

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ БОЛТОВОГО З'ЄДНАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ З КЛЕЄНОЇ ДЕРЕВИНИ НА МЕТАЛЕВИХ ПЛАСТИНАХ

Шехоркіна С.Є., к.т.н., доцент,

Придніпровська державна академія будівництва та архітектури

S\_VT@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4377-3746

**Анотація.** В статті приводяться результати теоретико-експериментальних досліджень роботи болтового з'єднання елементів з клеєної деревини на металевих пластинах під дією розтягуючого навантаження паралельно волокнам. З урахуванням чинних норм проектування визначено теоретичну несучу здатність з'єднання в залежності від можливої форми руйнування. В результаті випробувань отримано фактичне значення руйнівного навантаження, а також графік залежності деформацій зразка від величини навантаження. Експериментальне значення, відрізняється від теоретичних на 67.5 % та 11.3 %, відповідно. Встановлено, що основним параметром, який обумовив несучу здатність з'єднання, є міцність деревини на вдавлювання під поверхнею болта.

**Ключові слова:** болтове з'єднання, клеєна деревина, металева пластина, несуча здатність, розтяг.

**Введення.** На сьогоднішній день в багатьох країнах значної популярності набуло застосування будівельних конструкцій з використанням клеєної деревини. З використанням нових високотехнологічних виробів зводяться не лише традиційні складські та сільськогосподарські споруди або малоповерхові будівлі, але й багатоповерхові будинки, споруди складної форми та конфігурації. Поряд із стандартними, з'являється велика кількість сучасних з'єднувальних елементів для сполучення деревини з іншими матеріалами (бетоном, цеглою, металом). Поява сучасних видів та технологій виготовлення з'єднань дерев'яних конструкцій обумовлює необхідність проведення відповідних досліджень роботи під навантаженням, оцінки несучої здатності та деформативності.

**Аналіз останніх досліджень чи публікацій.** Дослідженням роботи з'єднань дерев'яних конструкцій присвячена велика кількість публікацій вітчизняних і закордонних авторів. Серед них слід відзначити роботи В.В. Стоянова, В. В. Фурсова, В. З. Кліменка, С.С. Гомона та багатьох інших вчених. Автори [1] приводять результати експериментально-теоретичних досліджень нагельних з'єднань дерев'яних конструкцій вздовж волокон. На основі отриманих даних запропонована методика оцінки несучої здатності розглянутого типу з'єднань. В роботі [2] досліджуються параметри деформативності з'єднання типу “сталь-деревина” балок під прямим кутом за допомогою сталевих пластин-підвісів на цвяхах. Виконано порівняльний аналіз отриманих даних відповідно до національних та європейських норм, а також приведені залежності “навантаження-деформація”. В роботі [3] описано методику та наведено результати експериментальних досліджень роботи дощатих арок зі з'єднаннями на металозубчатих пластинах. Методика та результати експериментальних досліджень роботи клеєгвинтових з'єднань дощатоклеєних елементів на зсув приведені в [4]. Автори [5] досліджують несучу здатність на згин болтового з'єднання частин збірної шарнірно обпертої балки та приводять графіки залежностей прогину від навантаження. В статті [6] приводяться результати експериментального визначення несучої здатності з'єднань з використанням різної кількості болтів при навантаженні паралельно та перпендикулярно волокнам. Порівняння з теоретичними даними згідно розрахункових методик показало, що норми дозволяють з достатньою точністю прогнозувати міцність болтових з'єднань.

Як показав аналіз досліджень, питання роботи болтових метало-дерев'яних з'єднань в публікаціях вітчизняних вчених висвітлені неповною мірою. З огляду на це, **метою роботи** є визначення несучої здатності та оцінка деформативності болтового з'єднання елементів з

клеєної деревини на сталевих пластинах при роботі на розтяг. Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні **завдання**: визначити теоретичну несучу здатність з'єднання; розробити методику та обладнання для проведення випробувань; отримати діаграму «навантаження-деформація» при послідовному збільшенні розтягуючого зусилля; визначити величину руйнівного навантаження та оцінити характер деформування болтового з'єднання.

