

УДК 624.011.2

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КЛЕЕНИХ БАГАТОШАРОВИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ ПАНЕЛЕЙ З РІЗНИМ РОЗТАШУВАННЯ ШАРІВ І ПОШАРОВИМ АРМУВАННЯМ

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КЛЕЕНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ПАНЕЛЕЙ С РАЗЛИЧНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕ СЛОЕВ И ПОСЛОЙНЫМ АРМИРОВАНИЕМ

## EXPERIMENTAL STUDIES OF GLUED MULTI-LAYER WOODEN PANELS WITH VARIOUS LAYING OF LAYERS AND REINFORCEMENT

*Стоянов В.В. д.т.н., проф., Коршак О.М. к.т.н., доц., Бояджи А. А. к.т.н., ст. викл., Голубятникова М. А. магістр, Германова Л. Г. магістр  
(Одеська державна академія будівництва та архітектури)*

*Стоянов В.В. д.т.н., проф., Коршак О.М. к.т.н., доц., Бояджи А. А. к.т.н., ст. пр., Голубятникова М. А. магістр, Германова Л. Г. магістр  
(Одесская государственная академия строительства и архитектуры)*

*Stoyanov V.V. Dr.Sc. (Eng.), Prof., Korshak O. M. Cand. Sc. (Eng.), Assist. Prof., Boyadzhi A. O., Cand. Sc. (Eng.), Assist. Prof., Holubiatnikova M. O. masters, Germanova L. G. masters  
(Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture)*

**Анотація.** У статті досліджується напружено-деформований стан клеєних багатошарових дерев'яних панелей з взаємним розташуванням, що склеюються шарів під різними кутами (шари розташовуються під кутом  $90^\circ$  в першому варіанті досліджуваних конструкцій і  $45^\circ$  у другому) як з пошаровим армуванням металевою сіткою, так і без нього. Виконано аналітичний і чисельний розрахунок варіантів моделей, за результатами яких були обрані найбільш цікаві для експериментального дослідження. Експериментальне дослідження проводилося з визначенням поверхневих напружень електротензометричним методом і визначенням прогинів до повного руйнування конструкції під дією зосередженого навантаження в середині прольоту. Виконано аналіз результатів чисельних і експериментальних досліджень. Зроблено висновки.

**Аннотация.** В статье исследуется напряженно-деформированное состояние клееных многослойных деревянных панелей с взаимным расположением склеиваемых слоев под различными углами (слои располагаются под углом  $90^\circ$  в первом варианте исследуемых конструкций и  $45^\circ$  во втором) как с послойным армированием металлической сеткой, так и без него. Выполнены аналитический и численный расчеты вариантов моделей, по результатам которых были выбраны наиболее интересные для экспериментального исследования. Экспериментальное исследование проводилось с определением поверхностных напряжений электротензометрическим методом и определением прогибов до полного разрушения конструкции под действием сосредоточенной нагрузки в середине пролета. Выполнен анализ результатов численных и экспериментальных исследований. Сделаны выводы.

**Annotation.** The authors of the article study the stress-strain state of Cross-Laminated Timber (CLT) panels with the mutual arrangement of the glued layers at different angles above each to other (the layers are located at an angle of  $90^\circ$  in the first variant of the structures under investigation and  $45^\circ$  in the second) both with layered reinforcement by a metal grid and without

him. Analytic and numerical calculation in the ANSYS WORKBENCH 19 software package of various variants of models (including also variants of designs without changing angles between glued lamellae for comparison), the results of which selected the most interesting for the experimental study - variants with layer-by-layer reinforcement and  $90^\circ$  and  $45^\circ$ . To assess the influence of the position of the layers on strength, as well as the presence and absence of layer-by-layer reinforcement of CLT panels, two series of samples were tested. The constructions were made under the same conditions, the second grade pine was chosen as the material, the reinforcement was carried out by layer-by-layer reinforcement with a metal mesh with a cell of  $5 \times 5$  mm and a wire diameter of 0.5 mm. To obtain a reliable wood-mesh-wood compound, polyurethane glue was used. The experimental investigation was carried out with the determination of surface stresses by the electrotenometric method and determination of deflections. The experiment was carried out by stepwise loading of the structure with a concentrated load in the middle of the span to its complete destruction. Numerical and experimental studies have shown an increase in the load-bearing capacity of structures when the panels are glued at an angle and the use of layer-by-layer reinforcement with a steel mesh, as well as the significant influence of the quality of glued joints on the load-carrying capacity of glued wooden multilayer structures and the need to take this into account when making structures.

