

**СТАН ПИТАННЯ ТА ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ
ВІДНОСНОЇ ВОЛОГОСТІ ДЕРЕВИНИ НА МІЦНІСТЬ ТА
ДЕФОРМАТИВНІСТЬ НАГЕЛЬНИХ З'ЄДНАНЬ**

**СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ
ВЛИЯНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ НА
ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ НАГЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

**CONDITION OF THE QUESTIONS AND PROPOSALS FOR THE
STUDYING OF EFFECT OF MOISTURE CONTENT OF TIMBER ON
MECHANICAL PROPERTIES OF JOINTS MADE WITH DOWEL-TYPE
FASTENERS**

Лисюк С. А. к. т. н., Шеремета О. В. маг. (Національний університет
«Львівська політехніка»)

Лисюк С. А. к. т. н., Шеремета О. В. маг. (Національний університет
«Львівська політехніка»)

**Lysiuk S. A. Candidate of Engineering Sciences (Ph. D.), Sheremeta O. V. Master
Student** (Lviv Polytechnic National University)

Розглядається проблема недостатньої вивченості поведінки нагельних з'єднань дерев'яних елементів при різних рівнях відносної вологості з'єднаних елементів та подаються пропозиції щодо вибору параметрів дослідних зразків і методики їх досліджень.

Рассматривается проблема недостаточной изученности поведения нагельных соединений деревянных элементов при различных уровнях относительной влажности соединяемых элементов и подаются предложения по выбору параметров опытных образцов и методики их исследований.

It is studied the problem of not enough knowledge about the work of timber joints made with mechanical fasteners in conditions of different moisture content of members. Here are offered a choice of options of test pieces and methods of their exploration.

Ключові слова:

Нагельне з'єднання, відносна вологість деревини.

Вступ. Вивчення роботи будівельних конструкцій за реальних, чи наближених до реальних, умов, має на меті визначення рівнів впливу зовнішніх

факторів на характеристики міцності та деформативності конструкції в цілому чи окремих її вузлів. Опрацювання та аналіз отриманих даних, в подальшому, допоможе уникнути аварійних ситуацій чи у проектуванні матеріало-ефективних вузлів та конструкцій із збереженням їх надійності. Зокрема, коли вологість експериментальних зразків не відповідає нормативній (п. 5.3 [1]) чи у випадку локального або повного замочання дерев'яних конструкцій (аварійні ситуації), виникає потреба приведення розрахункових характеристик перерізу до таких, що відповідають реальному стану. Згідно з п.7.3.1.3 [2] вплив вологості на характеристики деревини є детермінованим лише в межах трьох експлуатаційних класів:

Експлуатаційний клас 1. Характеризується вологістю матеріалів, що відповідає температурі 20 °С і відносній вологості навколишнього повітря, що перевищує 65 %, тільки декілька тижнів протягом року. Середня вологість деревини хвойних порід не повинна перевищувати 12 %.

Експлуатаційний клас 2. Характеризується вологістю матеріалів, що відповідає температурі 20 °С і відносній вологості навколишнього повітря, що перевищує 85 %, тільки декілька тижнів протягом року. Середня вологість деревини хвойних порід не повинна перевищувати 20 %.

Експлуатаційний клас 3. Характеризується кліматичними умовами, що призводять до вищої вологості ніж для експлуатаційного класу 2.

Вплив навколишнього середовища на характеристики деревини враховується через перехідні коефіцієнти k_{mod} (I група граничних станів) (табл. 8.1, [2]) та k_{def} (II група граничних станів) (табл. 8.2, [2]). Значення k_{mod} залежить від матеріалу, тривалості дії навантаження та експлуатаційного класу конструкції, а k_{def} – від матеріалу та експлуатаційного класу конструкції.

При виконанні перевірконого розрахунку конструкцій, які експлуатуються в умовах надмірної вологості можна скористатися приведенням розрахункових характеристик міцності деревини у залежності від експлуатаційного класу конструкції (зробити перерахунок характеристик міцності перерізу за 3 експлуатаційним класом), проте при виконання розрахунків на основі експериментальних даних такий спосіб є не точним.

