

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет міського господарства
імені О.М. Бекетова

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

РАСПОПОВ ЄВГЕНІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 624.011

ДИСЕРТАЦІЯ

МІЦНІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ ВУЗЛОВОГО З'ЄДНАННЯ НА
ВКЛЕСНИХ СТЕРЖНЯХ В ЕЛЕМЕНТАХ ІЗ БРУСУ З КЛЕСНОГО ШПОНУ

Спеціальність 05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди

Галузь 019 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело _____ Є.А. Распопов

Науковий керівник

к.т.н. А.М. Бідаков

Харків – 2021

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Сучасний стан питання дерев'яних конструкцій на основі шпону і вузлових з'єднань на вклеєних стержнях.....	17
1.1. Місце деревини і матеріалів на основі деревини в сучасному будівництві	17
1.2. Конструкції з лущеного шпону.....	19
1.3. Область застосування LVL бруса в сучасному будівництві	26
1.4. Жорсткі і напівжорсткі з'єднання на вклеєних стержнях.....	32
1.5. Методи випробувань вклеєних стержнів на висмикування	37
1.6. Аналіз існуючих методик розрахунку міцності вклеєних стержнів на висмикування	41
Висновки по розділу 1	43
2. Теоретичні передумови дерев'яних пластиків на основі деревини	45
2.1. Загальні положення анізотропних властивостей деревини і шаруватих дерев'яних матеріалів	45
2.2. Обґрунтування розрахункових моделей	52
2.3. Розрахунок напруженого стану по елементарному шару шпону ...	58
2.4. Пластична модель для клейових з'єднань деревини.....	63
Висновки по розділу 2.....	72
3. Експериментальні дослідження міцності LVL бруса і вклеєних стержнів	74
3.1. Аналіз існуючих зразків і даних експериментів LVL при стиску під різними кутами.....	74
3.1.1 Методика проведення експериментальних досліджень	79
3.1.2 Характеристичні і нормативні показники міцності деревини	83
3.1.3 Результати експериментальних досліджень зразків з LVL бруса на стиск під різними кутами.....	88
3.2 Випробування вклеєних стержнів на висмикування	93

3.3 Експериментальні дослідження міцності LVL бруса при сколюванні.....	99
3.4 Методика проведення випробувань балок з з'єднанням на вклеєних стержнях	101
3.5 Аналіз результатів натурних експериментальних досліджень балок	106
Висновки по розділу 3.....	109
4. Чисельні дослідження міцності з'єднань на вклеєних стержнях	111
4.1. Основні положення і вихідні дані розрахункової моделі.....	111
4.2. Аналіз чисельних досліджень напружено-деформованого стану вклеєних стержнів.....	112
4.3. Порівняльний аналіз чисельних і експериментальних даних деформацій балок.....	117
Висновки по розділу 4.....	122
5. Методика розрахунку міцності вклеєною стержнів встановлених в LVL брус вздовж волокон	123
5.1. Методика розрахунку міцності вклеєних стержнів з урахуванням особливості структури LVL бруса.....	123
5.2. Методи підсилення з'єднань на вклеєних стержнях в LVL брусі...	128
5.3. Приоритетний напрямок подальшого розвитку вклеєних стержнів у високоміцних сучасних будівельних матеріалах на основі деревин.....	131
5.4. Рекомендації щодо впровадження методики розрахунку вклеєних стержнів у національні норми з проектування дерев'яних конструкцій.....	132
Висновки по розділу 5.....	137
Загальні висновки.....	139
Список використаних джерел.....	140
Додатки.....	155

АНОТАЦІЯ

Распопов Є.А. Міцність та деформативність вузлового з'єднання на вклеєних стержнях в елементах із бруса з клеєного шпоноу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» (019 – Архітектура та будівництво). – Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Харків, 2019.

Дисертацію присвячено дослідженню вузових з'єднань ЛВЛ бруса на вклеєних стержнях.

Дисертаційну роботу виконано з метою розробки методики розрахунку міцності вклеєних стержнів та правила їхнього розташування, з урахуванням міцності та пружних характеристик ЛВЛ бруса з односпрямованим шпоном. Для виконання поставленої мети було вирішено задачу з визначення міцності та пружних характеристик ЛВЛ бруса з односпрямованим шпоном при стиску під різними кутами нахилу волокон та міцності при сколюванні по грані вздовж волокон. Також експериментально була досліджена міцність вклеєних стержнів при висмикуванні, які розташовані в ЛВЛ брусі вздовж волокон. На підставі експериментальних досліджень матеріалу та вклеєних стержнів проведено аналіз, який дозволив оцінити роботу вузлового з'єднання типу «металева вставка» з використанням вклеєних стержнів з подальшим чисельним дослідженням у програмному комплексі ANSYS для порівняння отриманих результатів розрахунку з експериментально отриманими даними. Внаслідок аналізу експериментальних даних встановлено характер руйнування вклеєних стержнів у ЛВЛ брусі з не характерним для клеєної деревини утворенням овалізації лінії руйнування деревини навколо стержня та розколюванням деревини. Проведено порівняльний аналіз чисельних та експериментальних даних, а також аналіз існуючих методик розрахунку міцності вклеєних стержнів, який дав змогу обґрунтовано розробити практичні рекомендації конструювання вузлів та

інженерну методику розрахунку міцності вклеєних стержнів у ЛВЛ бруси при висмикуванні. Виконано порівняльний аналіз міцності вклеєних стержнів, згідно до запропонованої методики та методиками, які містяться у національних нормативних документах різних країн.

На підставі аналізу характеру руйнування вклеєних стержнів, запропоновані методи підсилення з'єднань на вклеєних стержнях у ЛВЛ бруси, які перешкоджають крихкому руйнуванню та підвищують несучу здатність з'єднання.

Ключові слова: вклеєні стержні, напівжорсткі з'єднання, шпоновий брус, ЛВЛ, Ультралам тип R, відстань між стержнями, схема руйнування, міцність на висмикування, методика розрахунку, міцність на сколювання, розрахункова модель, розрахункові передумови.

ABSTRACT

Raspopov I. Strength and rigidity of nodal connections with glued-in steel rods in the laminated veneer lumber elements. – Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.23.01 “Building structures, buildings and installations” (019 – Architecture and Construction). – O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, 2018.

The thesis is devoted to the study of node connections of the LVL beam with glued-in rods.

The thesis was done in order to develop a method for calculating the strength of glued-in rods and the rules for their location, taking into account the strength and elastic characteristics of an LVL beam with unidirectional veneer. In order to achieve this goal, the applicant solved the problems of determining the strength and elastic compression characteristics of the LVL beam with the unidirectional veneer at different angles of the grains and the sliding strength along the faces along the grains. Also, experimentally, the withdrawal strength of the glued-in

rods, which were located in the LVL beam along the grains, was investigated. On the basis of experimental studies of the material and glued-in rods, the author of the thesis carried out an analysis that made it possible to evaluate the operation of a nodal connection of the “metal connector” type using glued-in rods with subsequent numerous studies in the ANSYS software package to compare the calculated results with the experimentally obtained data. As a result of the analysis of experimental data, it was determined that the destruction of the glued-in rods in the LVL beam was non-characteristic for GLT and formed the ovalization of the timber destruction line around the rod and the splitting of the timber. A comparative analysis of numerical and experimental data, as well as an analysis of existing methods for calculating the strength of glued-in rods, allowed us to develop the practical recommendations for the node design and the engineering methodology for calculating the withdrawal strength of the glued-in rods in the LVL beam. A comparative analysis of the strength of the glued-in rods obtained by the proposed methodology and methods contained in the national codes of different countries is carried out.