**Ключові слова.** Клеєні багатошарові панелі, межа міцності, поперечний вигин, пошарове армування, несуча здатність.

**Ключевые слова.** Клееные многослойные панели, предел прочности, поперечный изгиб, послойное армирование, несущая способность.

### Keywords

Glued laminated panels, tensile strength, transverse bending, layer-by-layer reinforcement, load-bearing capacity.

### Анализ последних исследований и публикаций

Леса Украины занимают 15,9 % территории страны [1], а темпы заготовки пиломатериала возрастают с каждым годом. Тем не менее древесину, практически, не используют в качестве материала несущих конструкций. Очевидно, что старые конструктивные формы деревянных элементов не обеспечивают пропуск современных нагрузок, нужны новые решения. Эта проблема успешно решается за рубежом. Таким образом, разработка новых деревянных несущих конструкций под современные большие нагрузки является одним из важных направлений применения древесины в гражданском и промышленном строительстве.

Исследования напряженно-деформированного состояния плитного пролетного строения в виде многослойной клееной деревоплиты из перекрестных досок методом конечных элементов, проведенные в [1], показало, что клееная деревоплита пролетом 9 м из девяти слоев досок толщиной 32 мм обладает несущей способностью современных пролетных строений. Максимальный прогиб этой конструкции составляет  $1/200$  длины пролета и допускается современными нормами. Исследование данной конструкции аналитическими методами теории упругости подтверждают сделанные выводы [1].

При разработке усиления КДК панелей в рамках научных исследований были проанализированы и рассмотрены статьи, связанные также с вопросами усиления КДК панелей.

### Определение цели и задачи исследования

Целью исследования является оценка влияния расположения слоев на несущую способность клееных многослойных деревянных панелей с послойным армированием металлической сеткой.

Для достижения поставленной цели определены задачи:

- аналитический расчет вариантов КДК панелей;
- разработка пространственных твердотельных моделей исследуемых конструкций;
- создание расчетных схем конструкций (ПК ANSYS Workbench 19.0), расчёт вариантов конструкций и анализ полученных результатов;
- изготовление экспериментальных образцов;
- испытание образцов и анализ полученных результатов;
- сравнение данных аналитических, численных и экспериментальных исследований.

### Основная часть исследования

Для оценки влияния расположения слоев на несущую способность клееных многослойных деревянных панелей с послойным армированием металлической сеткой, был произведен численный расчет и дальнейший анализ его результатов. Для расчета были созданы пространственные твердотельные модели конструкций, состоящие из пяти слоев деревянных досок, с направлением волокон древесины под углами  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  и вдоль пролета панели, выполненные с послойным армированием (рис.1). Для послойного армирования использовалась стальная сетка, которая в модели задавалась в виде пластины. Толщина пластины определялась из принятого допущения равенства моментов сопротивления поперечных сечений сетки и принятой в расчете пластины.