Проте все вище перелічене не вирішує проблему із нагельними з'єднаннями, оскільки їх міцність не залежить від експлуатаційного класу конструкції і визначається тільки з врахуванням щільності деревини з'єднаних елементів та діаметра нагеля [2]:

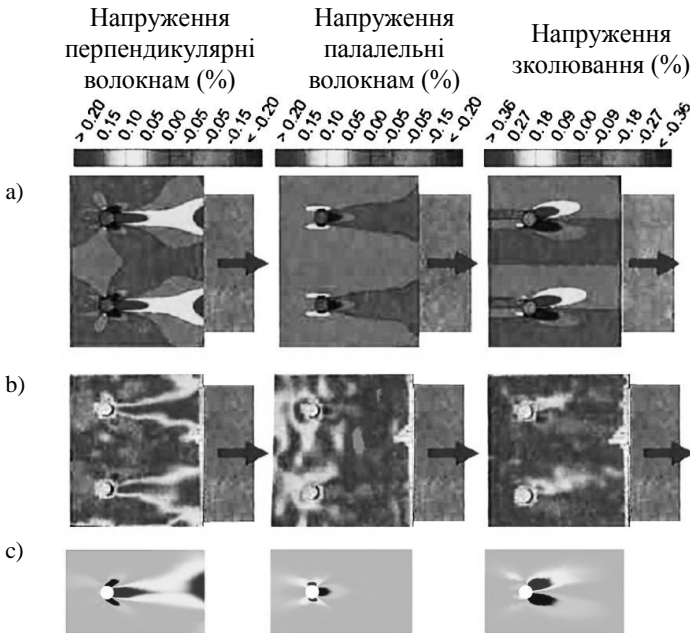
$$f_{h,k} = 0,082(1 - 0,01d) \rho_k, \quad (1)$$

де $f_{h,k}$ – міцність на вдавлювання нагеля, Н/мм²; d – діаметр нагеля, мм; ρ_k – нормативна густина деревини, кг/м.

Враховуючи те, що у місці нагельного з'єднання здійснюється ослаблення з'єднаних елементів яке, у переважній більшості випадків може стати причиною виходу із ладу конструкції, то потреба аналізу та розробки рекомендацій щодо розрахунку нагельних з'єднань елементів несучих конструкцій при різних рівнях відносної вологості деревини є актуальним питанням наукових і інженерних

досліджень. Для коректної оцінки роботи з'єднань, а також правильного їх проектування необхідно дослідити, який вплив має відносна вологість деревини на міцність нагельних з'єднань.

Аналіз останніх досліджень. В роботі [3] досліджувалося питання напружень навколо нагелів в дерев'яних з'єднаннях в наслідок зміни вологості деревини. Метою дослідження було встановити рівні додаткових напружень в місцях влаштування металевих елементів з'єднань при зміні вологості в деревині і на основі цього розробити розрахункову математичну модель.



а – 2D розрахунок; б – експериментальні результати; с – результати 3D розрахунку
Рис.1. Експериментальні та теоретичні результати для нагельних з'єднань

На основі зібраної інформації про зміну вологості в дерев'яних елементах в різні періоди року, були проведені натурні дослідження, а також складено і проведено розрахунок математичної моделі. За результатами експериментів було встановлено, що зміна вологості в деревині створює додаткові напруження навколо елементів з'єднань та запропонована математична модель роботи з'єднання при змінній вологості, яка повністю відповідає роботі реального з'єднання.

С. С. Gerhards в роботі [4], досліджував вплив зміни вологості і температури на характеристики міцності дерев'яних зразків. За базові характеристики

прийнято відносну вологість деревини – 12 % і температуру навколишнього середовища – 20 °С. В результаті проведених експериментів встановлено, що вологість має менший вплив на міцність деревини на розтяг вздовж волокон, але найбільший вплив при міцності на стиск вздовж волокон. Загалом характеристики міцності деревини зі збільшенням вологості зменшуються. Зміна температури найменше впливає на міцність на розтяг, а найбільш чутливою до зміни температури є міцність на стиск. Від’ємні температури більше впливають на міцність ніж додатні.

Таблиця 1

Усереднені значення впливу зміни відносної вологості на механічні характеристики деревини при 20 °С

Характеристика	Відносна зміна характеристики відповідно до деревини із відотною вологістю 12 %, %	
	При 6 %	При 20 %
Модуль пружності вздовж волокон	+9	-13
Модуль пружності поперек волокон	+20	-23
Модуль зсуву	+20	-20
Міцність на згин	+30	-25
Міцність на розтяг вздовж волокон	+8	-15
Міцність на стиск вздовж волокон	+35	-35
Міцність на сколювання	+18	-18
Міцність на розтяг поперек волокон	+12	-20
Міцність на стиск поперек волокон	+30	-30

В праці [5] вивчалася питання знаходження оптимальних методів визначення вмісту вологості деревини для застосування їх в умовах моніторингу. Проаналізовано наступні методи визначення вологості:

1. Прямі методи визначення вологості:
 - З використанням сушильної шафи;
 - Метод дистиляції (екстракції).
2. Непрямі методи визначення вологості:
 - Метод опору;
 - Діелектричний (емнісний) метод
 - Метод мікрохвиль;
 - Сорбційний метод;
 - Радіометричний метод;
 - Спектрометричний метод;
 - Метод кольорових індикаторів.

