

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ І РОЗРАХУНКУ НАГЕЛЬНИХ З'ЄДНАНЬ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВРІЗНИМИ ПЛАСТИНАМИ ЗА ЕС5

Людмила ЛАВРІНЕНКО¹, Людмила АФАНАСЬЄВА², Віталій ТОНКАЧЕЄВ³

^{1,2,3} Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037

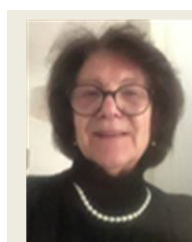
¹ ludmila.lavrinenko@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-5601-0943>

² afanasieva2709@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6237-2609>

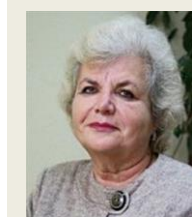
³ tonkacheiev.vg@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1010-8440>

Анотація. В роботі проведено огляд теоретичних та експериментальних досліджень стосовно з'єднань деревних конструкцій на сталевих нагельних із сталевими врізними пластинами. Правильний вибір типу з'єднань дозволяє суттєво впливати на загальну вартість конструкції через формування конструктивної і призначення монтажної схеми конструкції (мінімізація кількості вузлових та монтажних з'єднань), оптимальна уніфікація з'єднань є додатковим аргументом при створенні економічного та конкурентоспроможного рішення. Для аналізу з'єднання нагельного типу враховується, що зусилля передається за рахунок опору кріпильного елемента згину та зсуву, а також змінання в з'єднуваних дерев'яних елементах. Як граничні стани нагельного з'єднання розглядаються втрата міцності через змінання та розколювання деревини стінки отвору, а також через згин нагеля в нагельному гнізді. Розглядувані в огляді роботи надають великий фактичний матеріал стосовно міцності з'єднань залежно від геометричних та фізичних параметрів його складових, а також жорсткості з'єднання, що на сьогодні є предметом активної уваги дослідників. Звертається увага на необхідність дослідження роботи з'єднання для передачі моментного навантаження при груповій роботі з'єднання. Аналіз чисельних експериментів надає можливість переконалися в надійності чинних правил і норм проектування ЕС5 та імплементованих до них норм проектування

ДБН В.2.6-161:2017, а також дозволили виявити недоліки та межі застосування правил проектування стосовно цього виду з'єднань. Ре-



Людмила ЛАВРІНЕНКО
доцент кафедри металевих і
дерев'яних конструкцій,
к.т.н., доцент



Людмила АФАНАСЬЄВА
доцент кафедри залізобетонних
та кам'яних конструкцій,
к.т.н., доцент



Віталій ТОНКАЧЕЄВ
доцент кафедри металевих і
дерев'яних х конструкцій,
к.т.н., доцент

Зульгати чисельних та експериментальних досліджень є основою для вдосконалення конструктивних рішень та перевірки моделей чисельного моделювання.

Ключові слова. Дерев'яні конструкції; нагельні з'єднання; сталеві пластини; Єврокод 5.

ВСТУП

При проектуванні дерев'яних конструкцій у багатьох практичних випадках міцність та жорсткість конструкції, габарити, а

часто – і конструктивна форма, залежать від типу обраного з'єднання та його параметрів, а самі з'єднання є вирішальним фактором при проектуванні. Правильний вибір типу з'єднань дозволяє суттєво впливати на загальну вартість конструкції через формування конструктивної і призначення монтажної схеми конструкції (мінімізація кількості вузлових та монтажних з'єднань). Оптимальна уніфікація з'єднань є додатковим аргументом при створенні економічного та конкурентоспроможного рішення.

Економічний аспект вимагає також і раціонального вибору величин допусків у з'єднаннях – зниження їх величини зменшує деформативність. З іншого боку, їх збільшення для спрощення виготовлення і зниження вартості конструкції – вимагає компромісного рішення проектувальників та застосування інноваційних видів кріплення. Надійний контроль якості з'єднань на всіх етапах їх розробки, виготовлення та експлуатації є нагальною вимогою застосування дерев'яних конструкцій, проте контроль з'єднань в умовах експлуатованої конструкції є складним і не завжди можливим. Тому в сучасних умовах контроль якості та забезпечення надійності з'єднань в дерев'яних конструкціях перенесений, в основному, у виробництво, а дослідження роботи існуючих та нових видів вузлових конструкцій направлене на підвищення надійності.



І останнє, але не менш важливе: на початкових стадіях проектування будівлі архітектори та інженери повинні бути впевнені, що обраний тип з'єднань відповідає необхідним архітектурним та естетичним критеріям стосовно обраного конструктивного рішення.

З названих причин широкого розповсюдження набули з'єднання нагельного типу на болтах та сталевих пластинах, що вставляються у приховані прорізи (рис. 1). Ефективність цього виду з'єднання, крім очевидних архітектурних переваг, визначається їх чіткою роботою при передачі зусиль та простою монтажу вузлів з такими з'єднаннями. Проектування виконується із застосуванням технологій BIM, а виготовлення – на високоточному обладнанні з програмним забезпеченням.

Аналіз експериментальних досліджень стосовно такого виду з'єднань та проведення нових досліджень сприяє вдосконаленню конструктивних рішень актуальних та широко впроваджуваних видів з'єднань, уточненню механічної моделі їх напружено-деформованого стану, закладеної в чинні норми проектування [1, 2], а також формуванню бази для вдосконалення інструментів чисельного моделювання складних споруд на шляху гармонізації міжнародних і національних стандартів України [3] та створення



Рис.1. Приклад застосування вузлів на врізних пластинах (навчальний корпус коледжу Конінга Віллема I, Хертогенбос, Нідерланди)

Fig. 1. An example of making joints with slotted-in steel plates (Koning Willem I College, Hertogenbosch, Netherlands)

складних споруд із застосуванням дерев'яних конструкцій [5]. Як вважають провідні спеціалісти в галузі будівництва, перспективним кроком в Україні має бути створення інформаційних моделей ВІМ [4, 6] з детальним урахуванням всіх ефектів, пов'язаних з роботою цільної та клеєної деревини, реальних умов експлуатації, та які мають включати вимоги врахування нелінійних ефектів роботи деревини у вузлах та дійсної жорсткості вузлів при різних режимах навантаження.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ ТА АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Основні фізичні рівняння міцності та загальні принципи інженерних оцінок роботи нагельних з'єднань, на підґрунті яких базуються розрахунки вузлів з врізними пластинами, наведені в [1, 2]. Невисока міцність при сколюванні вдовж волокон, а також при розтягу поперек волокон, висока деформативність при зминанні поперек волокон і нелінійна залежність характеристик при зміні кута нахилу напрямку зусиль відносно напрямку волокон вимагають поміркованих підходів до конструювання з'єднань. Крім того, необхідно також прогнозувати можливість всихання деревини, бо поява тріщин по площадках сколювання може призвести до аварійної ситуації навіть при коректному розрахунку. Через всі вказані обставини, спричинені переважно анізотропією деревини, реалізація з'єднань дерев'яних елементів є значно складнішою, ніж з'єднань з інших матеріалів.

Для аналізу з'єднання нагельного типу враховується, що зусилля передається за рахунок опору кріпильного елемента згину та зсуву, а також зминання в з'єднаних деревних елементах. Як граничні стани нагельного з'єднання розглядаються втрата міцності через зминання та розколювання деревини стінки отвору, а також через згин нагеля в нагельному гнізді. Загальні положення і методи розрахунку кодифіковані у відповідних нормах проектування елементів та конструктивних систем [1, 2].