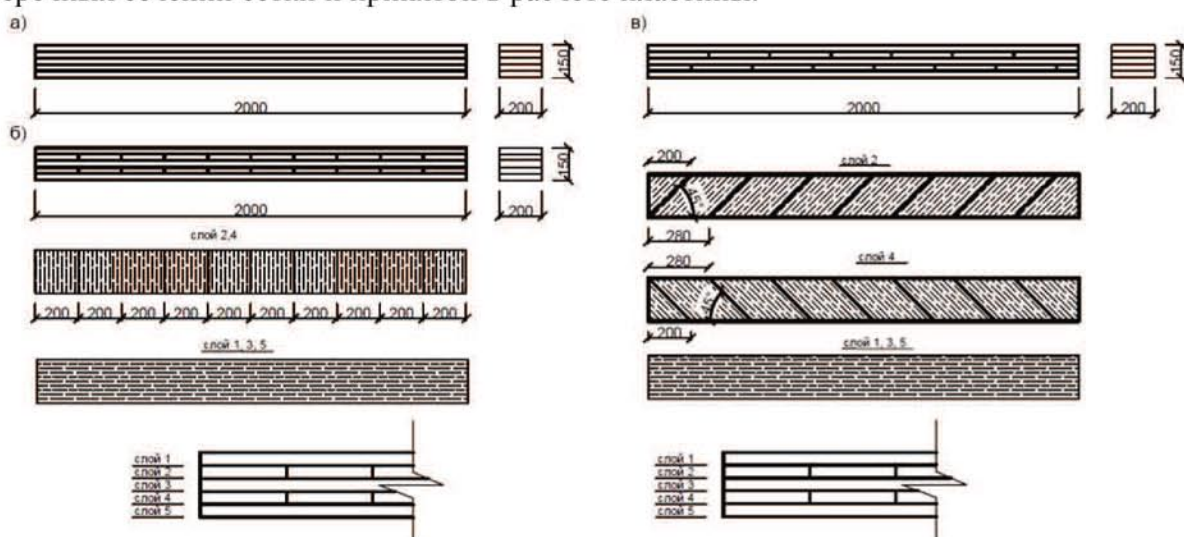


Рис. 1 Принципиальная схема конструкций

- а) - панель с расположением слоев вдоль пролета; б) - панель с расположением слоев крест-накрест; в) - панель с расположением слоев под  $45^\circ$

Статическая схема исследуемой конструкции представляет собой шарнирно опертую балку с сосредоточенной нагрузкой, приложенной в середине ее пролет. Опоры размещались с отступом в 100 мм от краев панели.

Анализ напряженно-деформированного состояния конструкций производился с помощью метода конечных элементов в ПК ANSYS WORKBENCH 19. При расчете использовался тип конечных элементов TET10.

Для выбранных типов конструкций был проведен расчет максимальных теоретических прогибов и максимальной несущей нагрузки основываясь на действующих нормах ДБН [1]. Результаты численного расчета панелей приведены в виде изополей распределения напряжений и перемещений в панели (рис. 2).

Согласно расчету, исчерпание несущей способности панели с расположением слоев крест-накрест наступает при нагрузке 12 кН, а панели с расположением слоев под  $45^\circ$  - 15 кН.

Предельное значение нормальных напряжений для древесины, с которым сравнивались напряжения, определенные при численном расчете, были определены согласно ДБН [2] составили  $1,152 \text{ кН/см}^2$ , максимальные прогибы - 14,8 мм.

Для дальнейшего изучения были выбраны варианты панелей с расположением слоев крест-накрест и  $45^\circ$ . Для последующего изучения напряженно-деформированного состояния этих КДК панелей, были проведены экспериментальные исследования в лаборатории кафедры МДиПК ОГАСА.

Для оценки влияния положения слоев на прочность, а также, наличия и отсутствия послойного армирования КДК панелей проводились испытания двух серий образцов. Конструкции изготавливались в одинаковых условиях, в качестве материала была выбрана сосна второго сорта, усиление выполнялось за счет послойного армирования металлической сеткой с ячейкой  $5 \times 5$  мм и диаметром проволоки 0,5 мм. Для получения надежного соединения древесина-сетка-древесина использовался полиуретановый клей. Предварительно просушенные и остроженные заготовки склеивались под прессом на протяжении 24 часов. Следует отметить, что влажность древесины при поклейке превышала рекомендуемую и составляла 22%. Для предварительной оценки работы конструкций были выполнены по 2 образца конструкций с ламелями, расположенными под углом  $90^\circ$  (П-1.1), (П-1.2) и  $45^\circ$  (П-2.1), (П-2.2) (схема по рис. 1б и 1в).

