

ЩОДО АНАЛІЗУ ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОТИ, РОЗРАХУНКІВ ТА НАПРУЖЕНОГО СТАНУ НАГЕЛЬНИХ З'ЄДНАНЬ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ. РОЗРАХУНОК НАГЕЛЬНИХ З'ЄДНАНЬ «СТАЛЬ-ДЕРЕВИНА»

REGARDING THE ANALYSIS OF STUDIES ON THE WORK, CALCULATIONS, AND STRESS STATE OF NAIL CONNECTIONS OF TIMBER STRUCTURES. CALCULATION OF “STEEL–TIMBER” NAIL CONNECTIONS

Гоч А.М., аспірант, ORCID:0009-0000-7029-8234, **Мазярчук С.Я.,** аспірант, ORCID:0009-0008-4117-9517, **Алексієвець В.І.,** к.т.н. доцент, ORCID:0000-0002-1274-888X, **Іванюк А.М.,** к.т.н., доцент, ORCID:0000-0002-2314-4061 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Goch A., postgraduate, ORCID:0009-0000-7029-8234, **Maziarchuk S.,** postgraduate, ORCID:0009-0008-4117-9517, **Aleksiievets V.,** candidate of technical sciences associate professor, ORCID:0000-0002-1274-888X, **Ivaniuk A.,** candidate of technical sciences associate professor, ORCID:0000-0002-2314-4061 (National university of water management and nature resources use, Rivne)

Наведено результати огляду досліджень вітчизняних та закордонних науковців, щодо роботи, розрахунку та напружено-деформованого стану дерев'яних конструкцій за різних видів навантаження. Більш детально зроблено акцентування на дослідження нагельних з'єднань дерев'яних конструкцій, для подальшого дослідження з'єднань типу «деревина сталь».

The article presents the results of a review of studies by domestic and foreign scientists regarding the work, calculation, and stress–strain state of timber structures under different types of loading. More detailed emphasis is placed on the study of dowelled joints of timber structures, for the further investigation of joints of the “timber–steel” type.

The analysis of studies of the last decades has shown that research on timber structures, their elements, and joints is developing quite actively. A large amount of experimental data has been accumulated, which can be used in the future in the development of new design standards or in the introduction of certain changes into them. This is due, in particular, to the fact that in the design standards the influence of repeated loading on the calculation of elements and joints of structural connections is absent, which, in turn, requires more thorough study and coverage of all structural elements and joints proposed for use in construction.

Ключові слова: деревина, нагельні з'єднання, з'єднання "деревина -сталь, напружено-деформований стан, міцність, навантаження.
wood, dowel joints, wood-steel joints, stress-strain state, strength, load.

Вступ. Досвід проектування та експлуатації конструкцій з цільної та клеєної деревини показує, що вони широко використовуються в різних типах будівель і споруд і для різного призначення. З цього приводу в більшості випадків очевидні наступні переваги деревини – висока деформативність та міцність, невелика густина, висока стійкість до зовнішніх впливів, простота обробки та утилізації, архітектурна виразність і можливість швидкого відновлення запасів. Останніми роками широкого розповсюдження в будівництві з використанням деревини отримали балкові конструкції, напіврами, арки. Несуча здатність таких конструкцій, в більшості випадків, визначається міцністю їх вузлів, в тому числі металевих з'єднань нагельного типу, які працюють в умовах різних навантажень, серед яких переважна більшість становлять повторні навантаження.

Тому в подальшій роботі ставиться за мету дослідити вплив повторних навантажень на несучу здатність з'єднань нагельного типу, зокрема для з'єднань «сталь-деревина».

Метою даної роботи є узагальнення знань та досліджень виконаних в цьому напрямку, вивчення та аналіз робіт вітчизняних та закордонних науковців.

Розрахунок з'єднань «сталь-деревина» за ДБН В.2.6-161:2017.