В основу аналізу роботи з'єднань нагельного типу за EC5 покладені результати Йохансена (1949 р.) [7] та подальші дослідження, що ґрунтуються на теорії пластичних деформацій (*European Yield Model* ЕУМ). Із змінами та адаптацією ця теорія є основою норм проектування деревних конструкцій Єврокод (EC5), аналогічним є зміст національних норми проектування США (NDS), Канади (CSA 086), що розроблені на основі ЕУМ. Функції з'єднання складаються з елементарних ефектів: нагельний ефект болта, що залежить від його опору згину і деревини при зминанні під нагелем, та розтяжного ефекту болта залежно від його опору розтягу та тертя між суміжними поверхнями.

По площі контакту нагельного стержня з деревиною отвору радіально орієнтовані напруження представлені як сума напружень вдовж і поперек волокон. І якщо деревина має високий опір зминанню вдовж волокон, то поперек волокон при такому навантаженні відбувається розсування волокон, а опір деревини на розтяг в цьому напрямку є незначним. В разі прикладання навантаження в поперечному (відносно волокон) напрямку, як тенденція до розколювання, так і несуча спроможність значно нижчі. Тому в цілому такий напрямок навантаження є небезпечним, що має враховуватися при проектуванні з'єднання. Від дії поздовжнього зусилля у з'єднанні по площі контакту зі стінками отвору в деревині виникають нерівномірні по периметру отвору та довжині нагеля напруження від вминання нагеля: зминання вздовж волокон, а також розтяжні напруження впоперек волокон. В результаті реактивного тиску деревини в стержні кріпильного елемента виникають зусилля, що спричиняють його згин.

При гнучких (порівняно з товщиною з'єднаних елементів) стержнях відбувається вигин нагеля, що знижує тенденцію до розколювання. В з'єднаннях з низькою гнучкістю кріпильного стержня розщеплення деревини можливе, тому обмежуються як діаметри отворів, так і відстані між отворами та до краю елемента.

Важливим параметром розрахунку з'єднань є їхня піддатливість, яка впливає на розподіл зусиль між елементами конструкції. Зміщення у з'єднаннях повинні враховуватися при будь-якому розрахунку переміщень конструкцій. Крім того, для розрахунку самого з'єднання залежно від його піддатливості застосовується та чи інша розрахункова модель.

Нормами [1, 2] регламентуються наступні характерні види відмов з'єднань нагельного типу: у випадках (a), (b), (c), (g), (h) відмова обумовлена виключно руйнуванням дерев'яного елемента або деревної плити за зминання деревини у отворі (відмова защемлення). Такий тип відмови в EC5 називається відмовою 1-го типу. У випадках (d), (e), (j) відмова полягає у відмові защемлення та згинній пластичній деформації кріпильного елемента в одному елементі однозсувного з'єднання або в середньому елементі двозсувного. Такі відмови класифікуються як відмови 2-го типу. Відмова защемлення та нагеля в усіх елементах у випадках (f), (k) відноситься до 3-го типу. Напруження зрізу в перерізі стержня кріпильного елемента, як правило, незначні та не визначають несучої здатності з'єднання.

Несуча здатність нагельного з'єднання $F_{v,Rk}$ є функцією таких параметрів:

t_i – товщина i -го дерев'яного елемента;

$f_{h,1,k}$, $f_{h,2,k}$ – характеристичні значення

опорів зминання деревини в нагельному гнізді для з'єднаних елементів товщиною t_1 і t_2 та їх відношення:

$$\beta = f_{h,1,k} / f_{h,2,k}$$

$M_{y,Rk}$ – характеристичне значення моменту пластичної деформації кріпильного елемента;

$F_{ax,Rk}$ – характеристичне значення несучої здатності кріпильного елемента на осьове висмикування.

Норми проектування [1, 2] пропонують визначати несучу спроможність на одну площину зсуву на один кріпильний елемент для кожного виду відмови і за меншим отриманим значенням приймати рішення про несучу спроможність з'єднання. Тут наведені

рівняння рівноваги в першому граничному стані для з'єднань з поодиноким та подвійним зсувом. В перших випадках (a), (b), (g) визначається несуча здатність з'єднання з умови міцності на зминання в отворі кожного із з'єднаних елементів. Наступні формули (c), (d), (e), (f), а також (h), (j), (k) визначають несучу здатність з'єднання з умови згину нагеля, причому перший доданок в формулах – несуча здатність нагеля за теорією Йохансена. Другий доданок ($F_{ax,Rk}/4$) враховує ефект нитки (*rope effect*), який можливий лише за наявності упору нагельного елемента в зовнішні грані з'єднаних елементів, тому він виникає в цвяхах та болтах, а в гладких нагельних стержнях – не виникає. Цей ефект враховується при появі пластичних деформацій в нагелі, тобто при відмовах 2-го та 3-го типів. Якщо величина $F_{ax,Rk}$ не визначена, то ефект нитки в запас міцності розрахунком може не враховуватися.

Формули для визначення необхідних для розрахунку величин наведені в табл. 1.

В табл. 1 наведені значення характеристичної міцності деревини в защемленні

$$f_{h,k} = \frac{F_{\max}}{dt} \text{ (Н/мм}^2\text{)}, \text{ яка представляє собою}$$

осереднену міцність на зминання в отворі під дією жорсткого прямого нагеля. Теоретично прийнято, що ця характеристика не є виключно властивістю матеріалу, є системною та залежить від багатьох факторів, включно з типом кріпильного елемента.

В [8] були проведені дослідження на міцність деревини та випробування на зсув болтових з'єднань та із застосуванням концепції ЕУМ проведено теоретичний аналіз. Показано, що теоретичні значення узгоджуються з експериментальними. Авторами [9] систематично досліджені механічні властивості болтових з'єднань, включно з густиною деревини, гнучкість болтів, геометричне розташування та засоби підсилення, а також проаналізовано діаграму роботи вузла в координатах сила-переміщення протягом усього процесу завантаження. В [10] було розглянуто врахування крихкого руйнування з позицій того, що з'єднувальні

Табл. 1. Параметри для розрахунку нагельного з'єднання
Tabl. 1. Parameters for calculating the dowel connection

Елементи		Значення параметру		
		$f_{h,k}$ характеристичний опір дере- вини вминанню в отворі наге- льного з'єднання, Н/мм ²	$M_{y,Rk}$ характеристичний момент пластичної деформації кріпи- льного елемента, Н · мм	$F_{ax,Rk}$ характеристична не- суча здатність на ви- смикування кріпиль- ного елемента, Н
кріпильні	з'єднувані			
Цвяхи $d \leq 8\text{мм}$	деревина без просвердлю- вання	$0,082 \rho_k d^{-0,3}$	для круглих цвяхів $0,3 f_{u,k} d^{2,6}$ для квадратних цвяхів $0,45 f_{u,k} d^{2,6}$	для круглих цвяхів min $f_{ax,k} dt_{pen}$ або $f_{ax,k} dt + f_{head,k} d_h^2$ для різьбових цвяхів min $f_{ax,k} dt_{pen}$ або $f_{head,k} d_h^2$
	деревина з просвердлю- ванням	$0,082(1-0,01d) \rho_k$		
	фанера	$0,11 \rho_k d^{-0,3}$		
	ДВП-2	$30 d^{-0,3} t^{0,6}$		
	ДСП, OSB	$60 d^{-0,7} t^{0,1}$		
Болти $d \leq 30$ мм, нагелі та цвяхи $d > 8$ мм	деревина, LVL	Вздовж волокон $f_{h,0,k} = 0,082(1-0,01d) \rho_k$ Залежно від кута між напрямом волокон α та навантаженням $f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$ для м'якої деревини: $k_{90} = 1,35 + 0,015d$ для LVL: $k_{90} = 1,30 + 0,015d$ для твердої деревини: $k_{90} = 0,90 + 0,015d$	$0,3 f_{u,k} d^{2,6}$	найменша характери- стична несуча здат- ність на осьове зу- силля з врахуванням шайб
	фанера	$0,11(1-0,01d) \rho_k$		
	ДСП та OSB	$50 d^{-0,6} t^{0,2}$		
Скоби		як для круглих цвяхів $d \leq 8\text{мм}$	$240 d^{2,6}$	як для двох круглих цвяхів $d \leq 8\text{мм}$