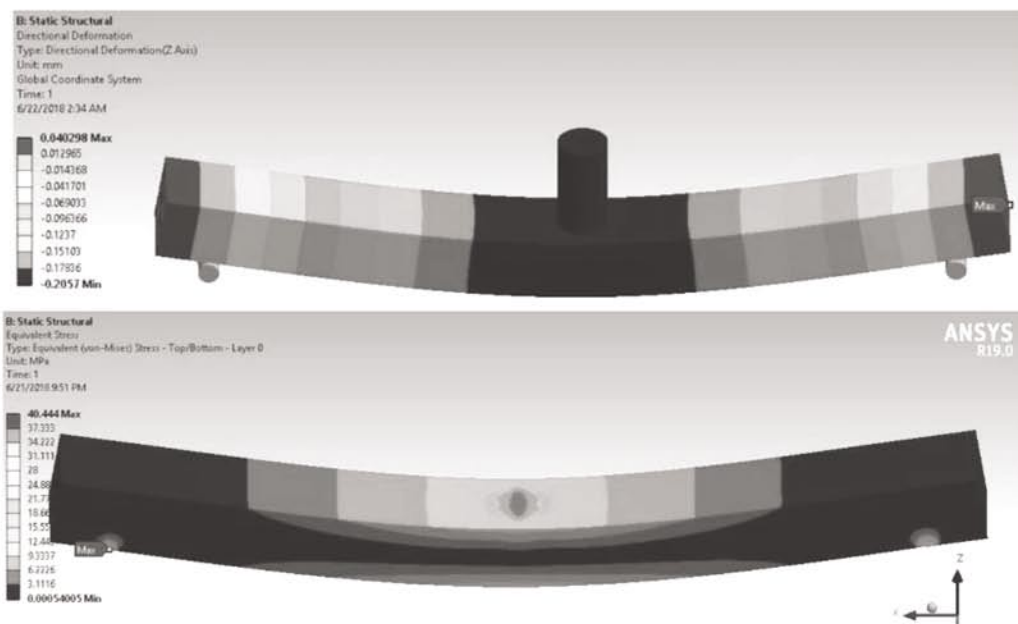


Рис. 3 Распределение эквивалентных напряжений (а) и прогибов (б) в панели со слоями, расположенными крест-накрест

Панели испытывали до разрушения (за разрушение принималось – появление трещин в ламели или клеевом шве с последующим непропорциональным развитию деформаций либо появление деформаций выше допустимых) при ступенчатом нагружении с использованием гидравлического домкрата на расстоянии 1000 мм от опор.

В качестве измерительной аппаратуры использовались прогибомеры, а также проволочные тензорезисторы с нормальным сопротивлением  $\approx 200$  Ом, подключенные к тензостанции. Общее количество датчиков составило 18 штук. Схема расположения датчиков и измерительной аппаратуры на панели приведена на рис. 4.

В процессе испытания панелей нагрузка прикладывалась ступенями по 3,6 кН, каждая ступень выдерживалась по 10 минут. Показания приборов снимались сразу после нагружения, а также после выдержки.

Панель П-1.1. нагружалась в 3 этапа по 3,6 кН. Разрушение произошло на 3 этапе нагружения при нагрузке 11 кН, по клеевому шву (рис. 6). Разрушение конструкции при нагрузке меньшей расчетной свидетельствует о низком качестве клеевого шва и важности соблюдения всех технических требований (влажность древесины, использование правильно подобранного клея, правильная технология поклейки) при изготовлении такого рода конструкций.

При испытании панели П-1.2. при нагрузке 7,2 кН произошло резкое увеличение деформаций вследствие частичного отслоения верхней ламели. Полное разрушение образца произошло на 6 этапе загрузения, при нагрузке более 20 кН при хрупком разрушении верхней доски клееного пакета (рис.6 а). Характер изменения относительных деформаций от нагрузки по данным тензодатчиков отображен на рис 7.

Нагружение панелей П-2.1 и П-2.2 происходило в 4 этапа по 3,6 кН. Незначительный разрыв по клеевому шву появился под нагрузкой 7,2 кН, трещины стали образовываться под нагрузкой 13 кН, полное же разрушение конструкции произошло при 14,5 кН. На рис. 7 видно смещение ламелей по отношению друг к другу, что указывает на то, что клеевой шов разрушился под действием сдвиговых напряжений.