На основі проведеного дослідження встановлено, що метод електричного опору є найдоцільнішим для вимірювання вмісту вологості в деревині. Це

пов'язано з його більшою точністю відносно інших методів та простотою у застосуванні як при одноразовому вимірюванні, так і при використанні його для моніторингу. Також запропоновано вимірювальну систему для моніторингу вмісту вологості в деревині на основі методу опору (рис. 2).

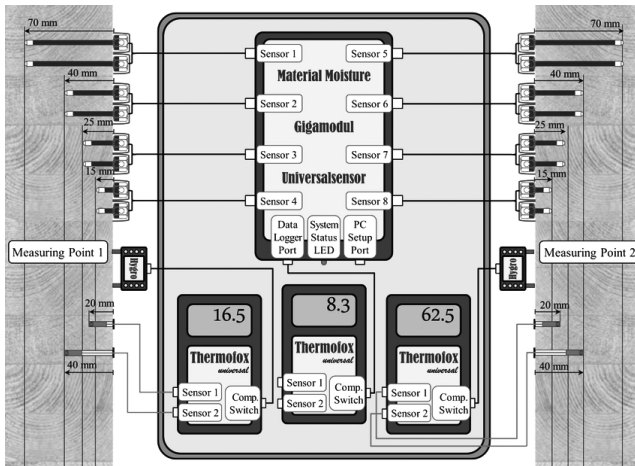


Рис. 2. Схема вимірювальної системи на основі методу опору

Федосенко І. Г. [6] досліджував вплив вологості на міцність при статичному згині зменшених дерев'яних зразків. Метою дослідження було встановлення залежності між міцністю дерев'яних зразків на згин та зміною вологості. Досліди проводились на зразках з відносною вологістю: 0 %, 7,3 %, 12 %, 15 %, 30 %. На основі отриманих результатів, проведених випробувань побудовано графік залежності між міцністю деревини на згині та її вологістю (рис. 3) та виведено рівняння приведення міцності зразка (з відмінною від нормативної (12 %) вологістю) до нормативного значення:

$$\sigma_{12} = [\sigma_w + \beta \cdot (W - 12)] \cdot [1 + \alpha \cdot (W - 12)], \quad (2)$$

де σ_w – гранична міцність при заданій вологості W ; β – коефіцієнт для зразків розміром $7x7x100$ мм рівний $1,424$; $\alpha = 0,04$ – коригуючий коефіцієнт.

За результатами експерименту було встановлено, що чим менші розміри взірців тим більш чутлива їх міцність до зміни вологості.

Для визначення міцності нагельного з'єднання, при відносній вологості деревини з'єднаних елементів відмінної від 12 %, А. Кучерою в магістерській кваліфікаційній роботі “Міцність та деформативність симетричних нагельних з'єднань дерево-дерево на пустотілих циліндричних нагельях з двома площинами зсуву” було запропоновано привести щільність досліджуваних зразків до такої, яка б була у них при 12 % відносній вологості за формулою:

$$\rho_{12} = 1,12 \frac{\rho_k}{1 + \frac{W}{100\%}}, \quad (3)$$

де ρ_k – характеристична густина деревини при її відносній вологості W .

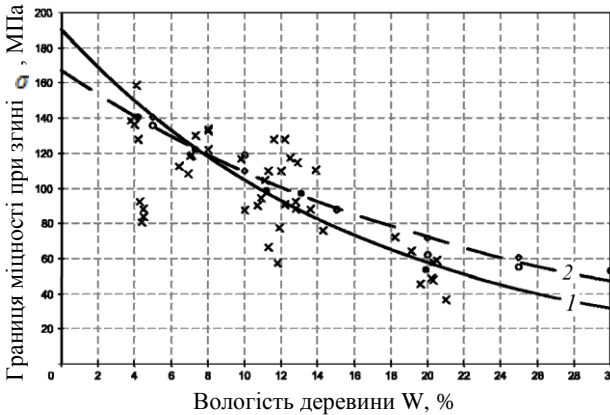
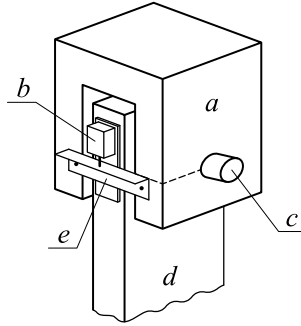