Позначення в таблиці 8.1: d і t – діаметр кріпильного і товщина з'єднуваного елемента, мм; $f_{u,k}$ – межа міцності кріпильного елемента при розтягу, Н/мм²; $f_{ax,k} = 20 \rho_k^2 \cdot 10^{-6}$ – характеристичний опір на висмикування защемленої частини цвяха, Н/мм²; $f_{head,k} = 70 \rho_k^2 \cdot 10^{-6}$ – характеристичний опір цвяха на висмикування, Н/мм²; ρ_k – характеристичне значення густини деревини або плитного матеріалу, кг/м³; $t_{pen} \geq 8d$ – довжини защемленої частини гладкого цвяха, мм, $t_{pen} \geq 6d$ – те саме різьбового цвяха, мм; $d_n \geq 2d$ – діаметр шляпки цвяха, мм; $f_{h,0,k}$ – характеристичний опір зминанню деревини в отворі вздовж волокон, Н/мм²; $f_{h,\alpha,k}$ – характеристичний опір зминанню деревини в отворі залежно від кута α між напрямом волокон та навантаженням, Н/мм²; параметри розрахунку стосуються скоб з дроту, що має тимчасовий опір $f_{u,k} = 800$ Н/мм².

елементи не повністю досягають пластичного стану при руйнуванні, провели теоретичний аналіз і числове моделювання на основі механіки руйнування та запропонували відповідні теоретичні формули для визначення несучої спроможності.

Так само, як і в з'єднаннях типу деревина-деревина, в з'єднаннях дерев'яних елементів на сталевих пластинах можливі варіанти відмови за рахунок пластичної деформації елементів з'єднання: варіанти (а) – (е)

характерні для однозрізних або багатозрізних несиметричних з'єднань, варіанти (f) – (m) – для дво- та багатозрізних симетричних з'єднань. Варіанти (a), (c), (f) та (j/l) відносяться до відмов 1-го типу, тобто описують втрату міцності через зминання та розколювання деревини. Варіанти (b), (d), (g) та (k) – це відмови 2-го типу з пластичним деформуванням нагелю в одному елементі однозсувного з'єднання або в середньому елементі двозсувного, а варіанти (e), (h) та (m) – відмови 3-го типу з відмовою всіх елементів в з'єднанні. При використанні сталевих пластин (рис. 2) несуча здатність з'єднання залежить від товщини сталевих пластин t порівняно з діаметром кріпильного елемента d . Якщо товщина пластини $t \leq 0,5d$, то пластина вважається тонкою (гнучкою), а якщо $t \geq d$ і допуск отвору (різниця діаметрів) кріпильного елемента та пластини менший, ніж $0,1d$, то пластина вважається товстою (жорсткою). Через те, що тонка пластина не має достатньої жорсткості для упору голівки кріпильного елемента, то відмова 3-го типу в такому випадку є неможливою.



Рис.2. Двозрізний болтовий вузол з врізною сталевую пластиною

Fig. 2. Double shear bolted timber joint with slotted-in steel plates

Рівняння для визначення несучої здатності за кожним типом відмови мають таке саме обґрунтування, як і в попередньому випадку з'єднання типу деревина-деревина. Несуча здатність одного кріпильного елемента на одну площину зсуву для однозсувного з'єднання залежно від типу жорсткості пластини наведені в формулах (1 – 2):

– однозрізне з'єднання з тонкою сталевую пластиною:

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

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

– однозрізне з'єднання з товстою сталевую пластиною:

$$c) \quad F_{v,Rk} = f_{h,k} t_1 d, \quad (2)$$

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

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

Двозрізні з'єднання також розраховуються залежно від товщини сталеві пласти, і несуча здатність одного кріпильного елемента на одну площину зсуву залежно від типу жорсткості пластини визначається за формулами (3 – 5):

– двозрізне з'єднання із сталевую пластиною будь-якої товщини між двома дерев'яними елементами:

$$f) \quad F_{v,Rk} = f_{h,1,k} t_1 d, \quad (3)$$

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

$$h) \quad F_{v,Rk} = 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4};$$

– двозрізне з'єднання двох тонких сталевих пластин і дерев'яного елемента між ними:

$$j) \quad F_{v,Rk} = 0,5 f_{h,2,k} t_2 d, \quad (4)$$

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

– двозрізне з'єднання двох товстих сталевих пластин і дерев'яного елемента між ними:

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

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

Для пластин $0,5d < t < d$ несуча здатність визначається лінійною інтерполяцією. Параметри для розрахунку ті ж самі, що й у разі з'єднання дерев'яних елементів без сталевих пластин (табл. 1). Причому як в тому, так і в цьому разі, формули для визначення несучих спроможностей можна використовувати лише за умови дотримання вимог щодо мініма.

льних відстаней між центрами кріпильних елементів та відстаней до торця чи грані дерев'яного елемента.

Важливим параметром розрахунку з'єднань є їхня піддатливість, яка впливає на розподіл зусиль між елементами конструкції. Зміщення у з'єднаннях повинні враховуватися при будь-якому розрахунку переміщень конструкцій. Крім того, для розрахунку самого з'єднання залежно від його піддатливості застосовується та чи інша розрахункова модель.

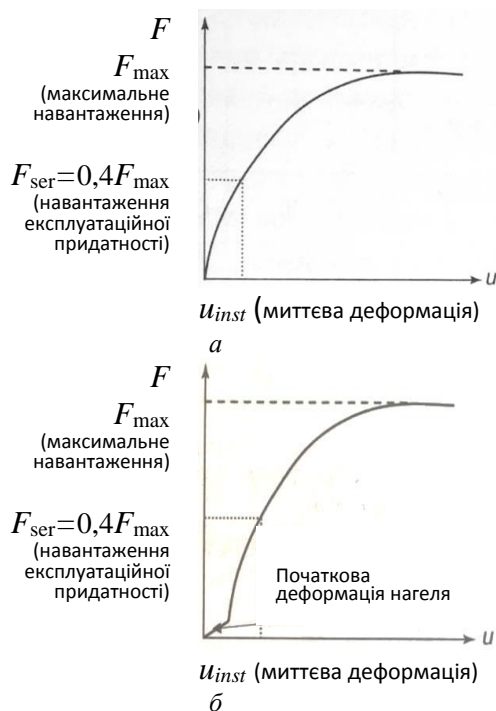


Рис. 3. Типові залежності «навантаження – деформація зсуву» для з'єднань нагельного типу:

a – на шурупах і цвяхах; $б$ – на болтах і нагелях

Fig. 3. Typical "force-deformation" curves for dowel-type connections: a - with screws and nails; $б$ - with bolts and dowels

Жорсткими є клейові з'єднання, інші з'єднання є піддатливими через наявність обминання деревини на межі контакту з'єднуваних елементів та кріпильних елементів.