### Выводы

1. Расчёты показали эффективность клееных многослойных панелей со слоями, расположенными под углом  $45^\circ$ . Несущая способность при изгибе клееных пятислойных деревянных панелей с послойным армированием со слоями, расположенными крест-накрест превышает прочность панелей с тем же количеством слоев, изготовленных из пиломатериалов того же сорта, но с другим расположением слоев. Максимальная несущая способность панели со слоями, расположенными под  $45^\circ$  по расчёту, выросла на 25% по сравнению с панелью со слоями крест-накрест.

2. Использование метода послойного армирования в исследуемых конструкциях позволило снизить деформативность таких конструкции на 10%.

3. Проведенные численные и экспериментальные исследования показали существенное влияние качества выполнения клеевых соединений на несущую способность клееных деревянных многослойных конструкций и необходимость учета этого обстоятельства при изготовлении конструкций.

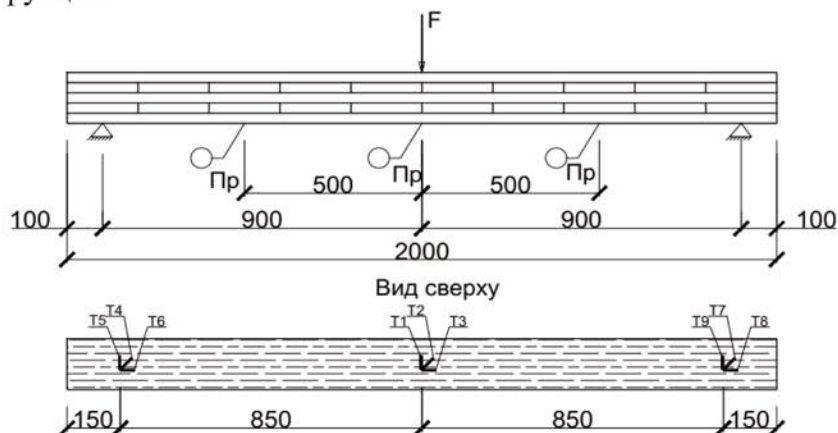


Рис.4 Схема загрузки и расположения измерительной аппаратуры.