Для оцінки граничного навантаження нагельного з'єднання використовується жорстко-пластична модель. Відповідно до цієї моделі з'єднанні між собою кріпильний елемент та деревина повинні працювати як абсолютно жорстко-пластичні матеріали відповідно до залежностей «напруження-деформація».

З'єднання типу «сталь-деревина» являють собою з'єднання з однією площиною зсуву (рис. 1) з тонкими та товстими пластинами та з'єднання з двома площинами зсуву з металевими пластинами будь-якої товщини (рис. 2).

В однозрізних і багатозрізних нагельних з'єднаннях зі сталевими пластинами тонкими називають пластини, що відповідають товщині менше 0,5 діаметра нагеля, а товсті – товщиною 0,5 і більше діаметра з допуском отвору нагеля менше 10%.

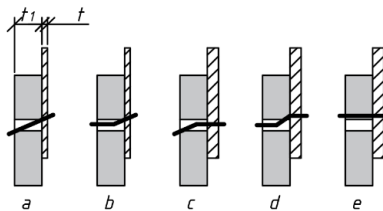


Рис. 1. З'єднання з однією площиною зсуву – форми (a) і (b) мають тонкі пластини, а форми (c), (d) і (e) мають товсті пластини.

Характеристична несуча здатність кріпильного елемента по площині зсуву $F_{v,Rk}$ визначається, як мінімальне значення з виразів для форм руйнування [1]:

- форма (a)
$$F_{v,Rk} = 0,4f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d, \quad (1)$$

- форма (b)
$$F_{v,Rk} = 1,15\sqrt{2M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}, \quad (2)$$

- форма (c)
$$F_{v,Rk} = f_{n,k} \cdot t_1 \cdot d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,k} \cdot t_1^2 \cdot d}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}, \quad (3)$$

- форма (d)
$$F_{v,Rk} = 2,3\sqrt{2M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}, \quad (4)$$

- форма (e)
$$F_{v,Rk} = f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d. \quad (5)$$

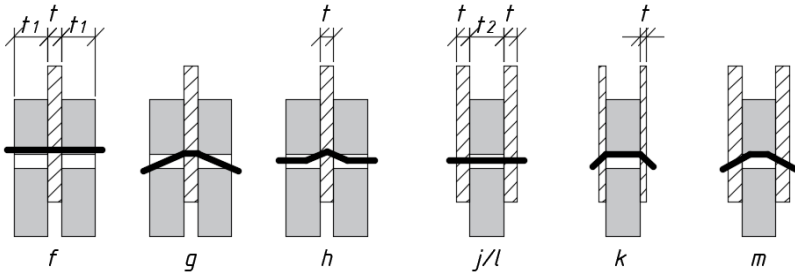


Рис. 2. З'єднання з двома площинами зсуву – пластини будь-якої товщини.

Характеристична несуча здатність кріпильного елемента по площині зсуву $F_{v,Rk}$ в з'єднаннях з двома площинами зсуву визначається, як мінімальне значення з виразів для форм руйнування [1]:

- форма (g)
$$F_{v,Rk} = f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d, \quad (6)$$

- форма (h)
$$F_{v,Rk} = f_{n,1,k} \cdot t_1 \cdot d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot t_1^2 \cdot d}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}, \quad (7)$$

- форма (j)
$$F_{v,Rk} = 2,3\sqrt{2M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}, \quad (8)$$

- форма (k)
$$F_{v,Rk} = 0,5f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d, \quad (9)$$

- форма (l)
$$F_{v,Rk} = 1,15\sqrt{2M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}, \quad (10)$$

- форма (m)
$$F_{v,Rk} = 2,3\sqrt{2M_{y,Rk} \cdot f_{h,2,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}. \quad (11)$$

Розрахункова несуча здатність кріпильного елемента по площині зсуву $F_{v,Rd}$ отримується з рівняння

$$F_{v,Rd} = \frac{F_{v,Rk} \cdot k_{mod}}{\gamma_M}. \quad (12)$$

Огляд останніх досліджень. Аналіз дослідження авторів Гомона С.С. та Алексієвця В.І. [2] дає розуміння, щодо оптимального визначення товщин крайніх та середніх елементів для нагельних з'єднань, що дають змогу більш повно використовувати несучу здатність елементів з'єднань. Зокрема наведені співвідношення товщин крайніх та середніх елементів з'єднань до діаметра

нагеля. Авторами отримані середні напруження зминання для крайніх і середніх елементів, які в подальшому дадуть змогу визначити оптимальну довжину нагеля в з'єднанні.

