормативного значения нагрузки при задании ортотропного значения модуля упругости составил  $f = 1,47$  мм.
6. Максимальные напряжения в CLT-панели модели №3 от расчетного значения нагрузки составили  $\sigma_y = 1,11$  МПа.

Эпюры вертикальных прогибов и изгибающего момента, а также изополя вертикальных деформаций и напряжений  $\sigma_y$ , полученные по результатам расчетов, представлены на рис. 3-8.



Рис.3 - Вертикальные перемещения. Модель №1



Рис.4 - Изгибающий момент. Модель №1

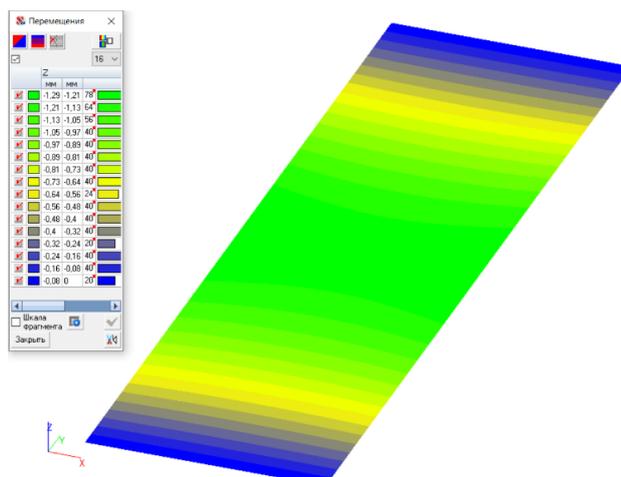


Рис.5 - Изополя вертикальных деформаций. Модель №2

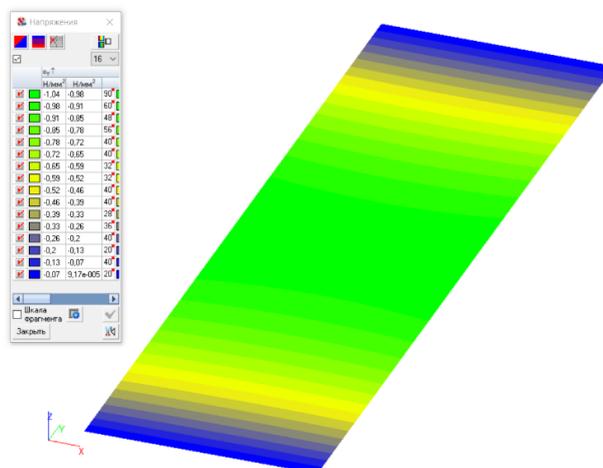


Рис.6 - Изополя напряжений  $\sigma_y$ . Модель №2

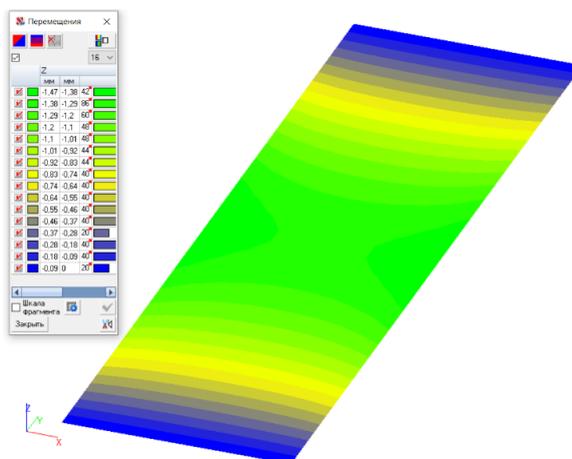


Рис.7 - Изополя вертикальных деформаций. Модель №3

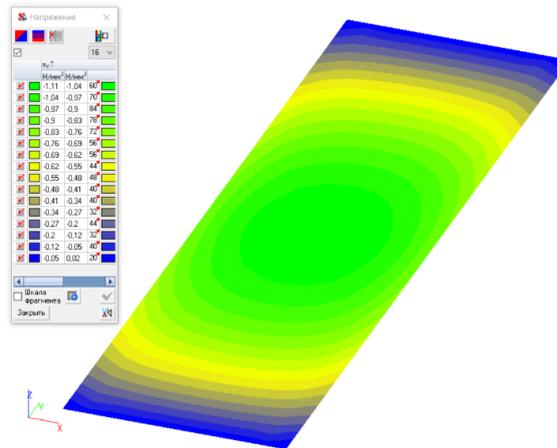


Рис.8 - Изополюса напряжений  $\sigma_y$ . Модель №3

Весь объем полученных результатов расчета представлен в таблице 4.

Таблица 4

Результаты расчета

Параметр	Ручной расчет	Модель №1	Модель №2	Модель №3
Прогиб CLT-панели, мм	1,4	1,28	1,29	1,47
Максимальные напряжения, МПа	1,04	-	1,04	1,11

Анализ всего объема полученных результатов показал следующее:

1. Значения, полученные в результате расчетов, имеют сходные величины;
2. Разница по прогибам между расчетом CLT-панели перекрытия, как изгибаемого стержня и шарнирно-стержневой расчетной схемой в программном комплексе SCAD Office, составляет 7,8%;
3. Нормальные напряжения панели перекрытия, представленной как изгибаемый стержень и панели перекрытия, которая моделировалась как плита, состоящая из 4-х узловых пластинчатых конечных элементов, с изотропным параметром жесткости  $E_0$  – идентичны;

4. Разница нормальных напряжений у панелей с изотропным параметром жесткости  $E_0$  и ортотропным параметром жесткости  $E_0, E_{90}$  составляет 6,7%.