Based on the analysis of the destruction of the glued-in rods, methods of joint reinforcing by glued-in rods in LVL beams, which prevent brittle fracture and enhance the load-bearing ability of the connection, are proposed.

Key words: glued-in steel rods, semi-rigid connection, laminated veneer lumber, LVL, Ultralam type R, axes and edge distance, model of rupture, pull-pull tests, pull-out strength, design rules, application, shear strength, calculation model, design approach.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

У наукових періодичних виданнях іноземних держав та у фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Фурсов В.В., Бидаков А.Н., Распопов Е.А. Прочность клееных стержней на выдергивание при осевом нагружении установленных в LVL элементы с однонаправленным шпоном. // Проектирование, изготовление и монтаж стальных конструкций. Опыт и перспективы развития: сб. науч. трудов «Проектстальконструкція ім. В.М. Шимановського. – 2016. – Випуск 18. – С. 24-33. *(Особистий внесок: проведено експериментальні та чисельні дослідження міцності клеєних стержнів у ЛВЛ брусі).*

2. Бидаков А.Н., Распопов Е.А. Прочностные и упругие характеристики шпонового бруса LVL при сжатии под различными углами к наклону волокон. Містобудування та територіальне планування, № 65, КНУБА, с. 91-99, Київ, 2017. *(Особистий внесок: проведено лабораторне дослідження зразків ЛВЛ при стиску під кутами).*

3. Bidakov A., Raspopov I. Test method of CLT by tension perpendicular to the grain. Academic Journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering. – (50)'2018, p.148-158. *(Особистий внесок: проведено аналіз отриманих даних при випробуваннях різних типів зразків поперечної клеєної деревини).*

4. Бидаков А.Н., Распопов Е.А., Страшко Б.О. Узловые соединения ЛВЛ бруса на клееных стержнях с металлической вставкой. Київ : Будівельні конструкції. Теорія і практика. КНУБА, 2018. – Вип. 2. – С. 80–91. *(Особистий внесок: розроблено та випробувано металеву вставку для створення різних вузлів з ЛВЛ брусом на клеєних стержнях).*

5. Распопов Е.А. Аналіз міцності клеєних стержнів, установлених у ЛВЛ брус з урахуванням міцності при сколюванні. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. №176 (2018), с. 14 – 22. *(Особистий внесок: проведено порівняльний аналіз*

міцності вклеєних стержнів та міцності ЛВЛ бруса при сколюванні вздовж волокон).

6. Bidakov A., Raspopov I., Pustovoitova O. Specificity of strength calculation for glued-in steel rods in LVL with unidirectional veneer. Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering. – 2(51)'2018, p.196-201. *(Особистий внесок: виконано аналіз чисельних та експериментальних даних за різними методиками розрахунку міцності вклеєних стержнів).*

7. Бідаков А.М., Распопов Є.А., Пуйстовойтова О.М., Страшко Б.О. Особливості метода зсувної аналогії для розрахунку міцності ПКД панелей при згині. Вісник придніпровської державної академії будівництва та архітектури: науково-практичний журнал, ПДАБА, 2020. – № 2(263-264), с. 10-15. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280420.10.616. *(Особистий внесок: проведено збір інформації та виконано її класифікацію для відокремлення особливостей розглянутого метода).*

8. Бідаков А.М., Распопов Є.А., Пуйстовойтова О.М., Страшко Б.О. Переваги та недоліки γ -методу для розрахунку міцності ПКД панелей при згині. Науково-технічний журнал «Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві», Том 27, №2, 2019, с. 12-19. . <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-2-12-19>. *(Особистий внесок: виконано критичний аналіз розглянутого методу розрахунку спираючись на змінність товщин ПКД панелей та складових їх структури).*

9. Бідаков А.М., Распопов Є.А., Пуйстовойтова О.М., Страшко Б.О. Порівняльний аналіз експериментальних досліджень та чисельних розрахунків міцності вклеєних стержнів у CLT панелях. Технічні науки та технології: науковий журнал / Чернігів нац. технол. ун-т. – Чернігів: ЧНТУ, 2020. – № 1(19), с. 321-328. DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-321-328. *(Особистий внесок: проведено детальну обробку отриманих даних лабораторних статичних випробувань з урахуванням локацій розташування стержнів у поперечному перерізі панелі з ПКД).*

10. Бідаков А.М., Распопов Є.А., Пуйстовойтова О.М., Страшко Б.О. Вплив технології виробництва ПКД панелей на їх показники міцності та жорсткості. Комунальне господарство міст, 2020, том 1, випуск 154, с. 165-171. *(Особистий внесок: підготовлено сукупність даних різних виробників панелей з ПКД із європейських технічних заключень ЕТА).*

11. Bidakov A., Raspopov I., Pustovoitova O., Strashko B. Strength analysis of glued-in steel rods with different locations in CLT panels cross section. Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering. – 2(53)'2019, p.42-47. *(Особистий внесок: підготовлені графіки та зображення схем навантаження зразків, а також сформульовані деякі висновки за результатами отриманих даних).*

12. Бидаков А.Н., Распопов Е.А., Пуйстовойтова О.М., Страшко Б.А. Изменение прочности клееных стержней на выдергивание в поперечной клееной древесине (CLT) в зависимости от локации стержня в поперечном сечении панели. Науковий вісник будівництва, т. 98, № 4, ХНУБА, с. 202-208, Харків, 2019.

13. Бідаков А.М., Распопов Є.А., Пуйстовойтова О.М., Страшко Б.О. Міцність деревини за умови роликового зсуву. Вісник ХНАДУ, вип. 89, 2020, с. 82-89. *(Особистий внесок: підібрано та класифіковано групу даних різних дослідників за обраною проблематикою за ознаками методів випробувань, розмірів зразків та початкових припущень).*

14. Бидаков А.Н., Распопов Е.А., Пуйстовойтова О.М., Страшко Б.А. Сравнительный анализ методов Тимошенко и Г-метода для расчета прочности ПКД панели при изгибе. East European Scientific Journal. Варшава, Республика Польша, 2021, №7 (71), С. 33–39. *(Особистий внесок: проведено підготовку даних та проведено порівняльний критичний аналіз з відокремленням якісних показників).*

У інших виданнях:

1. A. Bidakov, I.Raspopov. Semi-rigid Joints of LVL elements with glued-in steel rods and metal connector. Proceedings of the 1st Eastern Europe Conference on Timber Constructions. Kharkiv. Kharkiv, 2018. – 142p., p. 27-37. *(Особистий внесок: проведено підготовку та статистичний аналіз міцності зразків після виконання випробувань).*

2. A. Bidakov, I.Raspopov, B. Strashko. 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. – 142p., p. 87-97. *(Особистий внесок: розроблено загальні практичні рекомендації щодо варіантів можливого розташування вклеєних стержнів у поперечній клеєній деревині).*

ВСТУП

Актуальність теми. Розробка нових матеріалів на основі деревини з характеристиками міцності і пружними характеристиками, які значно перевищують показники цільної деревини при мінімальних технологічних витратах, а також знижують кількість відходів при виробництві будівельних конструкцій, є пріоритетним завданням на сучасному етапі розвитку будівельних матеріалів на основі деревини. Дерев'яні матеріали на основі шпону відомі з початку 20 століття у вигляді фанери і активно застосовуються в різних технічних і побутових сферах діяльності людини. Своє застосування фанера, як шпоновий матеріал, знайшла в машинобудуванні, авіабудуванні (періоду Другої світової війни), в вагонобудуванні, меблевому виробництві, малих архітектурних формах і т. і.