Автором [3] проведені комплексні дослідження напружено-деформованого стану нагельних з'єднань елементів дерев'яних конструкцій за дії одноразових статичних навантажень та малоциклових навантажень. Для описування процесу деформування нагельного з'єднання як за дії одноразових статичних, так і за дії малоциклових навантажень автором рекомендується користуватися гіперболічною залежністю, яка добре віддзеркалює зв'язок між величинами $T - \Delta$ (рис. 3).

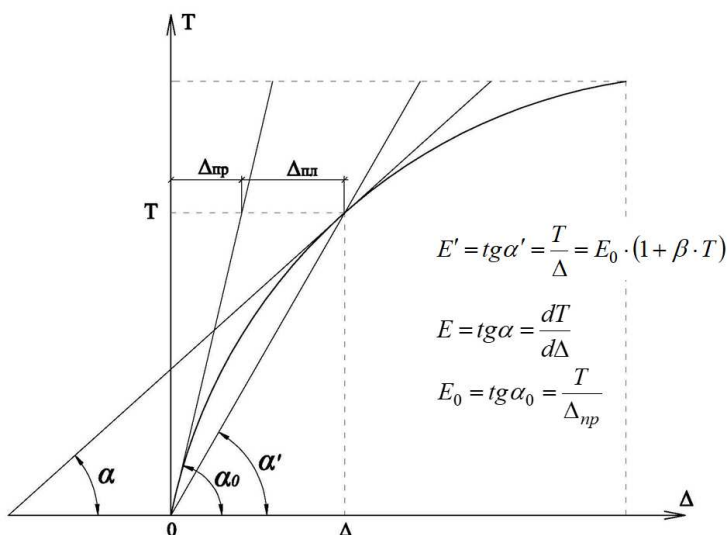


Рис.3. Узагальнений графік деформування нагельного з'єднання.

Запропоновано нову методику розрахунку несучої здатності нагельних з'єднань, в основі якої є використання початкового модуля податливості E_0 та коефіцієнта податливості з'єднання β

$$T = \frac{E_0 \cdot \Delta}{1 - \Delta \cdot E_0 \cdot \beta}, \quad (13)$$

де T – розрахункове значення несучої здатності нагельного з'єднання;

Δ – гранична деформація з'єднання, рівна 2,0 мм (прийнято дослідниками, як критерій руйнування нагельного з'єднання).

Згідно з цією методикою було обчислено несучу здатність нагельних з'єднань на нагелях з різними геометричними характеристиками. Відношення теоретичних значень несучої здатності до експериментальних в середньому на 30% показали більшу збіжність в порівнянні з несучою здатністю обчисленою за діючими нормами проектування.

Проведеними дослідженнями встановлено, що при збільшенні діаметра болта складова деформування змінюється в сторону зменшення. Для болтів діаметром 6 мм деформування болтів становить 53...56% від загальної граничної деформації зсуву, яка становить 2 мм, при діаметрі болта 8 мм складова деформування болтів складає 31...33%, при цьому не утворився шарнір пластичності, оскільки нормальні напруження не досягли умовної межі текучості сталі.