**Матеріали та методика дослідження.** Зразок для дослідження виконаний у вигляді фрагменту реальної конструкції і являє собою дерево-металеву конструкцію, яка складається з клеєного дерев'яного бруса довжиною 750 мм, перерізом 120x120 мм та врізаної в масив деревини металевої пластини. Клеєний брус виготовлений з пиломатеріалів деревини сосни. Товщина пластини становить 6 мм, ширина - 80 мм. Спільна робота бруса та пластини забезпечується за рахунок 3 болтів діаметром 12 мм. Відстань між болтами в поздовжньому напрямку становить 140 мм, а від крайнього болта до грані бруса – 90 мм. Загальний вигляд зразка приведений на рис. 1.

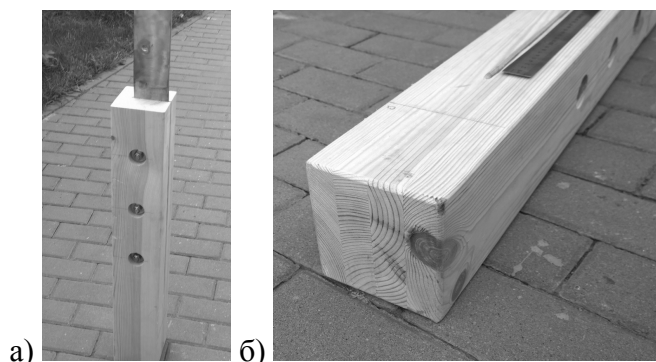


Рис. 1. Загальний вигляд зразка для випробувань (а) та вигляд в поперечному перерізі (б)

Теоретична несуча здатність нагельного з'єднання визначається згідно ДБН В.2.6-161:2017. Можливі форми руйнування нагельного з'єднання з двома площинами зрізу та сталеву пластину приведені на рис. 2.

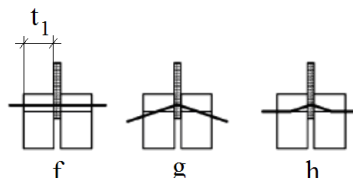


Рис. 2. Форми руйнування нагельного з'єднання з двома площинами зрізу та сталеву пластину: f, g та h – найменування форм руйнування згідно ДБН В.2.6-161:2017

Для з'єднання з двома площинами зрізу та сталеву пластину будь-якої товщини несуча здатність по кожній площині зрізу на один з'єднувальний елемент (болт) відповідно до форм руйнування може дорівнювати одному з наступних значень:

$$F_{v,Rk}^f = f_{h,k} t_1 d, \quad (1)$$

$$F_{v,Rk}^g = f_{h,k} t_1 d \left[ \sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,k} d t_1^2}} - 1 \right], \quad (2)$$

$$F_{v,Rk}^h = 1.15 \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,k} d}, \quad (3)$$

де  $t_1$  – товщина елемента з деревини;  $d$  - діаметр болта;  $f_{h,k}$  – характеристична міцність вдавнення з'єднувального елемента в масив деревини;  $M_{y,Rk}$  - характеристичний момент текучості.

Характеристичний момент текучості болта визначається за формулою:

$$M_{y,Rk} = 0.3 f_{u,k} d^{2.6}, \quad (4)$$

де  $f_{u,k}$  – характеристична міцність при розтягу болта.

Значення характеристичної міцності вдавнення з'єднувального елемента в масив деревини прийнято  $f_{h,k}=50\text{МПа}$  на основі випробувань, проведених в роботі [7]. Характеристична міцність при розтягу болта  $f_{u,k} = 500\text{МПа}$ .

Таблиця 1 – Теоретичні значення характеристик з'єднання

Характеристична міцність вдавнення	Характеристичний момент текучості болта	Теоретична несуча здатність з'єднання на один з'єднувальний елемент		
$f_{h,k}$ , МПа	$M_{y,Rk}$ , кН·мм	$F_{v,Rk}^f$ , кН	$F_{v,Rk}^g$ , кН	$F_{v,Rk}^h$ , кН
50	95.9	33.6	16.3	12.3

Враховуючи те, що в з'єднанні застосовується три болта очікуване руйнівне навантаження становитиме в межах від  $F_{min} = 36.9$  кН до  $F_{max} = 100.8$  кН.

Для виконання завдань експерименту була розроблена установка, що забезпечує навантаження зразка розтягуючим зусиллям до 150 кН. На рис. 3 показаний ескіз установки в зборі зі зразком.