Будівельне виробництво близько 20 років тому отримало LVL брус як новий дерев'яний матеріал на основі шпону з високими показниками міцності і жорсткості, який використовується при будівництві каркасів будівель різної поверховості. Покращені механічні характеристики LVL бруса вимагають розробки нових видів з'єднань конструкцій і удосконалення існуючих з

урахуванням специфіки матеріалу. Тому завдання дисертаційної роботи спрямовані на вирішення питань міцності вклеєних стержнів і правил їх розміщення з урахуванням міцності і пружних характеристик LVL бруса встановлених експериментальним лабораторними дослідженнями для конкретного його типу з відповідним характером розташування шпону. Існує необхідність дослідження пружних характеристик і міцності LVL бруса при різних видах напруженого стану, результати яких потрібні при вирішенні ряду задач конструювання вузлових з'єднань та розрахунку їх міцності із застосуванням розрахункових програмних комплексів. Питання пружних характеристик і міцності LVL бруса розглядаються в даній роботі разом з аналізом міцності з'єднань на вклеєних стержнях, що робить отримані результати вкрай актуальними і необхідними при проектуванні унікальних будівель і споруд, які потребують детального аналізу міцності і деформативності елементів конструкцій з LVL бруса, а також поведінки їх вузлових з'єднань.

Викладене вище засвідчує необхідність вирішення актуальної наукової проблеми визначення міцності і правила розстановки вклеєних стержнів вздовж волокон у вузлових з'єднаннях LVL бруса з урахуванням його міцності і пружних характеристик.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота відповідає напрямам науково-технічної політики держави в галузі впровадження нормативних документів, гармонізованих із європейськими згідно з постановами та розпорядженнями Кабінету Міністрів України від 23 травня 2011 № 547 «Про затвердження Порядку застосування будівельних норм, розроблених на основі національних технологічних традицій, та будівельних норм, гармонізованих з нормативними документами Європейського Союзу».

Дисертаційні дослідження виконані в рамках держбюджетної роботи ХНУБА на тему: «Дослідження роботи вклеєних стержнів у LVL» (державний реєстраційний номер 0117U003202).

Мета та задачі досліджень:

Мета наукової роботи полягає у розробці методики розрахунку міцності клеєних стержнів та правила їх розташування у вузловому з'єднанні з металевою вставкою, з урахуванням міцності та пружних характеристик LVL бруса з односпрямованим шпоном.

Для досягнення мети треба вирішити такі задачі:

1. Встановити міцність та пружні характеристики LVL бруса з односпрямованим шпоном при стиску під різними кутами нахилу волокон.
2. Встановити міцність LVL бруса при сколюванні по грані вздовж волокон.
3. Експериментально дослідити міцність клеєних стержнів при висмикуванні, які розташовані в LVL брусі вздовж волокон.
4. Експериментально дослідити міцність вузлового з'єднання типу «металева вставка» з використанням клеєних стержнів.
5. Розробити методику розрахунку міцності клеєних стержнів та рекомендації по конструюванню вузових з'єднань LVL бруса.
6. Розробити методи підсилення з'єднань на клеєних стержнях у ЛВЛ брусі, які перешкоджають крихкому руйнуванню та підвищують несучу здатність з'єднань.

Об'єкт дослідження:

Робота та поведінка вузлові з'єднання на клеєних стержнях в елементах із бруса з клеєного шпону.

Предмет дослідження:

Міцність клеєних стержнів на висмикування та правила їх розташування вздовж волокон у вузових з'єднаннях LVL бруса з урахуванням його міцності та пружних характеристик.

Методи дослідження:

— експериментальні методи дослідження міцності та деформативності дерев'яних конструкцій та їх вузових з'єднань;

- фізичне моделювання з використанням електротензометричного методу для визначення відносних деформацій при дослідженні параметрів напружено-деформованого стану зразків з ЛВЛ бруса;
- чисельні методи теорії пружності ортотропних та анізотропних тіл;
- методи математичної статистики при обробці результатів експериментальних досліджень;
- методи комп'ютерного моделювання конструкцій з використанням з урахуванням ортотропних властивостей деревини та матеріалів на її основі.

Наукова новизна результатів.

Вперше:

- отримані експериментальні дані пружних і міцнісних характеристик LVL бруса при стисненні під різними кутами;
- отримані результати про зміну величини міцності при сколюванні в залежності від розмірів зразків LVL бруса з шпону деревини хвойних порід;
- отримані нові експериментальні дані про роботу вклеєних стержнів, що встановлені в LVL брус уздовж волокон зі зменшеними параметрами відстаней між стрижнями;
- отримані нові експериментальні дані про роботу з'єднань LVL бруса на вклеєних стержнях з металевою вставкою, які дозволяють створювати складні великопрольотні стержневі конструкції.

Розроблено:

- розроблені рекомендації проектних гвинтових підсилень в поперечному напрямку відносно осі вклеєного стержня.

Вдосконалено:

- вдосконалено методику розрахунку міцності вклеєних стержнів на висмикування з урахуванням особливостей структури та міцності ШБ, що значно відрізняється від клеєної та цільної деревини.

Практичне значення отриманих результатів:

- пружні характеристики, що отримані при випробуванні зразків LVL при стисненні під різними кутами, дозволяють точно визначити анізотропні

властивості матеріалу, що необхідні при моделюванні і розрахунку вузлових з'єднань;

- розроблено технічні рекомендації та проектні пропозиції щодо розрахунку та конструювання з'єднань LVL бруса на вклеєних стрижнях, встановлених уздовж волокон з урахуванням міцності на сколювання зразків різних розмірів;

- запропоновано універсальне вузлове з'єднання на вклеєних стержнях з металевою вставкою;

- результати досліджень вклеєних стержнів впроваджені при проектуванні великопрольотних стержневих конструкцій в робочі проекти компанії ТОВ «KAPSTORY Group»;

- запропоновано методи виконання проектних гвинтових підсилень з'єднань на вклеєних стержнях елементів з LVL бруса.

Результати досліджень впроваджено:

Результати досліджень шпонового бруса LVL та розроблені вузлові з'єднання були впроваджені компанією ТОВ «KAPSTORY Group», м. Харків, а також впроваджені Державним науково-дослідним та проектно-вишукувальним інститутом «НДІПРОЕКТРЕКОНСТРУКЦІЯ», Рівненська філія.

Особистий внесок здобувача Полягає в аналізі методів розрахунку вклеєних стержнів у клеєній деревині згідно до нормативних документів різних країн, проведені натурних і чисельних досліджень НДС за допомогою методу скінчених елементів та розроблення методики розрахунку вклеєних стержнів у LVL брусі, що відображено в наукових працях автором самостійно:

- розроблено нове з'єднання елементів з LVL бруса на вклеєних стержнях з металевою вставкою;

- виконано експериментальне дослідження пружних характеристик LVL бруса при стиску під різними кутами та міцності вклеєних стержнів при висмикуванні;

- виконано порівняльний аналіз експериментальних та аналітичних даних з розрахунків балок з металевою вставкою на вклеєних стержнях;
- запропоновано правила конструювання вузлових з'єднань на вклеєних стержнях у елементах з LVL при встановленні стержнів вздовж волокон або мінімальні відстані між стержнями та до кромek поперечного перерізу;
- вдосконалення методів розрахунку міцності вклеєних стержнів в LVL брусі встановлених вздовж волокон;
- виконано експериментальне дослідження вклеєних стержнів у ПКД панелях та аналіз розрахунків їх міцності за різними методиками при згині;
- розробка методів підвищення міцності вклеєних стержнів шляхом установки гвинтів.