В дослідженнях малоциклових навантажень нагельних з'єднань [4] дерев'яних конструкцій доведено, що зміну несучої здатності нагельних з'єднань за дії малоциклових навантажень при рівнях $\eta_{\text{сус}} = 0,4A_u$ – для нормальної вологості, та $\eta_{\text{сус}} = 0,3A_u$ – для вологості $W=30\%$, доцільно враховувати за допомогою коефіцієнта умов його роботи $\gamma_{\text{сус}}$, на який необхідно множити мінімальне значення несучої здатності, визначеної за чинними нормами. При зазначених рівнях навантаження коефіцієнти умов роботи симетричних нагельних з'єднань за дії малоциклових навантажень становить: для сухих цвяхових з'єднань $\gamma_{\text{сус}} = 1,5$, при температурно-вологісних режимах експлуатації будівель А1, А2, Б1, Б2; для вологих цвяхових з'єднань $\gamma_{\text{сус}} = 1,0$.

Крім того, встановлено, що ці рівні навантаження є рівнем пристосування сухих та вологих нагельних з'єднань до малоциклового стиску.

В роботах вітчизняних авторів Гомона С.С. [5] та Михайловського Д.В. [6] виконані комплексні експериментальні та теоретичні дослідження роботи конструкцій з клеєної та цільної деревини вцілому та їхніх вузлів. Запропоновано виконувати розрахунки за деформаційною методикою та враховувати дійсний напружено-деформований стан, як при розрахунку елементів конструкцій так і окремих їхніх вузлів.

В останні роки з'являються нові дослідження закордонних авторів, зокрема авторами [7] представлені дослідження з'єднань сталь-деревина та деревина-деревина з одним зрізом, які пов'язані з розрахунковою кількістю нагелів. Розглядаються з'єднання на цвяхах, шурупах, болтах та дюбелях зі сталі. Результати експериментальних досліджень отримані при врахуванні різних параметрів: зміни діаметрів сталевих нагелів (6, 8 та 10 мм), різною щільністю клеєної деревини (GL24h, GL28h та GL32h, щільністю відповідно 370, 420 та 480 кг/м³), та величини навантаження на розтяг (10, 15 та 20 кН). Результати досліджень показують, що кількість нагелів збільшується при зменшенні діаметра, а властивості матеріалів мають меншу залежність від діаметрів. Запропоновані спрощені рівняння для розрахунку таких з'єднань, що забезпечують краще розуміння факторів, які впливають на роботу з'єднань сталь-деревина та деревина-деревина в однозрізних з'єднаннях.

Авторами [8] проведені числові дослідження семиболтового з'єднання з несиметричною контактною поверхнею між з'єднувальними елементами, пакет болтів розставлено радіально та формує так званий «мультиболт» в з'єднанні. За результатами досліджень встановлено, що проведення процесу

затягування багатоболтового з'єднання за кілька проходів приводить до рівномірного розподілу сили попереднього натягу в болтах. Спостерігається тенденція, що при прикладенні знакозмінного навантаження на з'єднання зусилля в болтах перерозподіляються та не спричиняється втрата несучої здатності багатоболтового з'єднання.

Висновки. Аналіз досліджень останніх десятиліть, показав, що досить активно розвиваються дослідження дерев'яних конструкцій, їх елементів та вузлів. Накопичено багато експериментальних даних, що можуть бути використані, в подальшому, в розробці нових норм проектування чи впровадження в уже наявних певних змін. Це зумовлено, зокрема, і тим, що в нормах проектування відсутній вплив повторних навантажень на розрахунок елементів та з'єднань вузлів конструкцій, що потребують, в свою чергу, ще більшого вивчення та охоплення всіх конструктивних елементів та з'єднань, що пропонуються використовувати в будівництві.

Також на даному етапі є актуальним питання реконструкції і відновлення пошкоджених та частково зруйнованих існуючих споруд внаслідок збройної агресії і, досить часто, виникають ситуації коли змінюються режими завантаження конструкцій. В таких випадках виникають знакозмінні навантаження різних рівнів, які сприймаються з'єднаннями елементів конструкцій з деревини.

Виходячи із наведеного, з метою накопичення експериментальних даних про роботу нагельних з'єднань конструкцій з деревини за дії одноразових та повторних малоциклових навантажень, встановлення особливостей їхньої роботи та на їх основі розробки рекомендацій для подальшого удосконалення нормативних документів ДБН В.2.6-161:2017 та Eurocode 5 досить є актуальною задачею.