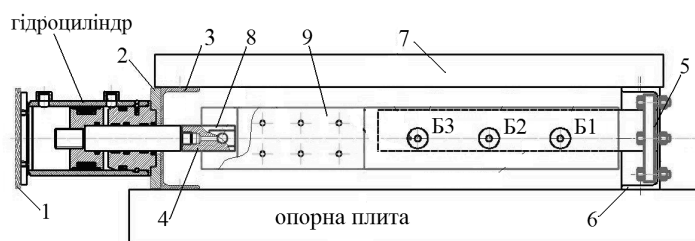


Рис. 3. Ескіз установки для дослідження зразка на розтяг (пояснення до позначень приведені у тексті)

Оскільки в експерименті планувалося використання високоточних датчиків переміщення, то установка розроблялася для монтажу на жорсткій опорній плиті. Установка містить гідроциліндр закріплений на пластині (поз. 1), що забезпечує його фіксацію на опорній пластині (поз. 2) швелера (поз. 3). Шток гідроциліндра проходить через отвір в швелері (поз. 3) і за допомогою головки (поз. 4) з'єднується з накладками (поз. 9) за допомогою штифта (поз. 8). Накладки розташовані по обидва боки дерев'яного бруса, виконані зі сталевих листів товщиною 12 мм і стягнуті 6 болтами М10. Протилежний кінець бруса фіксується за допомогою сталевих з'єднувальних пластин до швелера (поз. 6) і кріпиться через накладку (поз. 5) за допомогою 6-ти болтів М12. Швелери (поз. 3 та 6) в нижній частині кріпляться до опорної плити за допомогою високоміцного нарізного кріплення. Зверху швелери поз. 3 і 6 з'єднані розпірними кутниками (поз. 7). На рис. 4 показана установка в зборі, після монтажу на опорній плиті.

Для реєстрації переміщень в процесі впливу розтягуючого зусилля застосовувався датчик Honeywell Sensing and Control LTW05N05KF5C. Для цього була обрана точка в районі головки болта БЗ (рис. 3). При цьому чутливий елемент датчика не контактував з кріпильними елементами, а упирался в стінку фрезерованого отвору на відстані 9 мм від зовнішньої поверхні бруса. На рис. 5 показано розміщення датчика.

В процесі виконання експерименту в гідроциліндр подавалася гідрорідина з темпом наростання тиску 0.1 МПа/хв. При цьому йшла безперервна реєстрація даних, що надходять з датчиків тиску і переміщення. Реєстрація зусилля, що діє на зразок, виконувалася за допомогою контролю тиску в гідросистемі. З цією метою використовувався датчик тиску МД-150ТС. Величина зусилля визначалася шляхом множення значення тиску в гідроциліндрі на ефективну площу його поршня, яка у режимі розтягуючого навантаження складає 0.0103 м<sup>2</sup>.

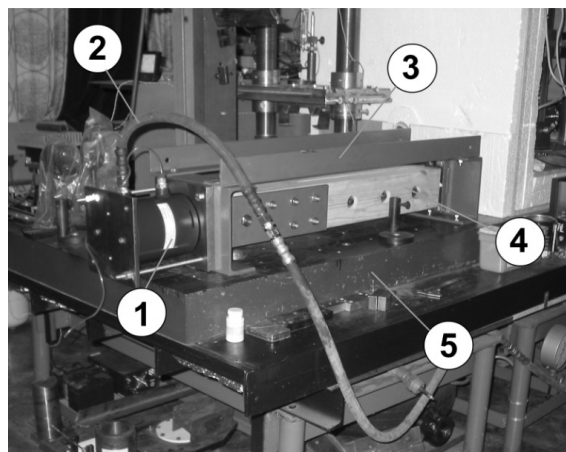


Рис. 4. Випробувальне оснащення в змонтованому вигляді: 1 –гідроциліндр; 2 - шланг гідросистеми; 3 – випробувальне оснащення; 4 - зразок; 5 - опорна плита

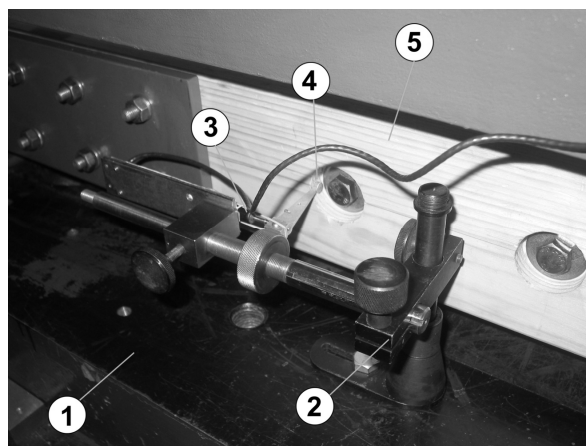


Рис. 5. Датчик осьового переміщення: 1 – опорна плита, 2 - кріплення датчика; 3 - датчик осьового переміщення, 4 - точка вимірювання переміщення, 5 - зразок

