

УДК 624.011

### ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ МІЦНОСТІ З'ЄДНАНЬ НА ВКЛЕЄНИХ СТЕРЖНЯХ У CLT ПАНЕЛЯХ

Кандидати техн. наук А. М. Бідаков, О. М. Пустовойтова,  
аспіранти Є. А. Распопов, Б. О. Страшко

### NUMERICAL ANALYSIS OF JOINTS STRENGTH WITH GLUED-IN STEEL RODS BARS IN CLT PANELS

PhD (Tech.) A. Bidakov, PhD (Tech.) O. Pustovoitova, postgraduate student I. Raspopov,  
postgraduate student B. Strashko

---

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.188.2019.206085>

---

*Аналіз результатів міцності з'єднань на клеєних стержнях на висмикування, які встановлені у поперечному перерізі ПКД або CLT панелі, показав нові результати, які важко було передбачити з урахуванням значної практики використання клеєних стержнів у цільній та клеєній деревині. Оскільки ПКД панелі являють собою складну багатошарову структуру з дощок зі взаємно перпендикулярним їх розташуванням у суміжних шарах, то виникли нові граничні умови для стержнів, коли вони можуть бути розташованими на межі поздовжньої та поперечної дощок. Для оцінки достовірності отриманих експериментальних даних [1] виконано аналітичні дослідження у програмному комплексі Ansys для всіх можливих місць розташування стержнів у поперечному перерізі ПКД панелі, що можуть впливати на величини міцності, з урахуванням пружної моделі анізотропії деревини.*

**Ключові слова:** клеєні сталеві стержні, збірні панелі, міцність на висмикування, поперечна клеєна деревина, ПКД, CLT, з'єднання, скінченні елементи, розрахунок, Ansys.

*New types of wood-based building materials, one of which is CLT, require an accurate assessment of the strength of various types of joints. Connections of CLT panels on glued-in steel rods have great interest in connection with the development of prefabricated modular buildings with high factory accuracy of mating joints parts. Glued-in steel rods are very effective type of rigid and semi-rigid joints in GLT elements of different constructions and allow produce structural elements with high level of prefabrication for fast and reliable installation of timber buildings.*

*Positive experience of using glued-in steel rods during large period in timber constructions in Eastern Europe praxis seems effective in joints of cross laminated timber (CLT) panels.*

*The results of the strength of the glued-in rods by pull-pull tests, which were installed in the cross section of the CLT panel, showed new results that were difficult to predict by taking into account practice of using glued-in steel rods in solid and glued laminated timber. Cross laminated timber panels are a complex multilayer structure of boards with mutually perpendicular to their location in adjacent layers create new boundary conditions for the rods, when they can be located at the boundary of the longitudinal and transverse boards. In order to evaluate the reliability of the obtained experimental data were performed analytical studies in the Ansys software for all possible locations of rods in the cross section of the CLT panel, which may affect the strength values, taking into account elastic anisotropy of wood. Analysis of the glued-in rods strength by pulling, depending position in the cross-section, is the same as described in paper of prof. H. J. Blass (2007) where the positions of axially loaded self-tapping screws were varied.*

**Keywords:** *glued-in steel rods, prefabricated panels, shear strength, cross laminated timber, CLT, connections, finite element modeling, calculation, Ansys software.*

**Вступ.** Швидке та стабільне зростання використання деревини як будівельного матеріалу спостерігається на житлових та офісних будівлях (рис. 1), що складаються з ПКД або CLT панелей різних товщин. Завдяки перехресній структурі шарів дощок ПКД панелі, з'єднання їх поперечних перерізів є новою складною задачею, яка потребує врахування неоднорідної структури дощок різних товщин та наявність технологічних особливостей у вигляді щілин між дошками і компенсаційних пропилів. Оскільки ПКД панель є як стіновим, так і елементом перекриття багатоповерхових будівель, то при розробці вузлів з'єднань необхідно враховувати тип з'єднувальних панелей. У європейських країнах найбільш