Достовірність результатів:

Достовірність результатів досліджень, щодо міцності вклеєних стержнів у LVL брусі, працюючих на висмикування та встановлених вздовж волокон, визначається доброю збіжністю теоретичних розрахунків з експериментальними даними натурних випробувань, використанням апробованих методів будівельної механіки та аналітичних залежностей.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи висвітлені та обговоренні на: міжнародній науковій конференції «Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель та споруд» (м. Харків 2017 р.), на міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні методи і проблемно-орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій і їх застосування у проектуванні і навчальному процесі» (м. Київ 2017 р.), міжнародна науково-практична конференція «Сучасні методи і проблемно-орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій і їх застосування у проектуванні і навчальному процесі». Київ, КНУБА, 25-26 жовтня 2017; міжнародна конференція 1st Eastern Europe Conference on Timber Constructions. Kharkiv, 7-8 June, 2018; II Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні методи і проблемно-орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій і їх застосування у проектуванні і навчальному процесі », Київ,

26-27 вересня 2018.

В повному обсязі дисертація доповідалась на розширеному семінарі Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. О.М. Бекетова (червень 2020).

Публікації:

За темою дисертації опубліковано 16 наукових праць. Основні результати досліджень викладені у 9-ти статтях у друкованих виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України, 1 публікація у збірниках статей за матеріалами міжнародної конференції. З них 4 статті опубліковано в збірниках, які включені до міжнародних науково-метричних баз (Index Copernicus).

Структура та обсяг дисертації:

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, двох додатків. Дисертацію викладено на 160 сторінках, вона містить 140 сторінок основного тексту (в тому числі 7 таблиць, 63 рисунки), 136 найменувань літературних джерел (88 з них англійською мовою) на 15 сторінках та 2 додатків на 5 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ ШПОНУ ТА ВУЗЛОВИХ З'ЄДНАНЬ НА ВКЛЕЄНИ СТЕРЖНЯХ

1.1 Місце деревини і матеріалів на основі деревини в сучасному будівництві

Деревина, як будівельний матеріал, на початку 50-х років, завдяки розробкам нових клейових складів на основі синтетичних смол і інших складних клейових з'єднань, дали можливість виконувати склейку дощок, як по довжині зрощуючи на зубчастий стик, так і склеюючи дошки по ширині, утворюючи пакет склеєних дощок або так звану клеєну деревину. Отриманий деревний матеріал, на основі дощок з вирізаними фрагментами, що містять сучки і інші вади деревини, має механічні характеристики, що перевищують показники міцності цільної деревини або дощок. Клеєна деревина своєю появою сформувала новий напрямок так званих «клеєних дерев'яних конструкцій» (КДК) з певними параметрами прольоту і висоти, як для суцільних, так і наскрізних конструкцій каркасів будівель. Новий вид деревного матеріалу з урахуванням його показників міцності і деформативності вимагають розробки нових вузлових з'єднань або удосконалення традиційних інженерних рішень сполучення елементів конструкцій.

Деревина та деревні матеріали, як показано на рис. 1.1 [7], поділяються на 4 види залежно від вихідного деревного компонента, до яких відносяться: дошки, шпон, стружка і деревні волокна. Останні два компоненти є відходами виробництва лісопильних підприємств і успішно застосовуються для виробництва плитних деревних матеріалів та широко використовуються при виготовленні меблів і огорожувальних конструкцій у вигляді панелей для будівель різного типу.



Рис. 1.1 Схема складових компонентів будівельних матеріалів на основі деревини та її відходів [7]

Завдяки широкому застосуванню деревних матеріалів при будівництві житлових і офісних будівель в країнах Західної Європи (Німеччина, Австрія, Швейцарія) багато відомих видів будівельних матеріалів отримали подальший свій розвиток у вигляді появи нових матеріалів з поліпшеними характеристиками міцності цих матеріалів. Перш за все, це поява балочної клеєної деревини, ПКД панелей і LVL бруса, в тому числі букового LVL. Останній в даний час все більше застосовується при проектуванні елементів конструкцій з великими навантаженнями або посиленні існуючих через високі значень міцності і жорсткості.

Нормативні документи європейських країн з проектування дерев'яних конструкцій і стандарти з вказівками про методи їх випробувань перевидаються в середньому кожні 5 років, при цьому збільшується обсяг цих норм і стандартів. Подібна ситуація викликана застосуванням передових технологій в області нових будівельних матеріалів на основі деревини та постійним процесом удосконалення кріпильних елементів. Багато матеріалів

на основі деревини, такі як ОСП або OSB, LVL і ДВП (MDF), тривалий час були відсутні в національних нормах країн СНД, хоча були присутні на ринку будівельних матеріалів і створювали складності для інженерів-проектувальників при розрахунках конструкцій з використанням цих матеріалів. Перш за все, це пов'язано з різницею вітчизняних правил проектування і традицій в порівнянні з країнами Європейського союзу, а також Австралії, Канади і США. Станом на 2017 рік, нові редакції норм України [12], РФ [28] і Білорусії [29] вже включили багато доповнень щодо нових будівельних матеріалів, в тому числі ЛВЛ брус, і в великій мірі гармонізовані з Єврокодом-5 (EN 1995 -1-1: 2008 [77]), хоча ПКД або CLT панелі відсутні в нових редакціях норм. Дана ситуація значно ускладнює можливість проектування багатоповерхових житлових і офісних будівель з використанням ПКД панелей на території України. Частина лабораторних випробувань ЛВЛ бруса, для інтеграції в національні норми України ДБН В.2.6-161:2017 [12], розглянуті в даній роботі і дозволили сформулювати нові вказівки для такої редакції національних норм вузлових з'єднань на клеєних стрижнях. Вказівки по розрахунку і конструювання з ЛВЛ бруса містяться також в зарубіжних нормативних документах таких країн як Німеччина (DIN 1052: 2008-12 [75]), Австрія (*ÖNORM B 1995-1-1* діє до: 2015 [41]) і Швейцарія (SIA 265 діє до: 2012 [118]).

1.2 Конструкції з лущеного шпону

Деревні плитні матеріали на основі шпону широко застосовуються в різних виробничих галузях, серед яких авіабудування, вагонобудування і будівництво. Найвідомішим матеріалом, що частіше зустрічається, на основі шпону є фанера, оскільки область її застосування охоплює не тільки деякі галузеві напрями, а й структуру людського побуту. Завдяки високим показниками міцності і незначній масі фанерні листи використовувалися як обшивка крил літаків і їх фюзеляжів (літак Іл-2) в період Другої світової війни. Відчуваючи значні динамічні навантаження, фанерні листи на основі

шпону берези або тополі, які мають різну геометричну кривизну, показували істотну міцність і надійність матеріалу, здатного бути альтернативою алюмінію. У вагонобудуванні фанерні плити, як правило, використовуються як підлоговий щитовий настил, що дозволило знизити металоємність вагонів. Також фанера активно використовується в транспортній галузі, де її застосовують при складанні контейнерів як замітник листової сталі. Перші конструктивні рішення з використанням фанери спостерігаються в балках, а саме в стінках балок різного поперечного перерізу, наприклад: двотаврового, коробчастого, двотаврового з двома стінками, двотаврового з Х-подібною стінкою [5, 6, 35, 36], і т. п. Висота таких конструкцій, згідно з раніше діючими нормами, не перевищувала 1,5 м, що пов'язано з висотою фанерних листів, що випускаються вітчизняними виробниками. Наслідком регламентованої висоти конструкцій був обмежений проліт, який не перевищував 18-20 м. Через необхідність установки поперечних ребер жорсткості, які вимагають точної приторцовки до поясів і істотно підвищують трудомісткість їх виробництва, масове застосування клеєфанерних балок в будівельній практиці не було реалізовано. Також фанерні листи активно використовуються в конструкціях плит перекриттів і покриттів, а також в конструкціях стінових огорожувальних панелей.