Дискретність опитування датчиків становила 1 с. Сигнали датчиків тиску і переміщення надходили на блок узгодження, з'єднаний з аналогово-цифровим перетворювачем, звідки після перетворення в цифрову форму передавалися в комп'ютер і записувалися на його жорсткий диск. Подальша обробка інформації проводилася програмними засобами, що забезпечують побудову таблиць і графіків за значеннями реєстрованих параметрів.

**Результати досліджень.** До досягнення тиску 7.5-8.0 МПа процес деформування проходив досить рівномірно, без будь-яких особливостей. Процес навантаження зразка супроводжувався випадковим потріскуванням, але візуально поява будь-яких ушкоджень не спостерігалася. При подальшому збільшенні навантаження податливість системи істотно зростає. Зростання тиску супроводжувалося безперервним тріском волокон деревини, що було обумовлено їх розривом. Руйнування зразка відбулося при навантаженні 113.7 кН. Отримане в результаті випробувань значення руйнівного навантаження та його порівняння з теоретичними значеннями приведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати випробування болтового з'єднання елементів з клеєної деревини на сталевих пластинах

Експериментальне значення, кН	Мінімальне теоретичне значення, кН	% різниці	Максимальне теоретичне значення, кН	% різниці
113.7	36.9	67.5	100.8	11.3

Як видно з табл. 2 мінімальне теоретичне значення несучої здатності болтового з'єднання елементів з клеєної деревини на сталевих пластинах на 67.5 % відрізняється від експериментального, тоді як максимальне значення – на 11.3 %. Таким чином, основним параметром, що обумовлює несучу здатність з'єднання є міцність деревини на вдавлювання під поверхнею болта.

В результаті випробувань було отримано графік залежності «навантаження-переміщення», який приведено на рис. 6. Як видно з графіка, процес деформування зразка починається з локального обминання при значенні навантаження до 20 кН, після чого спостерігається близька до лінійної ділянка. Поява нелінійних деформацій відповідає навантаженню близько 80 кН і зумовлена згинанням болтів.

Після завершення експерименту було проведено розбирання зразка і дефектація складових елементів (рис. 7). За результатами аналізу згину болтів можна припустити, що в конструкції достатньо рівномірно відбувається перерозподіл зусиль.

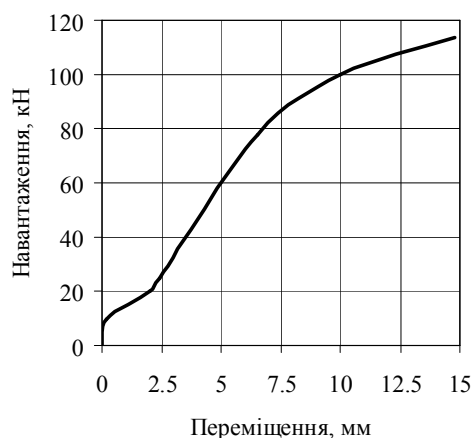


Рис. 6. Графік залежності деформацій зразка від величини розтягуючого навантаження

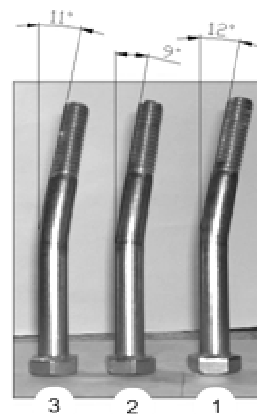


Рис. 7. Зміна форми болтів в результаті згину під дією навантаження

**Висновки.** З метою визначення несучої здатності та оцінки деформативності проведені випробування на розтяг паралельно волокнам болтового з'єднання елементів з клеєної деревини на металевих пластинах. В результаті експерименту отримано значення руйнівного навантаження, яке склало 113.7 кН, а також графік залежності деформацій зразка від величини розтягуючого навантаження. Робота зразка при значенні навантаження до 80 кН характеризується близькою до лінійної залежністю, після чого виникають нелінійні деформації, зумовлені згинанням болтів. Аналіз форми згину болтів дозволяє припустити, що в конструкції перерозподіл зусиль відбувається рівномірно.