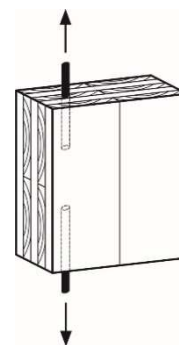
розповсюдженими є з'єднання на гвинтах, через незначну трудомісткість у порівнянні з вклеєними стержнями, які мають велику популярність у пострадянських країнах і є більш вигідним конструктивним рішенням, ніж використання гвинтів. Для впровадження системи вклеєних стержнів для з'єднання ПКД панелей запропоновано універсальне з'єднання на вклеєних стержнях, показано на рис. 1, б, для якого були виконані дослідження стержнів на висмикування (рис. 1, в) у п'яти різних характерних точках поперечного перерізу (рис. 1, г). Досліджені точки розташування стержня можуть впливати на величину міцності, що було досліджено на 75 зразках для трьох діаметрів вклеєних стержнів з однаковою глибиною вклеювання стержня.



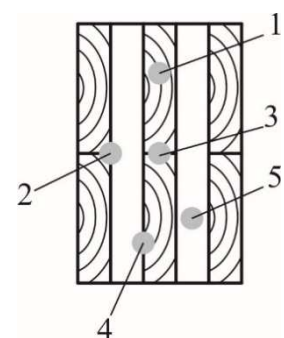
а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Багатоповерхова будівля з ПКД панелей та вузол на вклеєних стержнях і схема виконаних досліджень: а – будівля з ПКД панелей; б – вузол на вклеєних стержнях; в – схема випробувань; г – досліджені точки вклейки стержнів

Моделювання та розрахунок напружень і деформацій експериментально досліджених зразків з ПКД або CLT виконувались у програмному комплексі ANSYS. При моделюванні зразків дотримувалися всі геометричні параметри та структура ПКД панелі з її технологічними особливостями, а саме склеювання бокових граней дощок та їх взаємно перпендикулярне розташування у суміжних шарах дощок. Відповідно пружні характеристики дощок задавалися з урахуванням напрямку волокон, що спостерігається у результатах розрахунків напружень і деформацій. Пружні характеристики деревини зразків з ПКД панелей були прийняті аналогічно до досліджень В. Azinovic, E. Serrano [2] та дисертаційної роботи С. Sandhaas [5] для деревини хвойних порід, а саме сосни: модуль пружності вздовж волокон  $E_1=1100$  МПа, модуль пружності поперек волокон  $E_2=370$  МПа,  $E_3=370$  МПа, модуль зсуву  $G_1=G_2=690$  МПа та  $G_3=50$  МПа, коефіцієнти Пуассона  $\nu_1=0,4$ ,  $\nu_2=0,4$  та  $\nu_3=0,45$ . Пружні характеристики клею також були запозичені з низки робіт і мали такі значення:  $E=7000$  МПа,  $G=2600$  МПа,  $\nu=0,25$ . Пружні характеристики сталі приймалися за сертифікатом, значення яких були підтверджені при перевірних випробуваннях шпильок.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз показників міцності з'єднання на вклеєних стержнях на висмикування у цільній деревині [1], ЛВЛ брусі та клеєній деревині досить детально виконаний, і лише протягом останніх двох років з'єднання на вклеєних стержнях почали досліджуватись у ПКД панелях, які є новим будівельним матеріалом для будівництва багатоповерхових житлових будівель. На сьогоднішній день відомі

дослідження вклеєних стержнів у ПКД панелях у дипломній роботі М. Andersen та М. Hoier [9], а також у публікаціях В. Azinovic [2, 10, 11]. Питання, розглянуті у цих публікаціях, не вирішують питання впливу місця розташування стержня у поперечному перерізі ПКД панелі на величину несучої здатності з'єднання.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Отримання кількісних та якісних величин розподілу напружень і деформацій у ПКД панелях при висмикуванні вклеєних стержнів, що встановлені у різні характерні точки поперечного перерізу панелі. Для досягнення поставленої мети виконано аналітичні розрахункові моделі з використанням об'ємних скінченних елементів та використано пружні характеристики деревини виходячи з анізотропії матеріалу, а саме розглядається транслопна пружна модель деревини.