1. ДБН В.2.6-161:2017. Дерев'яні конструкції. Основні положення. – Київ: Мінрегіон України, 2017. – 111 с.

DBN V.2.6-161:2017. Dereviyani konstruktсии. Osnovni polozhennia. – Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2017. – 111 s.

2. Гомон С.С. Дослідження з'єднань дерев'яних елементів на цвяхах із умови ефективності використання матеріалів /С.С. Гомон, В.І. Алексієвцев// Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. – Рівне, 2008. – Вип. 16. – С. 117–122.

Homon S.S. Doslidzhennia ziednan derevianykh elementiv na tsviakhakh iz umovy efektyvnosti vykorystannia materialiv /S.S. Homon, V.I. Aleksiiievets// Resursoekonomni materialy, konstruktсии, budivli ta sporudy: zbirnyk naukovykh prats. – Rivne, 2008. – Vyp. 16. – S. 117–122.

3. Алексієвцев В.І. Робота та розрахунок сталевих нагельних з'єднань дерев'яних конструкцій за повторних навантажень: автореф. дис. ... к-та техн. наук: 05.23.01 / Алексієвцев Валентин Іванович; Полтава. Полтавський нац. техн. ун-т ім. Ю. Кондратюка. – Полтава, 2011. – 21 с.

Aleksiiievets V.I. Robota ta rozrakhunok stalevykh nahelnykh ziednan derevianykh konstruktсии za povtornykh navantazhen: avtoref. dys. ... k-ta tekhn. nauk: 05.23.01 /

Aleksiiievets Valentyn Ivanovych; Poltava. Poltavskiy nats. tekhn. un-t im. Yu. Kondratiuka. – Poltava, 2011. – 21 s.

4. Гомон С.С. Малоциклове пристосування з'єднань дерев'яних елементів на цвяхах / С.С. Гомон, В.І. Алексієвєць // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. – Рівне, 2010. – Вип. 20. – С. 164–169.

Homon S.S. Malotsyklove prystosuvannia ziednan derevianykh elementiv na tsviakhakh / S.S. Homon, V.I. Aleksiievets // Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy: zbirnyk naukovykh prats. – Rivne, 2010. – Vyp. 20. – S. 164–169.

5. Гомон С.С. Напружено-деформований стан і розрахунки за деформаційною методикою елементів з деревини при одноразових та повторних навантаженнях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / Гомон Святослав Степанович; Львів. нац. ун-т «Львівська політехніка». – Львів, 2020. – 43 с.

Homon S.S. Napruzhenodeformovanyi stan i rozrakhunky za deformatsiinoiu metodykoiu elementiv z derevyny pry odnorazovykh ta povtornykh navantazhenniakh: avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk: 05.23.01 / Homon Sviatoslav Stepanovych; Lviv. nats. un-t «Lvivska politehnika». – Lviv, 2020. – 43 s.

6. Михайловський Д. В. Врахування дійсного напружено-деформованого стану у вузлах та елементах конструкцій з клеєної деревини: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / Михайловський Денис Віталійович; Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – Київ, 2020. – 43 с.

Mykhailovskiy D. V. Vrakhuвання diisnoho napruzhenodeformovanoho stanu u vuzlakh ta elementakh konstruktsii z kleienoi derevyny: avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk: 05.23.01 / Mykhailovskiy Denys Vitaliiiovych; Kyiv. nats. un-t bud-va i arkhitektury. – Kyiv, 2020. – 43 s.

7. Elza M. M. Fonseca, «Steel-to-Timber and Timber-to-Timber Simple Shear Connections» *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*, 2024, Vol. 19, pp. 156-160. DOI: 10.37394/232011.2024.19.17.

8. Rafał Grzejda, «Steel-to-Timber and Timber-to-Timber Simple Shear Connections» *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*, 2023, Vol. 18, pp. 68-74. DOI: 10.37394/232011.2023.18.7.