Дерев'яні шаруваті пластики в середині минулого століття стали продовженням ідеї фанери як шпонового матеріалу, але з незначними доповненнями. Товщина шпону в деревних пелюстках від 0,1 до 0,5 мм, що істотно збільшує кількість клею і, відповідно, збільшує їх міцність. Головною особливістю деревних шаруватих пластиків є схема розташування шпону. У деревних шаруватих пелюстках (ДШП) розташування шпон щодо суміжних шарів може змінюватися в різних діапазонах кратним 45° , 30° і 15° . Така схема розташування шпону (рис. 1.2) дозволяє отримати листовий матеріал з пружними і міцності близькими до ізотропної пластини. Високі показники міцності ДШП були затребувані оборонним сектором вітчизняної промисловості при будівництві неметалевих радіопрозорих конструкцій.

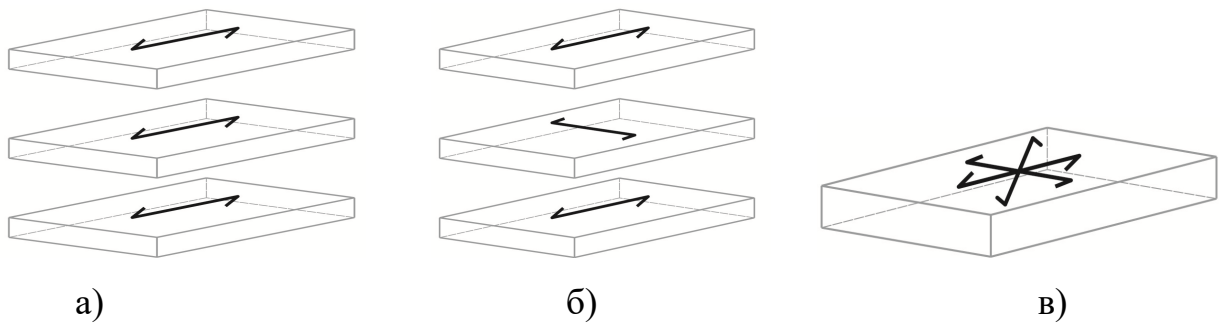


Рис. 1.2 Схема розташування шпону деревних шаруватих пластиків:

а) односпрямований; б) під кутом 90° ; в) під кутом 45° .

За останні 40 років новий етап розвитку отримали деревні матеріали на основі шпону, так як виникли їх нові види з високими показниками міцності і жорсткості. Найбільш широко відомий з них це шпоновий брус або ЛВЛ (Laminated Veneer Lumber або скорочено LVL, див. рис. 1.3) і конструкційний брус (Structural Composite Lumber SCL), який в свою чергу поділяється на 2 види: зі структурованим розташуванням шпону LSL (Laminated Strand Lumber) і з паралельним розташуванням шпону PSL (Parallel Strand Lumber). Конструкційний брус проводиться шляхом пресування ламаного шпону і широко використовується в Канаді, Австралії, Новій Зеландії та США. На рис. 1.3) показаний зовнішній вигляд конструкційного бруса.

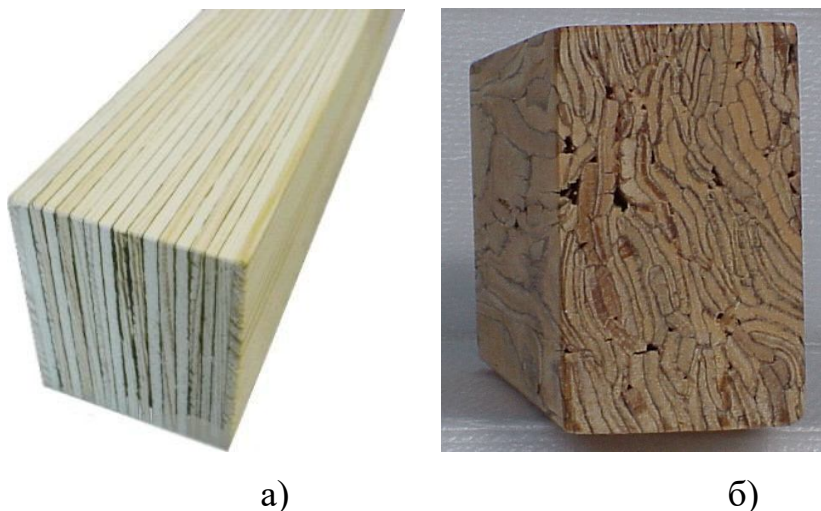


Рис. 1.3 Зовнішній вигляд шпонкового бруса ЛВЛ і конструкційного бруса: а) шпоновий брус ЛВЛ; б) конструкційний брус.

Дерев'яні матеріали на основі шпону є плитними матеріалами і утворюються шляхом склейки шпону в різних варіаціях, який в свою чергу отримують шляхом лущення розпарених кряжів деревини. Різновид шпонових матеріалів полягає в таких відмінностях: схема розташування волокон в суміжних шарах шпону деревини, їхньої товщини, порода деревини, застосовувані клеї і технологія виробництва. Фанера складається з склеєних листів шпону товщиною 1 мм з взаємно перпендикулярним напрямком волокон в шпону суміжних шарів. Кількість шарів шпону в фанері непарне і зовнішні шари мають однаковий напрямок. У свою чергу фанера, є яскраво вираженим прикладом ортотропної пластини, з двома осями пружної симетрії матеріалу, що збігаються з напрямками волокон шпону, тобто вздовж і поперек листа фанери.

Шпоновий брус LVL має три типи структурного рішення матеріалу, наприклад LVL виробництва компанії Ultralam: а) всі шари шпону мають односпрямоване розташування (тип R); б) кожен п'ятий шар шпону перпендикулярний напрямку волокон (тип X); в) взаємно перпендикулярне розташування шпону (тип I). Товщина шпону в LVL становить 3 мм, і, як правило, з деревини хвойних порід. Плити LVL бруса запресовуються в спеціальному пресі довжиною близько 60 м. Ширина таких плит 1250 мм, а максимальна товщина досягає 100 мм. Геометричні параметри вироблених LVL плит і їх міцності, що перевищують показники клеєної деревини і дозволяють його активно використовувати при будівництві каркасів будівель. Деформативність LVL бруса менше ніж клеєної деревини, а поперечні шари шпону перешкоджають розтріскування вздовж волокон, що також є значною перевагою щодо клеєної деревини в деяких випадках.

Перераховані вище переваги LVL бруса, як будівельного матеріалу, роблять його необхідним елементом дерев'яних конструкцій в сучасних умовах, як і поперечна клеєна деревина (ПКД або CLT), буковий LVL і т. д. Завдяки активній дослідницькій роботі та під керівництвом проф. Фурсова В.В., LVL включений в національні норми з проектування дерев'яних конструкцій ДБН В.2.6-161 діє до: 2017 [12]. Маючи значний досвід роботи з

дерев'яними матеріалами на основі шпону, такими як дерев'яні шаруваті пластики в складі безметалевих електрофізичних комплексів [9, 37-39], проф. В.В. Фурсов також займався клеєфанерними конструкціями [5, 6, 34-36] зі своїми учнями і почав роботу над ПКД з одним зі своїх учнів [60], які, на жаль, ще не включені до ДБН як будівельний матеріал, незважаючи на широке їх застосування в країнах Західної Європи за останні 15 років. ПКД панелі мають перехресну систему дощок в суміжних шарах аналогічно дерев'яним будівельним матеріалом на основі шпону і є продовженням ідеї, раніше реалізованої в фанері і ЛВЛ брусі.