**Основна частина дослідження.** Чисельний аналіз виконувався для всіх 5 запропонованих і досліджених місць розташування вклеювання стержня у поперечному перерізі ПКД панелі. Дані, отримані в результаті розрахунку, залежать від низки таких параметрів, як розмір сітки і вид її розбиття, тип скінченного елемента і т. д. Також важливим аспектом є набір пружних характеристик матеріалів, що входять до складу конструкції, а саме їх відповідність реальності даної конструкції. Схеми трьох з п'яти моделей зразків та схему розбиття сітки об'ємних скінченних елементів показано на рис. 2. При створенні моделей та виконанні розрахунків враховувались досліди та методики, сформульовані закордонними колегами [3, 4] при дослідженні різних факторів, що впливають на величини міцності з'єднань на вклеєних стержнях. Також при створенні

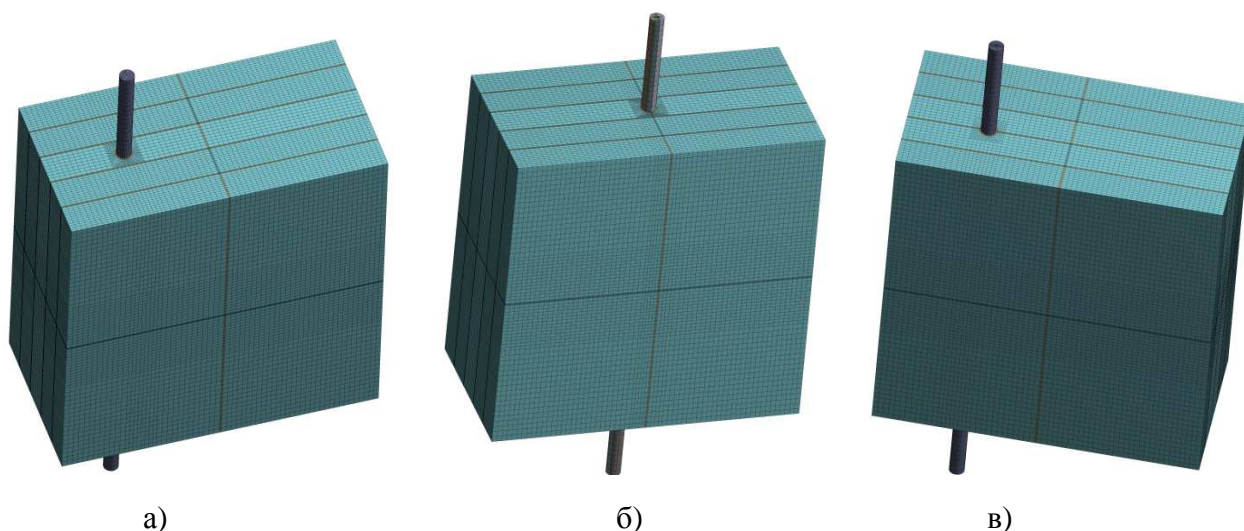
аналітичної розрахункової моделі з об'ємних скінченних елементів взято до уваги працю E. Serrano [8, 9] та дипломну роботу [6].

У розрахунковій моделі балки використовувався восьмивузловий просторовий анізотропний скінченний елемент SOLID 64. Розмір сітки генерувався не автоматично, а із заданими параметрами. Для розрахунку були прийняті скінченні елементи у вигляді паралелепіпедів зі сторонами  $4 \times 2 \times 2$  см. У зоні вклеювання стержнів, на ділянці  $30 \times 30$  мм, виконувалось згущення сітки за радіальними напрямками до центру стержня (рис. 2, г).