Поведінка будь-яких піддатливих з'єднань під навантаженням має одні й ті самі закономірності. Типові криві навантаження-деформації наведені на рис. 3. До початку проковзування при збільшенні наванта-

ження спостерігається умовно лінійна залежність. В з'єднаннях, що мають допуск на посадку кріпильного елемента, виникає явище початкового проковзування (рис. 3, б). Воно триває до досягнення контакту з отвором. Подальша робота з'єднання є пружнопластичною.

Жорсткість з'єднання в EC5 описується нахилом кривої навантаження-деформація (модулем ковзання) в лінійно-пружній області K_{ser} , а також в пружнопластичній області K_u . Таким чином, розглядаються дві ідеальні моделі поведінки з'єднання: пружна та пружно-пластична. Для розрахунків деформацій за граничними станами другої групи (за експлуатаційною придатністю) нормами враховується модуль K_{ser} . Для розрахунків за граничними станами першої групи (за несучою здатністю) статично невизначуваних систем, де піддатливість вузлів може спричинити перерозподіл зусиль, застосовується модуль

$$K_u = (2/3)K_{ser}. \quad (6)$$

Закономірності дійсної роботи нагельних з'єднань та граничні стани в попередні роки [11] обговорювалися, але не увійшли до норм проектування через відсутність розрахункових параметрів, що характеризують роботу з'єднання. Наприклад, не розглядався граничний стан утворення шарніру пластичності в з'єднанні при одночасному продавлюванні деревини. Чинні норми завдяки гармонізації національних стандартів ДСТУ та Єврокод є актуальними для сучасного проектування та знаходяться в правових межах будівельного законодавства України.

Мета і задачі роботи. Метою роботи є визначення напрямків вдосконалення актуальних видів нагельних з'єднань на підставі аналізу і узагальнення наукових публікацій та експериментальних досліджень для та подальшого впровадження отриманих даних в моделювання дерев'яних конструкцій.

Отримані результати дозволять встановити ресурси несучої здатності вузлів на прорізних пластинах.

Матеріали та методи дослідження. Матеріали та методи досліджень полягають у вивченні результатів експериментальних і

теоретичних досліджень у співставленні з існуючою теоретичною базою.

Об'єкт дослідження – напрямки, методи та експериментальні дані, отримані на основі аналізу наукових джерел.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

З'єднання нагельного типу найбільш часто застосовуються при проектуванні економічно ефективних дерев'яних конструкцій.

Проте в деяких випадках їх оптимальне використання стримується недостатньою

обґрунтованістю застосовуваних моделей, які великою мірою базуються на емпіричних засадах та тестуванні [9]. Крім того, це певним чином обмежує застосування правил проектування, наприклад, відсутністю обмежень на поведінку при розколюванні або на максимально допустимі деформації.

Роботи, що розглядаються в даному огляді, мають на меті детальне дослідження несучої здатності з'єднання, обговорення особливостей їх роботи під навантаженням на всіх стадіях для розуміння впливу окремих параметрів, що варіюються залежно

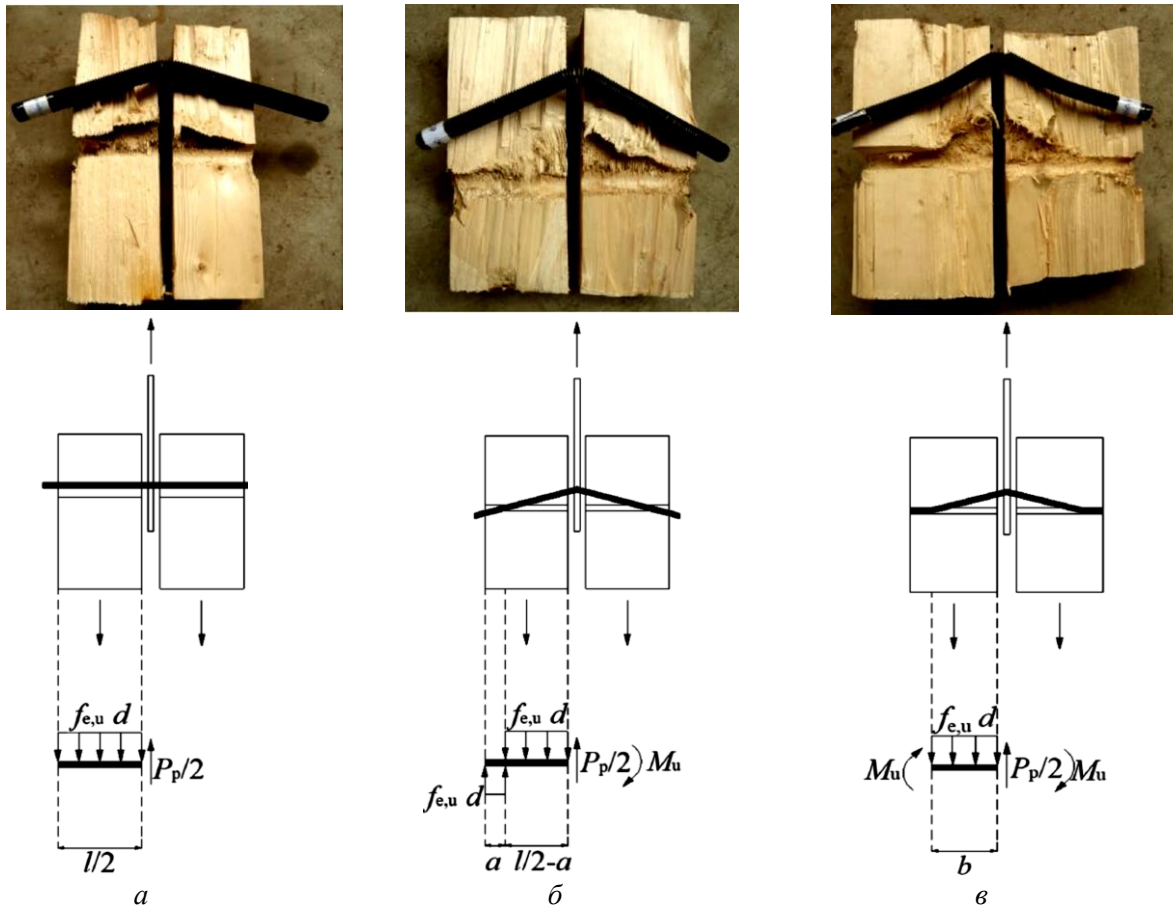


Рис. 4. Відмови та розрахункові схеми роботи нагельного з'єднання з прорізною металевою пластиною: *a* – рівномірне продавлювання деревини; *b* – утворення шарніру пластичності в болті в зоні контакту з металевою пластиною; *v* – утворення шарнірів пластичності в болті в зоні прикриття до пластини та в зонах защемлення в крайових точках з продавлюванням деревини [12]

Fig. 4. Failure patterns and design diagrams for the operation of a dowel connection with slotted-in steel plate: *a* – timber failed due to uniform extrusion; *b* – plastic hinge appeared in the bolt at the contact area between the bolt and slotted-in steel plate; *v* – plastic hinges appeared in the bolt at the contact area between the bolt and the steel plate and at the timber on both sides, resulting in timber extrusion between the plastic hinges [12]

від матеріалу чи конструкції. Автори надають свою оцінку правилам, закладеним у норми проектування EC5, та виявляють їх недоліки.