LVL брус на основі шпону деревини хвойних порід виробництва марки Ultralam підрозділяється на 3-4 види (R, R^s, I, X) в залежності від частоти чергування поперечних шарів шпону і від сорту шпону. LVL брус Ultralam тип R має односпрямоване розташування волокон у всіх шарах шпону переважно сорту G2, а брус типу R^s складається з шпону сорту G1 і має параметри міцності вище, ніж тип R. Взаємно перпендикулярне чергування шарів шпону в суміжних шарах, як в фанері, відповідає для LVL бруса Ultralam типу X, а для типу I характерне чергування поперечних шарів шпону в заданому співвідношенні щодо поздовжніх шарів, в зв'язку з чим ці види ЛВЛ використовуються, як правило, в конструкціях, панельних системах перекриттів і в елементах конструкцій, де виникають поперечні напруження розтягу.

Великі ресурси деревини у вигляді букових лісів зосереджені в Західній Європі, переважно в Німеччині. Незважаючи на складності отримання букового шпону через його високу щільність (характеристичне значення щільності становить 730 кг/м³) і чутливості до розколювання, в 2011 році була зроблена успішна спроба виробництва букового ЛВЛ (BauBuche або Buche-FSH) компанією Pollmeier. Пружні та міцнісні характеристики букового шпонового бруса, відповідно до сертифіката досліджень і технічних звітів DIBt [135, 136, 52, 84], перевищують показники міцності звичайного ЛВЛ бруса практично в два рази (табл. 1.1). Шпоновий брус LVL, який виробляє компанія Pollmeier, широко використовується не тільки в несучих

конструкціях, а й в обробці інтер'єрів, у тому числі покриттів для підлоги (рис. 1.4)



Рис. 1.4 Буковий ЛВЛ брус (а) і приклад його застосування (б)

Таблиця 1.1 Характеристики міцності показники LVL бруса різних марок і виробників

Характеристики міцності і пружні властивості, в Н/мм ²		LVL Ultralam				Буковий LVL Pollmeier		
		R	R ^S	X	I	S	Q 20	Q 30 ≤ B ≤ 80
по пласту								
Вигин	<i>f_{m,k}</i>	50	52	38	35	80	70	75
Розтяг уздовж волокон	<i>f_{t,0,k}</i>	36	42	24	---	60	45	51
Розтяг поперек волокон	<i>f_{t,90,k}</i>	---	----	---	---	---	---	---
Стиск вздовж волокон	<i>f_{c,0,k}</i>	40	56	34	38	57,5	45,6	53,3
Стиск поперек волокон	<i>f_{c,90,k}</i>	3,8	3,8	4,2	3,8	10	13	
Зсув	<i>f_{v,k}</i>	3,2	3,2	2,7	---	8	3,8	8
Модуль пружності вздовж волокон	<i>E_{0,mean}</i>	14000	15600	10600	11200	16800	11800	13200
Модуль пружності вздовж волокон 5%	<i>E_{0,05}</i>	12000	14000	9000	10000	14900	10900	12200
Модуль зрушення	<i>G_{mean}</i>	500			---	850	430	
по грані								
Вигин	<i>f_{m,k}</i>	48	55	34	30	75	54	60
Розтяг поперек волокон	<i>f_{t,90,k}</i>	0,9	0,9	0,5	---	1,5	16	8
Стиск поперек волокон	<i>f_{c,90,k}</i>	7,5	8,6	8	7,5	14	37	19
Зсув	<i>f_{v,k}</i>	4,6	5,2	4,6	---	8	7,8	
Модуль зрушення	<i>G_{mean}</i>	500				760	820	
Щільність (кг/м ³)	<i>ρ_k</i>	480	550	480	480	730		

Важливою особливістю застосування букового LVL бруса є те, що для балкових конструкцій і елементів наскрізних просторових систем рекомендується розташування елементів таким чином, щоб шари шпону в брусі були орієнтовані горизонтально. Буковий LVL брус з горизонтальним розташуванням шпону проводиться шляхом склеювання ламелей з букового LVL типу S товщиною 40 мм і має маркування аналогічно клеєної деревини GL70 з характеристичним значенням міцності при вигині 70 Н/мм^2 . Ширина такого бруса складає від 80 мм до 300 мм, а висота поперечного перерізу від 120 мм до 600 мм. Буковий шпоновий брус є продовженням ідеї LVL бруса. Висока міцність букового LVL бруса сьогодні активно досліджується Західно-Європейськими вченими в композитних дерево-бетонних конструкціях (L. Voccadoro, A. Frangi, B. Kreis [57-59, 96]), в нагельних з'єднаннях [135, 136, 52, 84], в з'єднаннях на клеєно-стрижнях (N. Meyer, M. Stepinac [98-100, 122]), і т.д.

Великі випробування букового ЛВЛ бруса в лабораторії дерев'яних конструкцій Технологічного Інституту Карлсруе (KIT) виконані дослідницькою групою під керівництвом проф. Бласса [78, 79]. Ця група створила докладні технічні рекомендації щодо розрахунку та конструювання різних типів конструкцій з прикладами розрахунків, що викладені в посібнику [56]. Висока міцність даного матеріалу дозволяє істотно знизити габарити поперечних перерізів дерев'яних конструкцій в порівнянні із конструкціями з клеєної деревини. Результати досліджень букового ЛВЛ бруса виявили нові ефекти і феноменологічні особливості, як деревного матеріалу, серед яких масштабний фактор при сколюванні для балкових елементів конструкцій.

Однією з сучасні тенденцій у розвитку дерев'яних конструкцій є «проектне посилення» елементів конструкцій і вузлів, як гвинтовими кріпильними елементами (рис. 1.5-а), так і встановленням додаткових вставок з деревини з більш високими показниками міцності і жорсткості (рис. 1.5 б). В якості таких дерев'яних вставок успішно використовується буковий ЛВЛ.

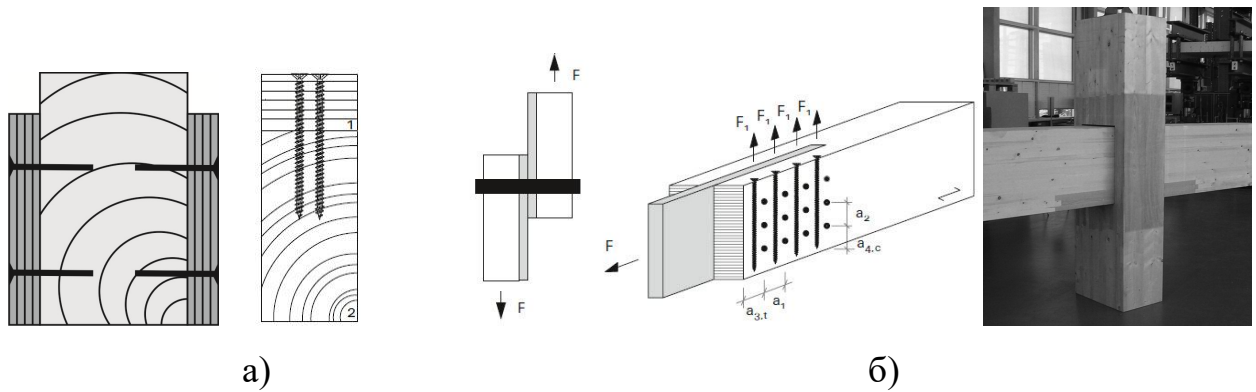


Рис. 1.5 Проектні посилення елементів конструкцій і їх вузлів: а) посилення вставками елементів конструкцій; б) посилення вузлових з'єднань.