Величина деформації при руйнуванні з'єднання на вклеєних стержнях у різних матеріалах на основі деревини складає до 2 мм і залежить від такого ряду факторів, як діаметр стержня, глибина вклейки та товщина клейового шару. На рис. 3 показані ізополю деформацій при рівні навантаження 10 кН (рис. 2, д) для деяких схем вклейки стержнів у поперечний переріз ПКД панелі. Оскільки руйнування з'єднань на вклеєних стержнях реалізується при сколюванні деревини вздовж стержня і має крихкий характер, що небажано, то можливо його уникати шляхом поперечних підсилень вклеєними стержнями або

гвинтами. Руйнування металевого стержня не допустиме, тому несуча здатність з'єднання має бути меншою, ніж міцність металевого стержня на розтяг. Деформативність усіх розглянутих стержнів при випробуваннях відрізнялась на усьому інтервалі навантаження до руйнування і складала не більше ніж 10-15%. Аналогічні дані отримано при аналітичних розрахунках.

Для складання технічних рекомендацій щодо проектування вузлових з'єднань на вклеєних стержнях у поперечному перерізі ПКД панелі при навантаженні вздовж осі стержня розглядалися додаткові ситуації локації стержнів, порушуючи вимоги мінімальних відстаней між осями стержнів та від осі стержня до бічних граней, які визначені для цього типу з'єднання у клеєній та цільній деревині. Як правило, мінімальні відстані є кратними діаметрам вклеєних стержнів або діаметрам отворів у деревині та складають від 2 до 5 діаметрів залежно від властивостей матеріалу на основі деревини (цільна деревина, клеєна деревина, ЛВЛ брус). На рис. 4 показано випадок близького розташування стержня до бічної грані ПКД панелі та напруження, які виникають у такому випадку.



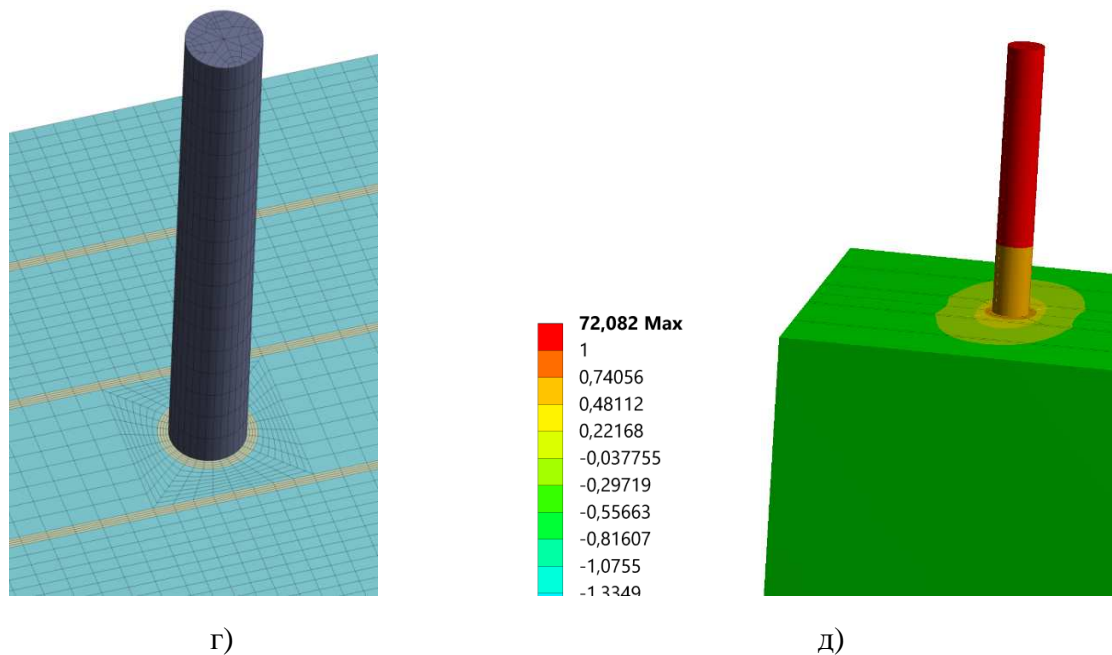
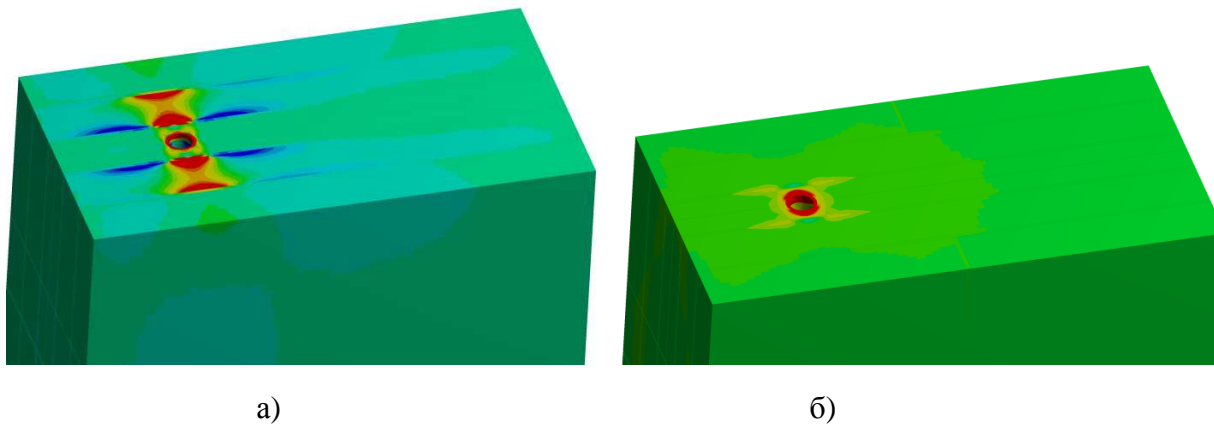