Рис. 3. Залежність міцності при статичному згині від вологості деревини:
1 – апроксимуюча крива, побудована на основі експериментальних даних;
2 – апроксимуюча крива, побудована на основі даних інших дослідників

Програма експериментальних досліджень. Для оцінки впливу відносної вологості деревини на міцність та деформативність нагельних з'єднань слід розглянути роботу цих з'єднань в межах допустимих діаметрів циліндричних нагелів ($6 \text{ мм} < d < 30 \text{ мм}$) п. 8.6 [7] при відносній вологості деревини, починаючи від нормативної вологості (12 %), через межу гігроскопічності (30 %) і аж до значень характерних для свіжозрубаної деревини (80...100 %). Відповідно планується досліджувати симетричні однонагельні з'єднання при відносній вологості деревини 12 %, 18 %, 30 % та 80 % і діаметрі нагеля 12 мм, 20 мм і 28 мм, що відповідає сортаменту арматури А240С [8].

Визначення розмірів дослідних зразків. Згідно ДСТУ [9] випробування нагельних з'єднань на міцність у напрямку волокон може проводитися на розтяг або на стиск дерев'яного зразка, згідно принципової схеми випробувань (рис. 4). Ці варіанти випробувань нагельного з'єднання відрізняються не тільки напрямком дії зусилля, а і розмірами дослідних зразків. Так довжина дослідного зразка для нагеля діаметром 28 мм, при випробуванні на стиск, становитиме 392 мм, а при випробуванні на розтяг – 1232 мм згідно табл. 2 [9]. Для економії матеріалу прийнято рішення проводити випробування нагельного з'єднання за першою схемою (стиск паралельно волокнам).



а – сталевий пристрій; б – датчики визначення деформацій;
с – нагель; d – дослідний зразок; e – планка

Рис. 4. Принципова схема випробувань нагельного з'єднання

Товщина дослідних зразків згідно [9] повинна знаходитися в межах: $1,5d \leq t \leq 4d$. Точніше товщину дослідного зразка отримаємо із умови руйнування з'єднання по дерев'яному елементу (форма j/l рис.13.3, [2]). Із виразів міцності для симетричного нагельного з'єднання дерев'яного елемента із тонкими сталевими накладками (форми руйнування j та k [2]) отримаємо:

$$0,5 \cdot f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d < 1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d}, \quad (4)$$

де $f_{h,1,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k$ – характеристична міцність дерев'яного елемента на вдавлювання нагеля; t_1 – товщина зразка, мм; d – діаметр нагеля; $M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6}$ – характеристичне значення моменту на межі текучості матеріалу нагеля; ρ_k – характеристична густина деревини; $f_{u,k}$ – міцність на розтяг матеріалу нагеля.

З виразу (3) знаходимо максимально допустиму товщину дослідного зразка для забезпечення форми руйнування j [2]):

$$t_1 < 6,222 \cdot \sqrt{\frac{f_{u,k}}{\rho_k} \cdot \frac{d^{1,6}}{1 - 0,01d}}. \quad (5)$$

Необхідна товщина зразків із деревини класу С30 (характеристична густина – $\rho_k = 380 \text{ кг/м}^3$) при діаметрі нагеля 12 мм виготовленого із арматури А240С (характеристична міцність на розтяг матеріалу нагеля – $f_{u,k} = 370 \text{ Н/мм}^2$):

$$t_1 < 6,222 \cdot \sqrt{\frac{f_{u,k}}{\rho_k} \cdot \frac{d^{1,6}}{1 - 0,01d}} = 6,222 \cdot \sqrt{\frac{370}{380} \cdot \frac{12^{1,6}}{1 - 0,01 \cdot 12}} = 47,8 \text{ мм.}$$

Відповідно до сортаменту пиломатеріалів товщину зразків слід прийняти $t_1 = 44 \text{ мм}$, що відповідає вимогам [9] для всіх діаметрів нагелів, що планується досліджувати (12 мм, 20 мм, 28 мм):

$$1,5d_{max} = 42 \text{ мм} \leq t_1 \leq 4d_{min} = 48 \text{ мм}.$$

Характеристична міцність зразка на розтяг з врахуванням ослаблення в місці встановлення нагеля діаметром 28 мм:

$$N_{t,k} = A_{net} \cdot f_{t,0,k} = 2464 \times 18 = 44352 \text{ Н} = 44,4 \text{ кН},$$

де: $A_{net} = (b - d) \cdot t_1 = (84 - 28) \cdot 44 = 2464 \text{ мм}^2$ – площа перерізу;
 $b = 84 \text{ мм}$ – ширина зразка (рис. 5 та табл. 2); $f_{t,0,k} = 18 \text{ Н/мм}^2$ – характеристична міцність деревини класу С30 на розтяг.