З урахуванням чинних норм визначені теоретичні значення несучої здатності з'єднання відповідно до можливих форм руйнування, які склали  $F_{min} = 36.9$  кН та  $F_{max} = 100.8$  кН. Експериментальне значення, відрізняється від теоретичних, на 67.5 % та 11.3 %, відповідно. Згідно отриманих даних, основним параметром, що обумовлює несучу здатність з'єднання, є міцність деревини на вдавлювання під поверхнею болта.

### Література

1. Гомон С. С., Алексієвець В. І. Робота та розрахунок сталевих нагельних з'єднань дерев'яних конструкцій за повторних навантажень: монографія. Рівне, 2013. 111 с. [Електронний ресурс] <http://ep3.nuwm.edu.ua/1725/1/732819%20zah.pdf> (дата звернення: 08.05.2020).
2. Була С. Деформативність вузлів дерев'яних конструкцій на з'єднаннях типу “сталь-деревина”. *Вісник національного університету “Львівська політехніка”. Серія: Теорія і практика будівництва*. Львів : Видавництво Львівської політехніки. 2017. № 877. С. 18–24. [Електронний ресурс] <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntb/44217> (дата звернення: 08.05.2020).
3. Демчина Б. Г., Шидловський Я. М. Дослідження міцності та деформативності дощатих арок на металозубчатих пластинах. *Містобудування та територіальне планування*. 2016. Вип. 61. С. 164-172. [Електронний ресурс] [http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP\\_2016\\_61\\_24](http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2016_61_24) (дата звернення: 08.05.2020).
4. Кислюк Д. Я., Чапук О. С. Дослідження роботи клеєметалевих з'єднань елементів дерев'яних конструкцій. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2018. Вип. 9. С. 63-69. [Електронний ресурс] [http://nbuv.gov.ua/UJRN/stmrb\\_2018\\_9\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/stmrb_2018_9_11) (дата звернення: 08.05.2020).
5. Lesmana C., Suhendi S. Experimental investigation of connection performance for prefabricated timber beam. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 69. [Електронний ресурс] <https://doi.org/10.1088/1755-1315/69/1/012113> (дата звернення: 08.05.2020).

6. Gattesco N., Toffolo I. Experimental study on multiple-bolt steel-to-timber tension joints. *Materials and Structures*, 2004. Vol. 37(2), P. 129–138. [Електронний ресурс] <https://doi.org/10.1007/BF02486609> (дата звернення: 08.05.2020).

7. Шехоркіна С. Є., Кесарійський А. Г. Дослідження особливостей деформування та міцності деревини на вдавнення із застосуванням методу голографічної інтерферометрії. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2019. № 4. С. 93-99. [Електронний ресурс] <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/180667/180683> (дата звернення: 08.05.2020).

## References

- [1] S. S. Homon, V. I. Aleksiievets, “Robota ta rozrakhunok stalevykh nahelnykh ziednan derevianykh konstruksii za povtornykh navantazhen” : monohrafiia. Rivne, 2013. 111 pp. Available: <http://ep3.nuwm.edu.ua/1725/1/732819%20zah.pdf>. Accessed on: May 08, 2020.
- [2] S. Bula, “Deformatyvnist vuzliv derevianykh konstruksii na ziednanniakh typu “stal-derevyna”, *Visnyk natsionalnoho universytetu “Lvivska politekhnika”. Serii: Teoriia i praktyka budivnytstva*. Lviv : Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki, 2017, № 877, pp. 18–24. Available: <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntb/44217>. Accessed on: May 08, 2020.
- [3] B. H. Demchyna, Ya. M. Shydlovskiy, “Doslidzhennia mitsnosti ta deformatyvnosti doshchatykh arok na metalozubchatykh plastynakh”, *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, 2016, Vol. 61, pp. 164-172. Available: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP\\_2016\\_61\\_24](http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2016_61_24). Accessed on: May 08, 2020.
- [4] D. Ya. Kysliuk, O. S. Chapiuk, “Doslidzhennia roboty kleimetalevykh ziednan elementiv derevianykh konstruksii”, *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*, 2016, Vol. 61, pp. 164-172. Available: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP\\_2016\\_61\\_24](http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2016_61_24). Accessed on: May 08, 2020.
- [5] C. Lesmana, S. Suhendi, «Experimental investigation of connection performance for prefabricated timber beam», *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 69. Available: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/69/1/012113>. Accessed on: May 08, 2020.
- [6] N. Gattesco, I. Toffolo, “Experimental study on multiple-bolt steel-to-timber tension joints”, *Materials and Structures*, 2004, Vol. 37(2), P. 129–138. Available: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/69/1/012113>. Accessed on: May 08, 2020.
- [7] S. Ye. Shekhorkina, A. H. Kesariiskiy, “Doslidzhennia osoblyvosti deformuvannia ta mitsnosti derevyny na vdavlennia iz zastosuvanniam metodu holohrafichnoi interferometrii”, *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, 2019. № 4. pp. 93-99. Available: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/180667/180683>. Accessed on: May 08, 2020.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БОЛТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ КЛЕЕНОЙ ДРЕВЕСИНЫ НА СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИНАХ

Шехоркина С.Е., к.т.н., доцент,

«Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»

S\_VT@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4377-3746

**Аннотация.** В настоящее время в мире большую популярность приобрело применение деревянных конструкций. Появление современных видов и технологий изготовления соединений элементов деревянных конструкций обуславливает необходимость проведения соответствующих исследований работы под нагрузкой, теоретической и экспериментальной оценки несущей способности и деформативности.

В статье приводятся результаты теоретико-экспериментальных исследований работы болтового соединения элементов из клееной древесины на металлических пластинах под действием растягивающей нагрузки параллельно волокнам.

Для исследования был принят образец, состоящий из клееного деревянного бруса длиной 750 мм сечением 120x120 мм и врезанной в массив древесины стальной соединительной пластины. Совместная работа бруса и пластины обеспечивается за счет трех болтов диаметром 12 мм. Клееный брус изготовлен из пиломатериалов древесины сосны.

Разработана методика проведения эксперимента. В результате испытаний получено фактическое значение разрушающей нагрузки, которое составило 113.7 кН, а также график зависимости деформаций образца от величины растягивающей нагрузки. Работа образца при значении нагрузки до 80 кН характеризуется близкой к линейной зависимостью. При больших значениях нагрузки проявляются нелинейные деформации, обусловленные изгибом болтов. Анализ формы изгиба болтов позволяет предположить, что в соединении перераспределение усилий происходит равномерно.

С учетом действующих норм проектирования определены теоретическую несущую способность соединения согласно возможных форм разрушения. Экспериментальное значение, отличается от теоретических на 67.5% и 11.3%, соответственно. Установлено, что основным параметром, который обусловил несущую способность соединения, является прочность древесины на вдавливания под поверхностью болта.

**Ключевые слова:** болтовое соединение, клееная древесина, металлическая пластина, несущая способность, растяжение.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF BOLTED TIMBER CONNECTIONS WITH STEEL PLATES

**Shekhorkina S.Yev.**, Ph.D., Associate Professor,  
*«Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture»*  
S\_VT@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4377-3746

**Abstract.** Currently, the use of timber building structures has gained great popularity in the world. The appearance of modern types and technologies for the manufacturing of joints of timber structures elements makes it necessary to conduct corresponding studies of its behaviour under load, as well as theoretical and experimental assessment of load-bearing capacity and deformability.

The article presents the results of theoretical and experimental studies of the performance of the bolted connection of glued timber elements with metal plates under the action of a tensile load parallel to the fibers.

A sample consisting of a glued timber beam 750 mm long with cross-section dimensions of 120x120 mm and a connecting steel plate embedded in a solid wood was adopted for the study. The joint work of the beam and the plate is ensured by three bolts with a diameter of 12 mm. Glued laminated timber is made of pine wood lumber.

The technique for the experiment was developed. As a result of the tests, the actual value of the failure load equal to 113.7 kN was obtained, as well as a diagram of the dependence of the deformation of the sample on the magnitude of the tensile load. The behaviour of the sample under a load up to 80 kN is characterized by a close to linear dependence. At larger values of the load, nonlinear deformations occur due to the bending of the bolts. An analysis of the shape of the bending of the bolts allows suggesting the uniform redistribution of the inner forces of the connection.

Taking into account the current design standards, the theoretical bearing capacity of the joint was determined according to the possible forms of failure. The experimental value differs from theoretical by 67.5% and 11.3%, respectively. It is established that the main parameter that has determined the bearing capacity of the connection is the embedment strength of the wood under the surface of the bolt.

**Keywords:** bolted connection, glued laminated timber, metal plate, load-bearing capacity, tension.