Рис. 2. Схеми моделей зразків з різними місцями розташування вклеєних стержнів та схема розбиття сітки об'ємних скінченних елементів навколо стержня:

- а – схема 1 – вздовж волокон в одній дошці;
- б – схема 3 – на межі двох паралельних дощок;
- в – схема 4 – на межі паралельної і перпендикулярної дошки;
- г – схема розбиття сітки біля стержня; д – деформація стержня за схемою 1





в)

Рис. 3. Характер розподілу нормальних напружень для зразка з розташуванням вклеєного стержня за схемою 1:

а – нормальні напруження по осі X; б – нормальні напруження по осі Y; в – нормальні напруження по осі Z

Аналіз розподілу напружень для стержнів, установлених у крайні дошки, є важливим питанням, оскільки розподіл напружень у поперечному перерізі ПКД панелі значно залежить від напрямку дощок, в які вклеєний стержень, та товщини дощок суміжних поперечних шарів. Виконані дослідження вказують на те, що небажано виконувати вклеювання стержнів у крайні дошки, навіть при встановленні групи вклеєних стержнів, що також потребує додаткових комплексних варіативних експериментальних досліджень для формулювання конструктивних вимог щодо компонування вузлів на вклеєних стержнях у ПКД панелях.

**Висновки.** На основі експериментальних досліджень міцності вклеєних стержнів у поперечному перерізі ПКД або CLT панелі [1] встановлено зміну міцності з'єднань на вклеєних стержнях залежно від діаметра металевих стержнів та його місця розташування у поперечному перерізі,

якому характерно чергування взаємно поперечних шарів дощок. Різниця між результатами, отриманими при випробуваннях натурних моделей зразків ПКД панелей з вклеєними стержнями, і результатами, отриманими в програмному комплексі ANSYS, не перевищують 13 %, що показує високу збіжність даних для дерев'яних конструкцій і підтверджує правильність обраної розрахункової моделі. Така висока збіжність між експериментальними та аналітичними розрахунковими даними дає можливість використовувати розрахункові комплекси для оцінки несучої здатності та деформативності вклеєних стержнів.

Для впровадження вклеєних стержнів у вузлових з'єднаннях ПКД панелей необхідно виконання досліджень міцності групи вклеєних стержнів і відповідно розробка рекомендацій про мінімальні відстані між стержнями і від стержнів до граней поперечного перерізу ПКД.