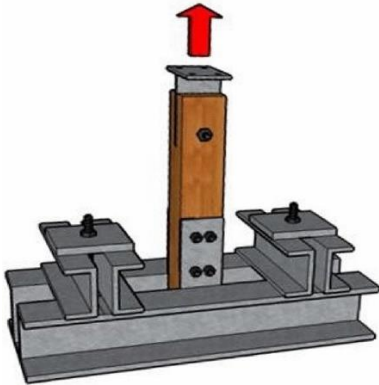


Рис. 5. Схема навантаження для визначення механічних характеристик одноболтового нагельного вузла з врізною пластиною вздовж волокон [12]

Fig. 5. Test schematic of the mechanical properties of the bolted timber joints with slotted-in steel plates parallel to the grain [12]

В статті [12] наводяться дані про експериментальне дослідження роботи болта у вузлі з врізаною металевою пластиною. Враховано вплив діаметру болта, товщини деревини та їх параметри міцності. Як результати випробувань відзначено, що деформації мають основні характерні етапи, як ось: лінійну стадію, стадію зниження жорсткості, стадію плато текучості та стадію руйнування під навантаженням.

На базі апроксимації кривої «навантаження – деформація» була створена механічна модель для міцності на пружній жорсткості та на основі теоретичного аналізу за-

пропонована теоретична формула та показана збіжність розрахункових кривих з експериментальними (рис. 6).

Досліджувалися 24 зразки з клеєної деревини хвойних порід та болти класу міцності 6.8, сталева пластина із сталі Q235. Навантаження (рис. 5) створювалося з фіксацією деформацій до руйнування зразка або зменшення навантаження до 80%. Руйнування відбувалось за однією з трьох схем (рис. 4). Розвиток деформацій відбувався відповідно до теоретичної схеми. На певних стадіях навантаження фіксувалося: 1) проковзування, обумовлене наявністю зазору між стержнем болта та стінкою отвору, 2) умовно лінійна стадія характеризувалася високою лінійною кореляцією, 3) на стадії деградації жорсткості спостерігалось зростання пластичних деформацій, 4) поява текучості при згині болтів та вихід кривої на плато текучості, де несуча здатність сягає найвищих значень та можливе утворення пластичного шарніру в болті, 5) стадія руйнування супроводжується розколюванням деревини або руйнуванням болта, різким падінням навантаження. Теоретично розглянута ідеальна пружно-пластична модель роботи болта як балки на пружній основі та запропонована двопараметрична формула для визначення несучої здатності та пружної жорсткості. При роботі болта у з'єднанні залежно від його гнучкості руйнування можливе за однією з трьох схем (рис. 4). Результати перевірялися на кінцево-елементних моделях та показали прийнятну збіжність. Для уточнення розрахункової моделі та її застосування для багатонагельних з'єднань вказано

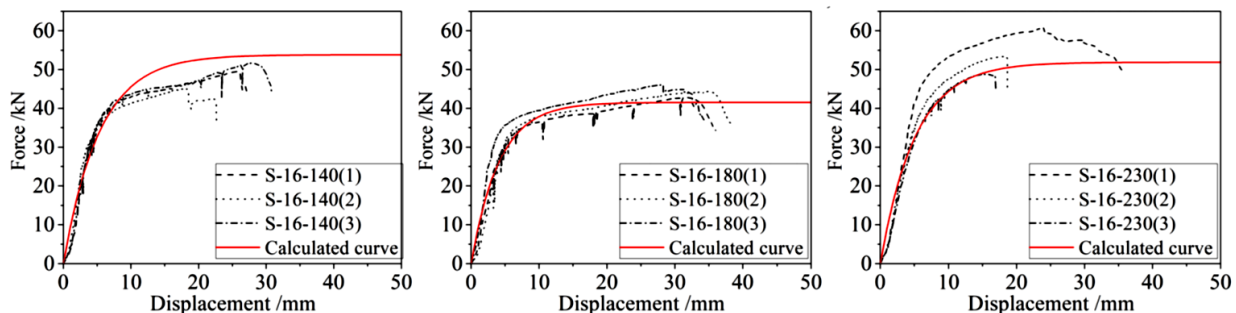


Рис.6. Порівняння розрахункових та експериментальних кривих [12]

Fig. 6 Comparison of calculated curves and experimental curves [12]

на необхідність дослідження впливу механічних характеристик деревини на роботу нагельного гнізда, а також товщини дерев'яних елементів на несучу здатність нагеля.

Робота [9] надає великий матеріал для обговорення недосконалостей та прогалин в нормах проектування EC5, спричинених недостатньою базою експериментальних даних. Наводяться результати випробувань 64 зразків однонагельних з'єднань вздовж волокон (рис. 7).

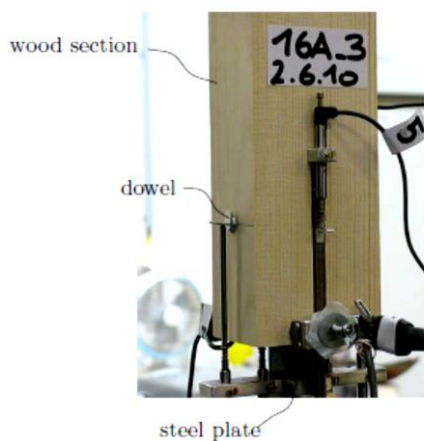


Рис.7. Typical dowel-type timber connection with a single dowel, photo of a specimen during conduction of the experiment

Fig. 7. Однонагельне з'єднання з різною пластиною, фото зразка під час проведення експерименту

Досліджені зразки з різною густиною та шириною дерев'яних елементів, отінювався вплив шорохуватості нагеля та бічного підсилення вузла, підтверджено підвищення несучої здатності зразків з вищою густиною та їх схильність до крихкого руйнування. Зразки з м'якої деревини продемонстрували поведінку з поширеним плато текучості до остаточного руйнування. При збільшенні шорохуватості нагеля збільшується як граничне навантаження, так і пластичність з'єднання, що надало можливість застосування нагелів періодичного профілю. Результати порівнювалися з значеннями міцності та жорсткості за EC5 (рис. 8), які показали прийнятну збіжність лише для нагелів середньої гнучкості. В експериментах зразки з жорстким нагелем показали нижчі значення несучої здатності, ніж розрахункові показники, в зразках з високою гнучкістю отримані схожі результати. На зразках різної ширини показано, що теоретичне врахування впливу товщини дерев'яних елементів на несучу спроможність нагеля та сумісності деформацій уточнює механічну модель вузла та надає можливість регламентувати обмеження на переміщення у вузлах. Обґрунтовано застосування шорохуватих нагелів та бічного підсилення

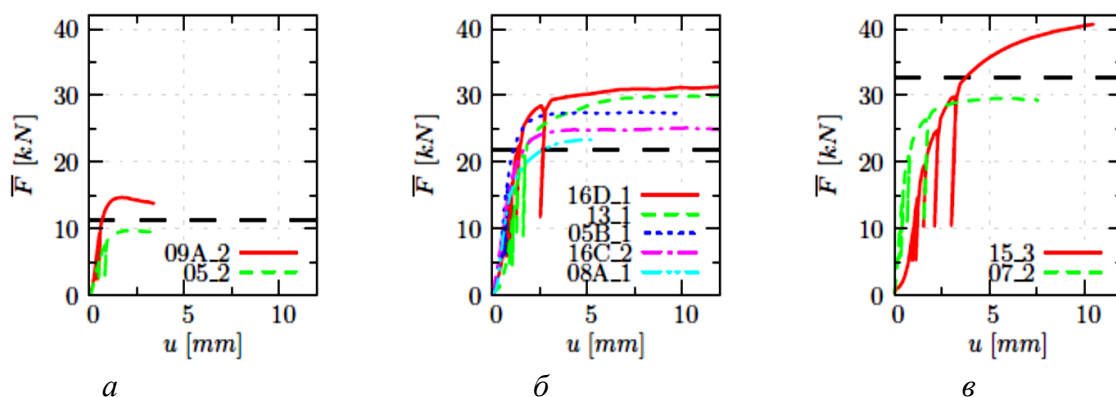


Рис.8. Порівняння несучої здатності обраних зразків з розрахунковими значеннями за EC5 (приведені до густини $\rho_{avg}=430 \text{ кг/м}^3$: $\bar{F}=F\rho/\rho_{avg}$), зразки шириною: *a* - 40 мм, *б* - 100 мм, *в* - 200 мм [9]

Fig. 8. Comparison of strength of selected tests with design values from EC5 (normalized linearly to $\rho_{avg}=430 \text{ кг/м}^3$: $\bar{F}=F\rho/\rho_{avg}$), samples with width: *a* - 40 мм, *b* - 100 мм, *v* - 200 мм [9]

для запобігання утворення тріщин, що не регламентується діючими правилами проектування.