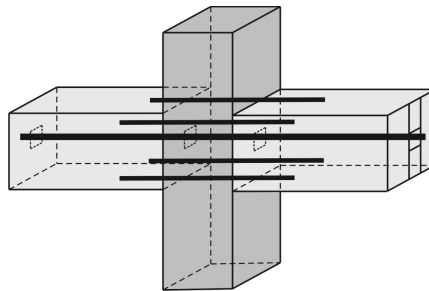
Посилення елементами з букового LVL (Pollmeier) використовується також в уже традиційних ситуаціях шляхом установки зовнішніх бічних екранів в конкової зоні двосхилих і вигнутих балок, балок з зрізками на опорах і перфорації балок. Для вітчизняної практики поняття «проектне посилення» конструкцій дещо нове і не завжди економічно ефективно, через малу вартість деревини в порівнянні з вартістю гвинтів і трудовитрат на виконання одного з видів підсилень. У зв'язку з цим в вітчизняній практиці пріоритетним конструктивним рішенням є збільшення поперечного перерізу або збільшення контактних майданчиків опорних частин конструкцій та контактних поверхонь з'єднань. Буковий LVL брус як новий матеріал на основі шпону з високими показниками міцності дає можливість застосування дерев'яних конструкцій в якості елементів каркасу в багатоповерхових житлових і офісних будівлях.

1.3 Область застосування LVL бруса в сучасному будівництві

Високі показники характеристик міцності і жорсткості LVL бруса як нового деревного матеріалу стали основною перевагою для активного використання в каркасному багатоповерховому будівництві не тільки житлових будинків, але і виробничих. Цьому, перш за все, сприяли нові методи зрощування ламелей LVL бруса по товщині для отримання поперечних перерізів колон і балок збільшених розмірів. Нові розробки вузлових з'єднань під керівництвом А. Buchanan і ряду інших фахівців МР

Newcombe, S. Pampanin, A. Palermo, F. Wanninger, M. Davies, M. Fragiocomo і ін. [71, 103-105, 130-132] з урахуванням особливостей, характерних для деревного матеріалу на основі шпону як LVL (рис. 1.6 і 1.7), були виконані на об'єктах, що знаходяться в сейсмічних районах. Тривалі спостереження і аналіз результатів натурних випробувань, включаючи кліматичні камери і стенди (рис. 1.6-в), підтвердили надійність і безпеку LVL бруса.

Руйнівна сейсмічна дія в Новій Зеландії, створила передумови для виконання конструкцій каркасів будівель з деревини, в яких вузлові з'єднання виконані не жорсткими, а податливими, з заданими припустимими кутовими переміщеннями і пружними деформаціями контактуючих поверхонь, що з'єднуються. Реалізацію такого типу рішення було виконано з використанням натягу тросів, що розташовуються в середині балок коробчастого поперечного перерізу. Відповідно, в якості основного матеріалу балок застосовувався LVL брус в силу своїх міцних показників, які значно перевищують показники клеєної деревини.



а)



б)



в)

Рис. 1.6 Попередньо напружені дерев'яні конструкції з LVL бруса: а) схема вузла [103], б) вузол з попереднім напруженням [130], в) каркас при лабораторних випробуваннях [94].

Контроль кутових переміщень у вузлах виконується шляхом натягу тросів і гвинтових підсилень елементів, навантажених стисненням поперек волокон. Подібні рішення офісних багатоповерхових будівель з LVL брусу з попереднього напруженими балками широко використовується в сучасному будівництві (рис. 1.7 і 1.8). Масштабні дослідження ЛВЛ брусу і розробка конструктивних рішень для будівництва багатоповерхових будівель належить проф. А. Буханан (Professor Andy Buchanan) з Кантерберійського університету (Нова Зеландія) [94, 130].



а)



б)



в)

Рис. 1.7 Будівля університету з LVL брусу (Massey University, Wellington):
а) розташування колон будівлі; б) елементи перекриття; в) загальний вид.

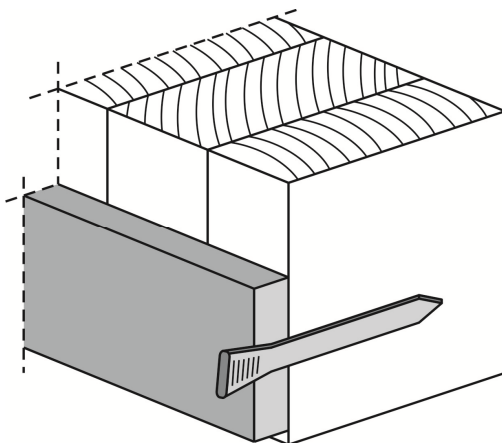


а)

б)

Рис. 1.8 Будівля з LVL бруса (Christchurch, New Zealand): а) загальний вид; б) вузол кріплення балки та колони.

Активна дослідницька діяльність над питаннями методів з'єднань масивних елементів конструкцій з LVL бруса створили такі нові з'єднувальні елементи як «цвяхові заклепки» (рис. 1.9 а) і нові види руйнувань: «блокове руйнування» і «руйнування вставкою» (рис. 1.9 б).



а)



б)

Рис. 1.9 Цвяхові заклепки і види руйнувань: а) цвяхові заклепки [7] б) руйнування вставкою [134].

Цвяхові заклепки є проміжним рішенням між цвяховими з'єднаннями деревини з зовнішніми металевими пластинами і з'єднань деревини з металевими цвяховими пластинами або з металевими зубчатими пластинами (МЗП). Особливість цвяхових заклепок полягає в тому, що заклепка у вигляді цвяха з овальним поперечним перерізом встановлюється в круглий отвір і завдяки розширенню поперечного перерізу до голівки, заклепується в металевій пластині. Такий вид з'єднань успішно використовується для

виконання вузлових з'єднань конструкцій великопрольотних ферм з LVL конструкційного бруса. Цвяхові заклепки широко застосовуються в США і Канаді. Випробування міцності вузлів з цвяховими заклепками створили необхідність оцінки міцності за двома моделями руйнування, які сьогодні входять в Єврокод-5 [77] в Додатку А. Запропоновані формули розрахунку враховують роботу деревного матеріалу на основі шпону і дають можливість виконувати розрахунки і конструювання з'єднань.

Найбільшим спорудою в світі з деревини, які перебувають на відкритому повітрі, є архітектурна композиція з LVL бруса «Metropol Parasol» або «Севільські гриби», створена в м. Севілья, Іспанія (рис. 1.11). Для будівництва даної конструкції було використано більше 2500 м³ LVL бруса виробництва компанії Kerto.



Рис. 1.10 Архітектурна композиція з LVL бруса «Metropol Parasol»

Конструкція і масштаб споруди, що експлуатується на відкритому повітрі, демонструє сучасний рівень можливостей створення яскравих архітектурних об'єктів з використанням деревних матеріалів на основі шпону. Сьогодні питання захисту деревини від атмосферного впливу у вигляді гідротермічних кліматичних факторів і впливу прямих ультрафіолетових променів є вирішеним. З'єднання елементів конструкції Metropol Parasol виконано з використанням вклеєних стрижнів з поперечним гвинтовим посиленням, як показано на рис. 1.11, і наводиться з публікації проф. F. Colling [69].