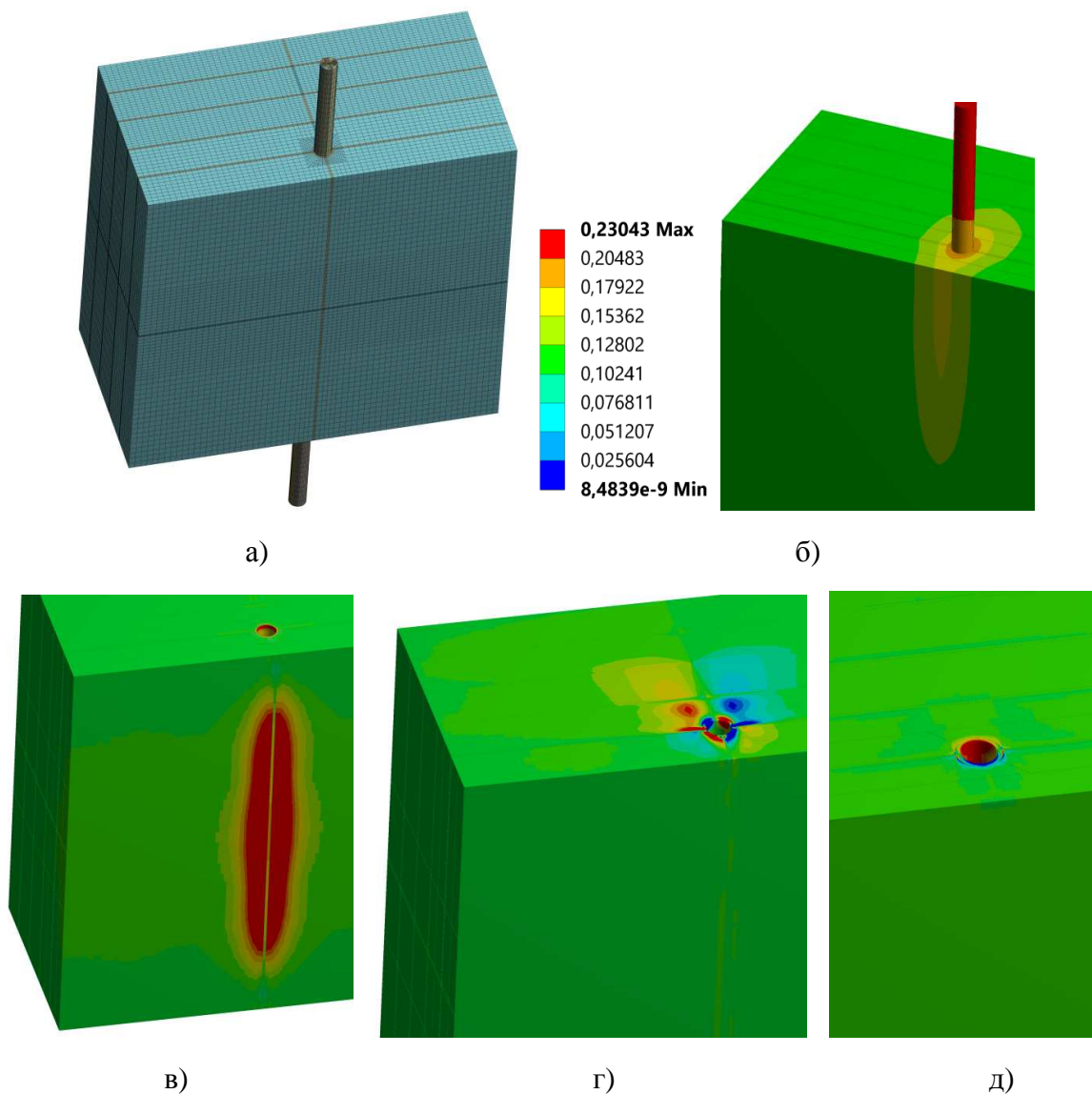


Рис. 4. Розподіл напружень і деформацій для стержня, розташованого близько до бічної грані:  
а – геометрична модель; б – розподіл деформацій; в – нормальні напруження по осі Z;  
г – дотичні напруження у площині XY; д – дотичні напруження у площині YZ