Характеристична міцність нагельного з'єднання із тонкими сталевими накладками згідно (8.12) [2]:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \frac{0,5 \cdot f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}}, \frac{F_{ax,Rk}}{4} \right\}, \quad (6)$$

для з'єднань на циліндричних нагелях згідно з п. 13.2.2.2 [2] ($\frac{F_{ax,Rk}}{4} = 0$):

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \frac{0,5 \cdot 21,812 \cdot 44 \cdot 30}{1,15 \cdot \sqrt{2 \cdot 748064,45 \cdot 21,812 \cdot 30}} = 14,4 \text{ кН} \right.$$

Отже, міцність на розтяг дерев'яного зразка ослабленого отвором під нагель, є вищою за міцність нагельного з'єднання:

$$N_{t,k} = 44,4 \text{ кН} \geq F_{v,Rk} = 14,4 \text{ кН}$$

Остаточні розміри поперечного перерізу дослідних зразків подані у табл. 2.

Таблиця 2

Розміри дослідних зразків

№ з/п	Діаметр нагеля, мм	Розміри дослідного зразка (див. рис. 5)			
		$a_1, \text{мм}$	$l_1, \text{мм}$	$l_2, \text{мм}$	$t_1, \text{мм}$
1	12	36	84	84	44
2	20	60	140	140	44
3	28	84	196	196	44

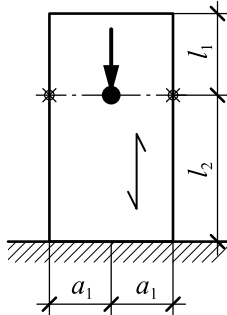


Рис. 5. Розміри дослідних зразків (подано у табл. 2)
із точками розміщення датчиків

Висновки.

1. Попередньо проведені досліді та існуючі нормативні документи не дають відповіді на питання оцінки несучої здатності нагельного з'єднання при конкретних значеннях відносної вологості деревини.
2. Заплановані експериментальні та теоретичні дослідження дадуть змогу більш детально вивчити роботу нагельного з'єднання в умовах різної вологості деревини, а на основі отриманих результатів встановити залежність між значенням характеристичної міцності деревини на вдавлювання нагеля і відносною вологістю цієї деревини.
3. Отримані результати досліджень допоможуть у визначенні залишкової несучої здатності нагельних з'єднань при обстеженні дерев'яних конструкцій, а також дадуть змогу враховувати вплив вологості деревини при проведенні експериментальних досліджень нагельних з'єднань.

1. ДСТУ prEN 384-2001. Лісоматеріали конструкційні. Визначення характеристичних значень механічних властивостей (prEN 384:2000, IDT) 2. ДБН В.2.6-161:2010. Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення. 3. Miranon, Florian, Fortino, Stefania & Toratti, Tomi. A method to model wood by using ABAQUS finite element software. Part 2. Application to dowel type connections. Espoo 2008. VTT Publications 690. 55 p. + app. 3 p. 4. C. C. Gerhards. Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects. Wood and fiber, January 1982. V.14(1). pp. 4-36. 5. Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts / Philipp Dietsch Steffen Franke Bettina Franke Andreas Gamper Stefan Winter // Journal of Civil Structural Health Monitoring Volume 5, Issue 2, April 2015, pp 115-127. 6. Федосенко И. Г. Влияние влажности на прочность при статическом изгибе уменьшенных образцов древесины // Труды БГТУ. Серия 2: Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – Минск, 2011. – с. 208-211. 7. EN 1995-1-1:2004 (E) Eurocode 5: Design of timber structures Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. 8. ДСТУ 3760:2006 Прокаг арматурний для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови. 9. ДСТУ EN 383:2003. Конструкції з пиломатеріалу. Методи випробування. Визначення міцності з'єднання і оцінювання основи для шрифтових кріпильних елементів.