В [27] запропоновано детальніше врахувати ефект нитки при розрахунку з'єднання як функцію багатьох змінних, в перше чергу – переміщень у вузлі. Показано, що запропоновані в нормах рівняння є наближеними та недовраховують цей ефект, оскільки він запобігає крихким відмовам та збільшують несучу здатність залежно від переміщень у з'єднанні. Для вирішення поставленої задачі було проведено серію експериментів з нагельми із гладкою поверхнею, з різьбою та з фіксуєчими гайками. Всі результати порівнювалися зі значеннями, отриманими за рівняннями норм. Після випробувань вирізалися зразки для аналізу зминання деревини. Середні значення ширини зминання та несуча здатність були значно вищі, ніж за стандартними процедурами, що свідчить про необхідність більш детально розглядати ефект нитки як функцію багатьох змінних.

Основна увага в наведених дослідженнях приділена однонагельним з'єднанням, перевагою яких є відсутність ефектів статичної невизначуваності розподілу навантаження. При дослідженні багатонагельних з'єднань [13, 14] уточнюється задача ефективного розподілу навантаження та розколювання як вздовж, так і впоперек волокон у з'єднаннях [15, 16].

Прикладом такого уточнення розрахункових положень останньої генерації Єврокодів є положення про розміщення болтів у вузлах реальних конструкцій, що вимагає аналізу групової роботи болтів з урахуванням їх фактичної роботи в нагельному полі. При дії зусилля вздовж волокон і розміщення рядів нагелів в тому ж напрямку нерівномірність їх завантаження збільшується при зменшенні відстані між ними, що необхідно враховувати при проектуванні багатонагельних вузлів при обмеженні розмірів нагельного поля. Основні засади Єврокод 5 стосовно розрахунку вузлів базуються на тому, що робота з'єднань матиме пластичний характер. Одночасно з цим, вважається, що через

ризик появи крихкого руйнування (наприклад, при роботі з'єднуваного елемента під кутом до напрямку волокон) або послідовного розколювання з'єднання (*zip-effect*) розрахункові зусилля в з'єднанні можуть визначатися за пружною схемою роботи, проте з відповідальним врахуванням всіх ексцентриситетів прикладання навантаження та можливого розцентрування осей у вузлах конструкції.

Стосовно цього показано, що при груповому розміщенні нагельних елементів навантаження на з'єднання в цілому буде нерівномірно розподілятися на всі кріпильні елементи, в усякому разі – при напрямку зусилля вдовж волокон, що вимагає встановлення певного еквівалентного числа болтів, які будуть прийматися до розрахунку в припущенні їх однакового завантаження. Якщо в ряду конструктивно розміщено n нагелів (або болтів чи цвяхів діаметром $d \geq 8$ мм), завантажених і розміщених паралельно напрямку волокон при відстані між нагельми a_1 , то включається в роботу тільки еквівалентне число нагелів n_{ef} :

$$n_{ef} = \min \left\{ n \text{ або } \left(n^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \right) \right\}. \quad (7)$$

Для рядів кріпильних елементів, розміщених поперек волокон, розрахункова кількість елементів така ж, як і фактична: $n_{ef} = n$, а в разі прикладання навантаження під кутом до волокон ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$) визначається лінійною інтерполяцією значень відносно кута нахилу волокон.

Більш складні дослідження стосуються застосування попереднього напруження з'єднання [17], поведінки з'єднання при вогневому впливі [18] або впливу зміни вологості на роботу нагеля у защемленні [19, 20].

Моделювання з'єднань зараз знаходиться в центрі уваги дослідників та проектувальників дерев'яних конструкцій. Великий інтерес викликає застосування інструментів та методів чисельного моделювання, зокрема метод скінченних елементів [26]. Хоча переважна більшість робіт зосереджена на розробці моделей для плоского напруженого стану [21, 22] без урахування тримірних

ЛІТЕРАТУРА

ефектив, проте для широких з'єднань створені моделі, де згин нагеля має вирішальне значення [23, 24]. Задача ускладнена через відсутність зв'язку між поведінкою матеріалу в різних напрямках, запропоновано моделювання на основі ортотропної пластичності та постпружної пластичності.

Вивчення впливу тертя провадилось як експериментально, так і на моделях [25].

Коефіцієнт статичного тертя, що приймається в моделюванні від 0,1 до 0,7, є параметром, що суттєво впливає на несучу здатність і появу крихкого руйнування та перевертається експериментально. Звертається увага на необхідність дослідження роботи з'єднання для передачі моментного навантаження при груповій роботі з'єднання [29].

Наведені теоретичні результати та напрямки експериментальних робіт є свідченням високої дослідницької активності в напрямку удосконалення конструктивних рішень та норм проектування дерев'яних конструкцій

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. З'єднання дерев'яних конструкцій нагельного типу на врізних сталевих пластинах є високоефективними та надають можливість створення технологічних та архітектурно виразних вузлових з'єднань. Запропоновані правилами та нормами проектування [1, 2] залежності в цілому відображають дійсну роботу одно- та двозрізного з'єднання.

2. Розглянуті експерименти, що направлені на аналіз деталей поведінки нагельних з'єднань на врізних пластинах на кожному етапі завантаження, який оцінюється кількісно. Результати експериментів свідчать про необхідність подальших досліджень та розширення фактичної бази експериментальних даних для виявлення недоліків та меж застосування діючих правил проектування.

3. Отримані експериментальні дані є підставою для уточнення розрахункових моделей, надають довідкові відомості для перевірки та коригування інструментів чисельного моделювання, які зараз є предметом інтенсивного дослідження.