#### Список використаних джерел

1. Bidakov A., Raspopov I., Strashko B. Withdrawal resistance of glued-in steel rods by pull-pull tests in CLT. Proceedings of the 1st Eastern Europe Conference on Timber Constructions. Kharkiv. Kharkiv, 2018. P. 87-97.
2. Azinović B. Glued-in rods in CLT". Short Term Scientific Mission (STSM) Report. COST Action FP1402: Basis of Structural Timber Design – from research to standards, 2018. 40 p.
3. Stepinac M., Bidakov A., Jockwer R., Rajcic V. Review and evaluation of design approaches for glued-in rods in East and West Europe. World Conference on Timber Engineering, August 20-23, 2018, Seoul, Republic of Korea.
4. Stepinac, M., Hunger, F., Tomasi, R., Serrano, E., Rajcic, V. & van de Kuilen, J., 2013.

Comparison of design rules for glued-in rods and design rule proposal for implementation in European standards, Vancouver: International Council for Research and Innovation in Building and Construction.

5. Sandhaas, C. Mechanical behavior of timber joints with slotted-in steel plates. Dissertation, University of Technology Delft, The Netherlands, 2012.

6. Feldt P., Thelin A. Gluer-in rods in timber structures. Finite element analyses of adhesive failure. Master's thesis in structural engineering. Department of architectural and civil engineering, Chalmers university of technology, Gothenburg, Sweden, 2018.

7. Serrano E. Adhesive joints in timber engineering – modelling and testing of fracture properties. Doctoral Thesis, Department of Mechanics and Materials, Structural Mechanics, Lund University, Sweden, 2000. 193 p.

8. Serrano E (2001) Glued-in rods for timber structuresa 3D model and finite element parameter studies. *Int J Adhes Adhes* 21(2):115–127.

9. M. Andersen, M. Høier, Glued-in Rods in Cross Laminated Timber, Master's Thesis, Aarhus University, 2016.

10. B. Azinovic', E. Serrano, M. Kramar, T. Pazlar, Experimental investigation of the axial strength of glued-in rods in cross laminated timber, *Mater. Struct.* 51 (2018), URL: <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1268-y>.

11. Azinovic' B., Danielson H., Serrano E., Kramar M. Glued-in rods in cross laminated timber – Numerical simulations and parametric studies. *Construction and building materials*, Volume 212-Jul 10, 2019.

---

Бідаков Андрій Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. Тел. (057) 707-31-07.

E-mail: [bidakov@kname.edu.ua](mailto:bidakov@kname.edu.ua).

Пустовойтова Оксана Михайлівна, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. Тел. (057) 707-31-07.

E-mail: [oksana\\_pustov@ukr.net](mailto:oksana_pustov@ukr.net).

Распопов Евгений Анатолійович, аспірант кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. Тел. (057) 707-31-07. E-mail: [raspopovkm@gmail.com](mailto:raspopovkm@gmail.com).

Страшко Богдан Олександрович, аспірант кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. Тел. (057) 707-31-07.

E-mail: [bogdanstrashko@outlook.com](mailto:bogdanstrashko@outlook.com).

Bidakov Andrii, PhD (Tech). Associate Professor, Department of Building Construction, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel. (057)707-31-07. E-mail: [bidakov@kname.edu.ua](mailto:bidakov@kname.edu.ua).

Pustovoitova Oksana, PhD (Tech). Associate Professor, Department of Building Construction, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel. (057)707-31-07. E-mail: [oksana\\_pustov@ukr.net](mailto:oksana_pustov@ukr.net).

Raspopov Ievgenii, Postgraduate Student, Department of Building Construction, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel. (057)707-31-07. E-mail: [raspopovkm@gmail.com](mailto:raspopovkm@gmail.com).

Bogdan Strashko, Postgraduate Student, Department of Building Construction, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel. (057)707-31-07. E-mail: [bogdanstrashko@outlook.com](mailto:bogdanstrashko@outlook.com).

Статтю прийнято 02.12.2019 р.