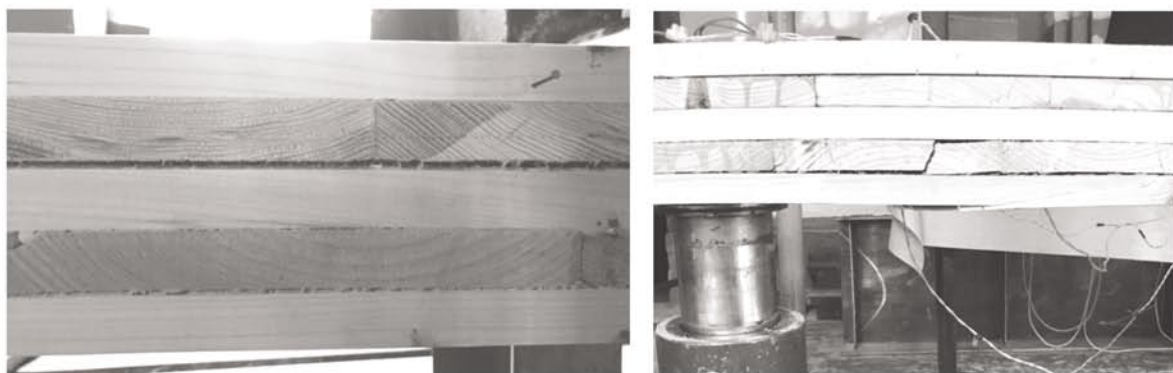


Рис. 6 Разрушение панелей а) П-1.1, б) П-1.2

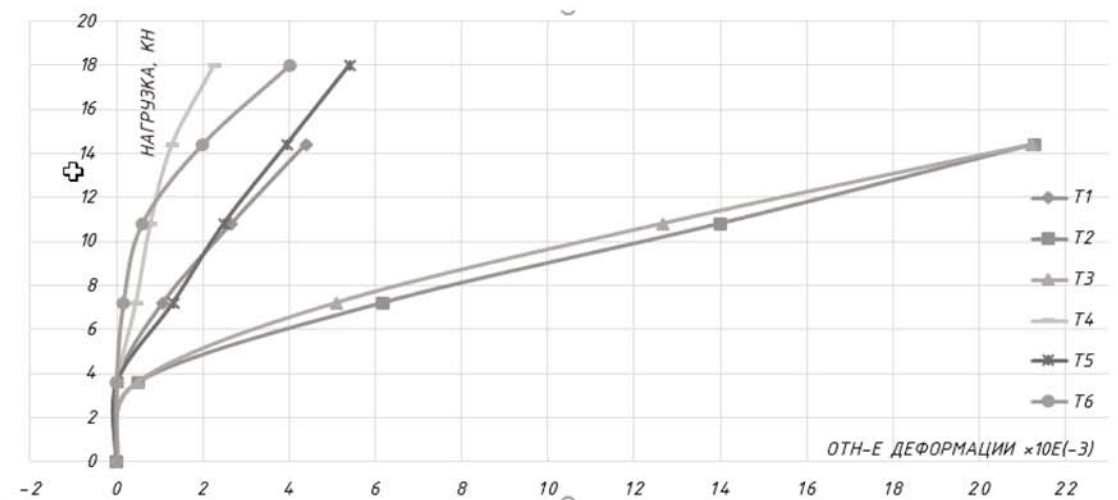


Рис. 7 Графік залежності відносних деформацій від прикладеної навантаження на панель П.1.2 по результатам експериментальних досліджень

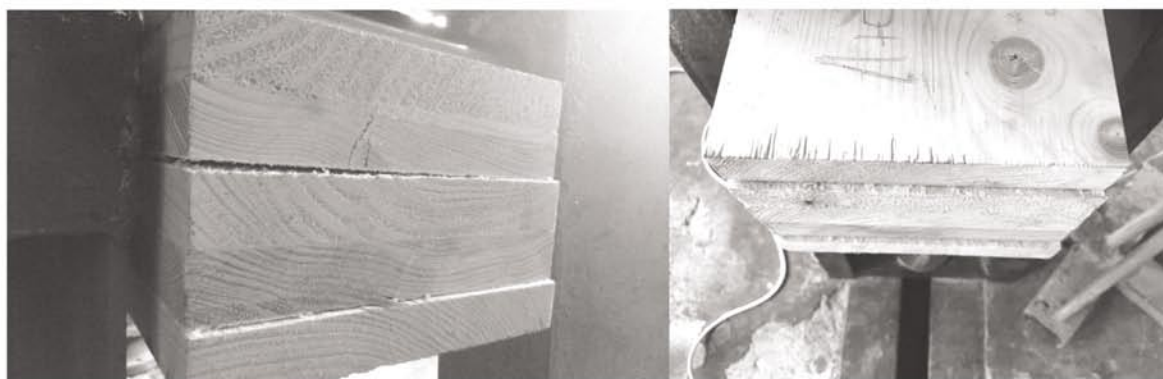


Рис. 7 Руйнування панелей  
а) П-2.1, б) П-2.2

### Література

1. Уткин В. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния пролетных строений мостов из многослойных дощато-клееных древесоплит / В. А. Уткин, Г. М. Кадисов // Международный научно-исследовательский журнал. — 2018. — № 1 (67) Часть 1. — С. 150—156.
2. ДБН В.2.6-161:2017 / ТОВ Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського. — Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017. — 117 с.
3. Серов Е.Н., Санников Ю.Д., Серов А.Е. Проектирование деревянных конструкций//Учебное пособие. — Москва, 2011.- 534с.
4. Шуко В.Ю., Рощина С.И. Клееные армированные деревянные конструкции //Учебное пособие. — Владимир, ВлГУ, 2008. - 82с.
5. Рощина С.И., Грязнов М.В., Щелокова Т.Н. Экспериментальные исследования армированных деревянных балок. // Современные строительные конструкции из металла и древесины. Часть II. — Одесса, ОГАСА, 2008. С. 4-8.
6. Золотухин Ю.Д. Испытание строительных конструкций. Выс.шк.-1983 г.
7. Тюрин Н.И. Введение в метрологию. Издательство стандартов. Москва 1973.
8. Стоянов В.В. Конструкции из дерева и пластмасс. Курс лекций. / Владимир Стоянов. — О.: ВРС, 2005.