1. **ДСТУ-Н Б EN 1995-1-1:2010** Єврокод 5. Проектування дерев'яних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1995-1-1:2004, IDT)
2. **ДБН В.2.6-161:2017**. Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення // *К., Мінрегіонбуд України, 2017 - 111 с.*
3. **Афанасьєва Л.В., Кулік Т.Р.** Гармонізація міжнародних і національних стандартів як механізм технічного регулювання будівельної галузі України // *Збірник праць XIV Міжнародної наукової конференції «Наука і освіта». Угорщина, Хайдусобосло, 2020, с. 3-7*
4. **Білик А.С., Беляєв М.А.** ВІМ-моделювання: огляд можливостей та перспективи в Україні // *Промислове будівництво та інженерні споруди. 2015. – №2, с. 93–15.*
5. **Лаврінєнко Л.І., Будко Т.Г.** Застосування методів і моделей ВІМ-технологій при проектуванні купольного покриття аквапарку з дерев'яними арками // *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини: Збірник наукових праць, ОДАБА, 2021, – Вип.25, с. 72-84* <https://doi.org/10.31650/2707-3068-2021-25-72-84>
6. **Бензель О., Лаврінєнко Л.** Інформаційне моделювання сталевої будівлі з підвищеними вимогами жорсткості // *Будівельні конструкції. Теорія і практика. 2021, – Вип. 9, с. 30-44.* <https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.30-44>
7. **Johansen K. W.** Theory of Timber Connections // *IABSE, Publications No 9, Bern, Switzerland, 1949, pp. 249–262.*
8. **Sawata K, Yasumura M.** Estimation of yield and ultimate strengths of bolted timber joints by nonlinear analysis and yield theory // *Journal of Wood Scitnce. 2003. – V. 49, pp.383–391* <https://doi.org/10.1007/s10086-002-0497-3>
9. **Dorn M, Borst K, Eberhardsteiner J.** Experiments on dowel-type timber connections // *Engineering Structures, 2013. – 47, pp. 67–80* <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.09.010>
10. **Jorissen A.** Double shear timber connections with dowel type fasteners. – *Ph.D. Thesis. Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 1999 – 264 p.*
11. **Дмитриев П. А.** К расчету нагельных соединений деревянных элементов со стальными накладками и прокладками // *Строительство и архитектура, 1990 – № 2, с. 9–12.*
12. **Liu, Y., Wang, Y., Zhang, Y. et al.** Force-displacement relations of bolted timber joints

with slotted-in steel plates parallel to the grain
// *Journal of Wood Science*, 2020. – V. 6, 83

<https://doi.org/10.1186/s10086-020-01931-x>

13. **N. Gattesco, I. Toffolo.** Experimental study on multiple-bolt steel-to-timber tension joints // *Materials and Structures*, 2004 – 37(2), pp.129–138.

<https://doi.org/10.1007/BF02486609>

14. **J. Sjödin, E. Serrano.** A numerical study of methods to predict the capacity of multiple steel-timber dowel joints // *Holz als Roh und Werkstoff*, 2008. – 66, pp. 447–454

<https://doi.org/10.1007/s00107-008-0271-3>

15. **J. Schoenmakers, A. Jorissen, A. Leijten.** Evaluation and modelling of perpendicular to grain embedment strength // *Wood Science and Technology*, 2009. – pp.1–17.

<https://doi.org/10.1007/c00226-009-0296-38>

16. **J. Jensen.** Splitting strength of beams loaded perpendicular to grain by dowel joints// *Journal of Wood Science*, 2005. – 51 (5), 480–485.

<https://doi.org/10.1007/s10086-004-0687-2>

17. **A. Awaludin, T. Hirai, T. Hayashikawa, Y. Sasaki.** Load-carrying capacity of steel-to-timber joints with a pretensioned bolt// *Journal of Wood Science*, 2008. – 54(5), pp.362–368.

<https://doi.org/10.1007/s10086-008-0962-8>

18. **P. Cachim, J.-M. Franssen.** Numerical modelling of timber connections under fire loading using a component model // *Fire Safety Journal*, 2009. – 44(6), pp. 840–853.

<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.03.013>

19. **J. Sjödin, E. Serrano.** An experimental study of the effects of moisture variations and gradients in the joint area in steel-timber dowel joints. // *Holzforschung*, 2008. – 62(2), pp. 243–247.

<https://doi.org/10.1515/HF.2008.020>

20. **D. R. Rammer, S. G. Winistorfer.** Effect of moisture content on dowelbearing Strength // *Wood and Fiber Science*, 2001. – 33 (1), pp.126–139.

21. **A. Bouchair, A. Vergne.** An application of the Tsai criterion as a plastic flow law for timber bolted joint modelling// *Wood Science and Technology*, 1996. 30 (1), pp. 3–19.

22. **N. Kharouf, G. McClure, I. Smith.** Elastoplastic modeling of wood bolted connections// *Computers and Structures*, 2003. – 81(8-11), pp. 747–754.

[https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(02\)-00482-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(02)-00482-0)

23. **J. Gonzalez Fueyo, M. Dominguez, J. Cabezas, M. Rubio.** Design of connections with metal dowel-type fasteners in double shear // *Materials and Structures*, 2009. – 42(3), pp.385–397.

<https://doi.org/10.1617/s11527-008-9389-3>

24. **E. Resch, M. Kaliske.** Three-dimensional numerical analyses of loadbearing behavior and failure of multiple double-shear dowel-type connections in timber engineering// *Computers and Structures*, 2010. – 88 (3-4), p. 165–177.

DOI: [10.1016/j.compstruc.2009.09.002](https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2009.09.002)

25. **J. Sjödin, E. Serrano.** An experimental and numerical study of the effect of friction in single dowel joints // *European Journal of Wood and Wood Products*, 2018. – 66(5), pp. 363–372.

DOI: [10.1007/s00107-008-0267-z](https://doi.org/10.1007/s00107-008-0267-z)

26. **P. Dobeš, A. Lokaj, D. Mikolasek.** Load-carrying capacity of double-shear bolted connections with slotted-in steel plates in squared and round timber based on the experimental testing, European Yield Model, and linear elastic fracture mechanics // *Materials*, 2022 – 15(8), 2720

<https://doi.org/10.3390/ma15082720>

27. **M. Domínguez, J. Fueyo, A. Villarino, N. Antón.** Structural Timber Connections with Dowel-Type Fasteners and Nut-Washer Fixings: Mechanical Characterization and Contribution to the Rope Effect // *Materials Science. Materials*. 2021. – 15(1), 242

<https://doi.org/10.3390/ma15010242>

28. **Matsubara, D., Teranishi, M., Wakashima, Y.** Elastic interaction in multiple bolted timber joints// *Journal of Wood Science*, 2022. – 68, 53

<https://doi.org/10.1186/s10086-022-02060-3>

29. **Xu B, Bouchair A, Racher P.** Mechanical behavior and modeling of dowelled steel-to-timber moment-resisting connections// *Journal of Structural Engineering*, 2015. – 141(6)-04014165

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.00011](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.00011)

REFERENCES

1. **DSTU-N B EN 1995-1-1:2010** Yevrokod 5. Proektuvannia derevianykh konstruksii. Chastyna 1-1. Zahalni pravyla i pravyla dlia sporud (EN 1995-1-1:2004, IDT)
2. **DBN B.2.6-161:2017.** Konstruksii budynkiv i sporud. Dereviani konstruksii. Osnovni polozhennia // K.,Minrehionbud Ukrainy,2017 – 111 s.
3. **Afanasieva L.V., Kulik T.R.** Harmonizatsiia mizhnarodnykh i natsionalnykh standartiv yak mekhanizm tekhnichnoho rehuliuвання budivel-noi haluzi Ukrainy // *Zbirnyk prats XIV Mizh-narodnoi naukovoï konferentsii «Nauka i*