На основании выполненных расчетов и проведенного анализа полученных результатов сделаны следующие выводы:

1. Выполнен расчет CLT-панели перекрытия как изгибаемого стержня. Получены значения нормальных напряжений  $\sigma$  и максимального прогиба  $f$  с использованием модуля упругости вдоль волокон  $E_0=10000$  МПа. При этом полученные результаты не превышают предельно допустимых значений;
2. Созданная шарнирно-стержневая расчетная схема в программном комплексе SCAD Office по полученным результатам величины изгибающего момента  $M$  и максимального прогиба  $f$  соответствует результатам расчета CLT-панели перекрытия как изгибаемого стержня;
3. Прогиб при расчете панели в качестве изгибаемого стержня больше прогиба созданной шарнирно-стержневая расчетной схемы, что объясняется необходимостью расчета максимального прогиба с учетом деформаций сдвига;
4. Нормальные напряжения панели перекрытия с заданным изотропным параметром жесткости  $E_0$  – идентичны;
5. Расчет панели перекрытия с заданным ортотропным параметром жесткости  $E_0, E_{90}$  показал увеличение нормальных напряжений и прогибов, что предоставляет уточненную и более сложную картину напряженно-деформированного состояния CLT-панели.

## Литература

1. Мавлюбердинов А.Р., Хоцанян Д.Н. Технологические особенности возведения многоэтажных жилых зданий из CLT-панелей // Известия КГАСУ. 2018. №1(43) С. 219–225.
2. Rothoblaas. Solutions for Building technology. CLT and mass timber. 32 p.
3. The CLT Handbook, Swedish Wood. 2019. 188 p.
4. CLT Handbook USA Edition, FPInnovations. 2019. Volume 1. 463 pp.
5. Yinlan Shen, Schneider Johannes, Stiemer Siegfried F., Xueyong Ren Failure Modes and Mechanical Properties of Bracket Anchor Connections for Cross-Laminated-Timber. MATEC Web of Conferences 275. 2019. 1-7 pp.
6. Polastri Andrea, Giongo Ivan & Piazza Maurizio. An Innovative Connection System for Cross-Laminated Timber Structures. Structural Engineering International Volume 27. 2017. 502-511 pp.
7. WCTE 2016 – Rothoblaas Research Project Partner, Research outcomes, Vienna, Austria, August 2016. 72 pp.
8. Шогенов С.Х., Балов А.А., Афашагов Б.З. Новые конструкции универсальных панелей зданий // Инженерный вестник Дона, 2016, №2. URL:ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\_18\_shogenov\_balov.pdf\_fb3a2e9b32.pdf
9. The CLT Handbook. Stockholm: Swedish Wood, 2019. 188 с.
10. Змеев М.В. Определение толщины перекрытия из перекрестно-клееных досок на примере CLT-плит Binderholz (Austria) из условия жесткости // Инженерный вестник Дона, 2020, №11. URL:ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\_35\_\_10\_Zmeev.pdf\_91b8606af3.pdf

## References

1. Mavlyuberdinov A.R., Khotsanyan D.N. News of KGASU. 2018. №1(43). pp. 219-225.
2. Rothoblaas. Solutions for Building technology. CLT and mass timber. 32 p.
3. The CLT Handbook, Swedish Wood. 2019. 188 p.
4. CLT Handbook USA Edition, FPInnovations. 2019. Volume 1. 463 pp.
5. Yinlan Shen, Schneider Johannes, Stiemer Siegfried F., Xueyong Ren Failure Modes and Mechanical Properties of Bracket Anchor Connections for Cross-Laminated-Timber. MATEC Web of Conferences 275. 2019. 1-7 pp.
6. Polastri, Andrea & Giongo, Ivan & Piazza, Maurizio. An Innovative Connection System for Cross-Laminated Timber Structures. Structural Engineering International. Volume 27. 2017. 502-511 pp.
7. WCTE 2016 – Rothoblaas Research Project Partner, Research outcomes, Vienna, Austria, August 2016. 72 pp.
8. Shogenov S.H., Balov A.A., Afashagov B.Z. Inzhenerny`j vestnik Dona, 2016, №2.  
URL:[ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_18\\_shogenov\\_balov.pdf\\_fb3a2e9b32.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_18_shogenov_balov.pdf_fb3a2e9b32.pdf)
9. The CLT Handbook. Stockholm: Swedish Wood, 2019. 188 p.
10. Zmeev M.V. Inzhenerny`j vestnik Dona, 2020, №11.  
URL:[ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_35\\_\\_10\\_Zmeev.pdf\\_91b8606af3.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_35__10_Zmeev.pdf_91b8606af3.pdf)