- osvita». *Uhorshchyna, Khaidusoboslo*, 2020, s. 3-7.
4. **Bilyk A.S., Beliaiev M.A.** BIM-modeliuvannia: ohliad mozhlyvosti ta perspektyvy v Ukraini // *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy*. 2015. – №2, c. 93–15.
 5. **Lavrinenko L.I., Budko T.H.** Zastosuvannia metodiv i modelei VIM-tekhnologii pry proektuvanni kupolnoho pokryttia akvaparku z derevianymy arkamy//*Suchasni budivelni konstruksii z metalu ta derevyny: Zbirnyk naukovykh prats, ODABA, 2021, – Byp.25, s.72-84*
<https://doi.org/10.31650/2707-3068-2021-25-72-84>
 6. **Benzel O., Lavrinenko L.** Informatsiine modeliuvannia stalevoi budivli z pidvyshchenymy vymohamy zhorstkosti // *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*. 2021, – Vyp. 9, s. 30-44
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.9.2021.30-44>
 7. **Johansen K. W.** Theory of Timber Connections // *IABSE, Publications No 9, Bern, Switzerland*, 1949, pp. 249–262.
 8. **Sawata K, Yasumura M.** Estimation of yield and ultimate strengths of bolted timber joints by nonlinear analysis and yield theory// *Journal of Wood Science*. 2003. – V. 49, pp.383–391
<https://doi.org/10.1007/s10086-002-0497-3>
 9. **Dorn M, Borst K, Eberhardsteiner J.** Experiments on dowel-type timber connections // *Engineering Structures*, 2013. – 47, pp. 67–80
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.09.010>
 10. **Jorissen A.** Double shear timber connections with dowel type fasteners. – *Ph.D. Thesis. Delft University of Technology, Delft, Netherlands*, 1999 –264 p.
 11. **Dmytryev P. A.** K raschetu nahelnykh soedyneni dereviannykh elementov so stalnymy nakladkamy y prokladkamy // *Stroytelstvo y arkhytektura*, 1990 – № 2, c. 9–12.
 12. **Liu, Y., Wang, Y., Zhang, Y. et al.** Force-displacement relations of bolted timber joints with slotted-in steel plates parallel to the grain // *Journal of Wood Science*, 2020. – V. 66:83
<https://doi.org/10.1186/s10086-020-01931-x>
 13. **N. Gattesco, I. Toffolo.** Experimental study on multiple-bolt steel-totimber tension joints // *Materials and Structures*, 2004 –37(2), pp. 129–138.
<https://doi.org/10.1007/BF02486609>
 14. **J. Sjödin, E. Serrano.** A numerical study of methods to predict the capacity of multiple steel-timber dowel joints // *Holz als Roh – undWerkstoff*, 2008. – 66, pp. 447–454
<https://doi.org/10.1007/s00107-008-0271-3>
 15. **J. Schoenmak rs, A. Jorissen, A. Leijten.** Evaluation and modelling of perpendicular to grain embedment strength // *Wood Science and Technology*, 2009. – pp.1–17.
<https://doi.org/10.1007/c00226-009-0296-38>
 16. **J. Jensen.** Splitting strength of beams loaded perpendicular to grain by dowel joints// *Journal of Wood Science*, 2005. - 51 (5), 480–485.
<https://doi.org/10.1007/s10086-004-0687-2>
 17. **A. Awaludin, T. Hirai, T. Hayashikawa, Y. Sasaki.** Load-carrying capacity of steel-to-timber joints with a pretensioned bolt// *Journal of Wood Science*, 2008. - 54(5), pp.362–368.
<https://doi.org/10.1007/s10086-008-0962-8>
 18. **P. Cachim, J.-M. Franssen.** Numerical modelling of timber connections under fire loading using a component model // *Fire Safety Journal*, 2009. - 44(6), pp. 840–853.
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.03.013>
 19. **J. Sjödin, E. Serrano.** An experimental study of the effects of moisture variations and gradients in the joint area in steel-timber dowel joints. // *Holzforchung*, 2008. - 62(2), pp. 243–247.
<https://doi.org/10.1515/HF.2008.020>
 20. **D. R. Rammer, S. G. Winistorfer.** Effect of moisture content on dowelbearing Strength // *Wood and Fiber Science*, 2001. - 33 (1), pp.126–139.
 21. **A. Bouchair, A. Vergne.** An application of the Tsai criterion as a plastic flow law for timber bolted joint modelling//*Wood Science and Technology*, 1996. 30 (1), pp. 3–19.
 22. **N. Kharouf, G. McClure, I. Smith.** Elastoplastic modeling of wood bolted connections// *Computers and Structures*, 2003. - 81(8-11), pp. 747–754.
[https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(02\)-00482-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(02)-00482-0)
 23. **J. Gonzalez Fueyo, M. Dominguez, J. Cabezas, M. Rubio.** Design of connections with metal dowel-type fasteners in double shear // *Materials and Structures*, 2009. -42(3), pp. 385–397.
<https://doi.org/10.1617/s11527-008-9389-3>
 24. **E. Resch, M. Kaliske.** Three-dimensional numerical analyses of loadbearing behavior and failure of multiple double-shear dowel-type connections in timber engineering// *Computers and Structures*, 2010. - 88 (3-4), pp. 165–177.
DOI: [10.1016/j.compstruc.2009.09.002](https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2009.09.002)
 25. **J. Sjödin, E. Serrano.** An experimental and numerical study of the effect of friction in single dowel joints // *European Journal of Wood and Wood Products*, 2018. – 66(5), pp. 363–372.
DOI: [10.1007/s00107-008-0267-z](https://doi.org/10.1007/s00107-008-0267-z)

26. **P. Dobeš, A. Lokaj, D. Mikolasek.** Load-Carrying Capacity of Double-Shear Bolted Connections with Slotted-In Steel Plates in Squared and Round Timber Based on the Experimental Testing, European Yield Model, and Linear Elastic Fracture Mechanics // *Materials*, 2022 – 15(8), 2720

<https://doi.org/10.3390/ma15082720>

27. **M. Domínguez, J. Fueyo, A. Villarino, N. Antón.** Structural Timber Connections with Dowel-Type Fasteners and Nut-Washer Fixings: Mechanical Characterization and Contribution to the Rope Effect // *Materials Science. Materials*. 2021. – 15(1), 242

<https://doi.org/10.3390/ma15010242>

28. **Matsubara, D., Teranishi, M., Wakashima, Y.** Elastic interaction in multiple bolted timber joints// *Journal of Wood Science*, 2022. - 68, 53

<https://doi.org/10.1186/s10086-022-02060-3>

29. **Xu B, Bouchair A, Racher P.** Mechanical behavior and modeling of dowelled steel-to-timber moment-resisting connections// *Journal of Structural Engineering*, 2015. – 141(6)-04014165

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.00011](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.00011)

FEATURES OF BEHAVIOR AND CALCULATION OF DOWEL TIMBER JOINTS WITH SLOTTED-IN PLATES ACCORDING TO EC5

*Liudmyla LAVRINENKO,
Liudmyla AFANASIEVA
Vitalii TONKACHEIEV*

Summary. The paper presents an overview of theoretical and experimental studies of connections

of timber structures with steel dowel with steel slotted-in plates. The correct choice of the type of connections allows you to significantly influence the total cost of the structure due to the formation of the structural and assembly scheme of the structure (minimization of the number of nodal and assembly connections), optimal unification of connections is an additional argument for creating an economical and competitive solution. For the analysis of the dowel connection, it is taken into account that the force is transmitted due to the bending and shear resistance of the fastening element, as well as crumpling in the connected timber elements. The limit states of the dowel joint are considered loss of strength due to crumpling and splitting of the wood of the hole wall, as well as due to bending of the nail in the nail socket. The works considered in the review provide extensive factual material on the strength of connections depending on the geometric and physical parameters of its components, as well as the stiffness of the connection, which is currently the subject of active attention of researchers. Attention is paid to the need to study the operation of nodes under the action of a moment during group operation of the connection. The analysis of numerous experiments makes it possible to check the reliability of the current design rules and norms of EC5 and the design norms of DBN B.2.6-161:2017 implemented to them, and also revealed the shortcomings and limits of the application of the design rules for this type. connections The results of numerical and experimental studies are the basis for improving the structural solutions of the joints of wooden elements and allowed to accumulate significant factual material for the verification of numerical simulation models.

Keywords. Timber structures; dowel-type connections; steel plates; Eurocode 5.

Стаття надійшла до редакції 19.11.2023