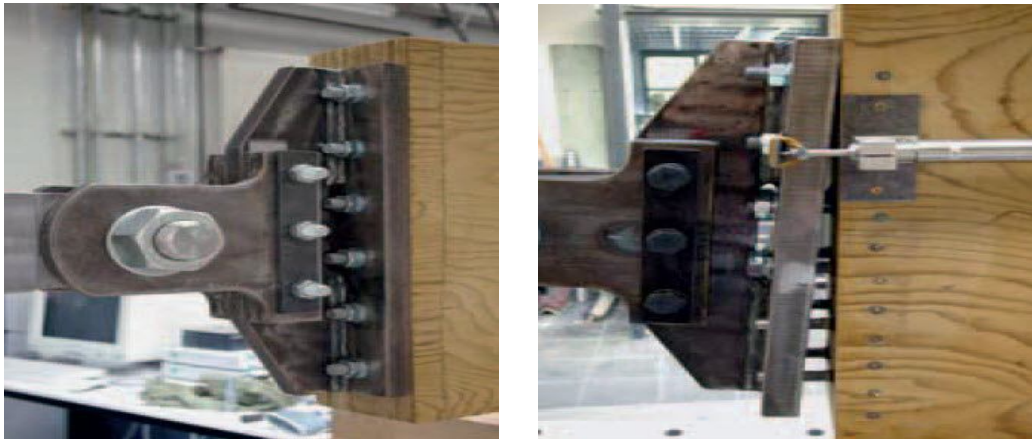


Рис. 1.11 Схема випробування і характер руйнування вузлового з'єднання (F. Colling [69])

Випробування вузлів і частин конструкцій унікальних споруд є невід'ємною і необхідною частиною сучасного підходу проектування дерев'яних конструкцій, особливо з використанням нових деревних матеріалів з високими показниками міцності. Високі показники міцності і пружних характеристик LVL бруса дозволяють використовувати його при посиленні частин конструкцій, де виникають напруження розтягу поперек волокон. Перш за все, це гребенева зона двосхилих і вигнутих балок, опорні зони балок з зрізками, нижні або верхні зони зігнутих елементів і деякі види вузлів. Також LVL застосовується в якості внутрішнього або зовнішнього шару панелей з поперечної клеєної деревини (ПКД) і в композитних дерево-бетонних ребристих перекриттях, в яких LVL брус встановлюється в якості ребер. Різні види клеєфанерних конструкцій (балок і плит покриття) отримали свій подальший розвиток завдяки використанню LVL плит замість фанери, при цьому розміри такого типу конструкцій досягають значних прольотів. Перш за все, це пов'язано з обмеженням сортаментом фанери по товщині і розмірам листа. Як правило, широко поширені ребристі панелі покриттів, де ребра і обшивки виконані з LVL.

Вклеєні стрижні як вид з'єднання є надійним і безпечним в умовах пожежі, що було наочно продемонстровано на 8 лінзоподібних фермах прольотом 44 м аквапарку в м Митищі в 2005 році [30]. Жорсткі стики ферм на вклеєних стрижнях залишилися не пошкодженими, а обвалення ферм відбулися через ослаблення поперечного перерізу стиснутих поясів ферм

внаслідок обвуглювання. Обвалення ферм спостерігалось в інтервалі 2,5-8 годин. Всі стики поясів мали лише поверхнєве обвуглювання на глибину 5-15 мм без порушення з'єднання, як показав аналіз вузлів розкритих фахівцями ЦНДІБК ім. Кучеренко після пожежі. Стики, в яких використовувався полімербетон для ущільнення з'єднання, після приварки сталевих накладок також виявився без значних пошкоджень. Міцність вузлових з'єднань і їх надійність в умовах пожежі сьогодні є важливим критерієм при використанні в проектних рішеннях. Як показують результати вогневих випробувань нагельних з'єднань з металевими пластинами виконуються проф. А. Франджі [88, 110] в університеті ETH Zürich, металеві частини з'єднання виходять на зовнішні поверхні елементів збільшують швидкість обвуглювання і руйнування вузла. У разі вклеєних стрижнів, обвуглювання відбувається лише на незначну глибину біля зовнішньої поверхні елементів. Тривалий опір вогневому впливу вузлових з'єднань забезпечує цілісність всієї системи каркаса будівлі при пожежі і запобігає обвалення всієї конструкції або її частин.

1.4 Жорсткі і напівжорсткі з'єднання на вклеєних стержнях

Дослідження елементів конструкцій і їх вузлових з'єднань, згідно вимог євростандартів необхідно виконувати в натуральну величину або трохи менших габаритів від реально проектованої конструкції. Достовірність і об'єктивність отриманих результатів при натурних випробуваннях дозволяє виконувати точний аналіз роботи конструкції. При виконанні натурних випробувань в лабораторії на випробувальному стенді моделюється ситуація випробуваного вузла або системи з дотриманням різних деталей експерименту, які дають можливість максимально наблизити роботу конструкції до її реальної ситуації при установці в каркасі будівлі. До таких деталей відноситься розкріплення елемента в опорних зонах або по довжині з певним кроком. Схема навантаження експериментальної моделі, швидкість

програми і інші чинники також істотно впливають на результати випробувань.

Шпоновий брус або LVL на основі деревини хвойних порід, вироблений компаніями Ultralam і Kerto, широко поширений на будівельному ринку дерев'яного домобудівництва. Завдяки високим показникам міцності і вартості, що цей тип бруса незначно перевищує вартість клеєної деревини, даний матеріал все більше привертає увагу не тільки замовників, але і проектувальників. Шпонова структура LVL бруса вимагає виконання додаткових випробувань класичних видів з'єднань дерев'яних конструкцій, які часто застосовуються для елементів з клеєної деревини. Характер поведінки і руйнування LVL при натурних випробуваннях елементів конструкцій вузлів відрізняється від клеєної деревини і вимагає внесення коригування діаметрів попередньо сверлених отворів, відстаней між нагелями уздовж і поперек волокон. Особливості роботи LVL бруса з використанням клеєної стрижнів також викликає великий дослідницький інтерес серед колег з різних країн, серед яких M. Stepinac, R. Steiger, E. Gehri, A. Buchanan, E. Serrano, N. Meyer, і інші. У країнах СНД клеєною стрижні як жорстке з'єднання дерев'яних конструкцій є невід'ємним інженерним рішенням вузлів при проектуванні каркасів великопрольотних будівель. У вітчизняній практиці використання клеєної стрижнів дешевше, ніж гвинтові з'єднання, які популярні в європейських країнах і є альтернативою для клеєної стрижнів.

З'єднання дерев'яних конструкцій на клеєних стрижнях можливо в двох варіантах: з'єднання деревини з деревиною або з приварюванням до металевому елементу клеєної стрижнів (рис. 1.12-а) і з'єднання деревини з металевою вставкою на болтах (рис. 1.12-б). У зарубіжній практиці ці варіанти називаються як жорстке з'єднання і напівжорстке з'єднання. Перший варіант з'єднання передбачає виготовлення вузлів, як правило, в заводських умовах, що не розбірні. Другий варіант вузлів або напівтверді з'єднання все частіше застосовуються в комбінованих каркасах або складних системах конструкцій, де безметальні рішення неможливі. Піддатливість болтових

з'єднань напівтвердих стиків дерев'яних конструкцій на клеєному стрижнях полягає не тільки від деформацій болтових з'єднань, але і від податливості самих клеєних стрижнів, яка відповідно значно менше першої. Для похилих клеєних стрижнів згідно норм Росії СП 64.13330.2017 [28] податливість становить 0,001 мм/кН. Відомі методи обліку податливості нагельних з'єднань в таких дерев'яних конструкціях як ферми, внаслідок великої кількості вузлових примикань елементів наскрізний конструкції, які мають значний вплив на величину сумарної деформації конструкції або прогину.

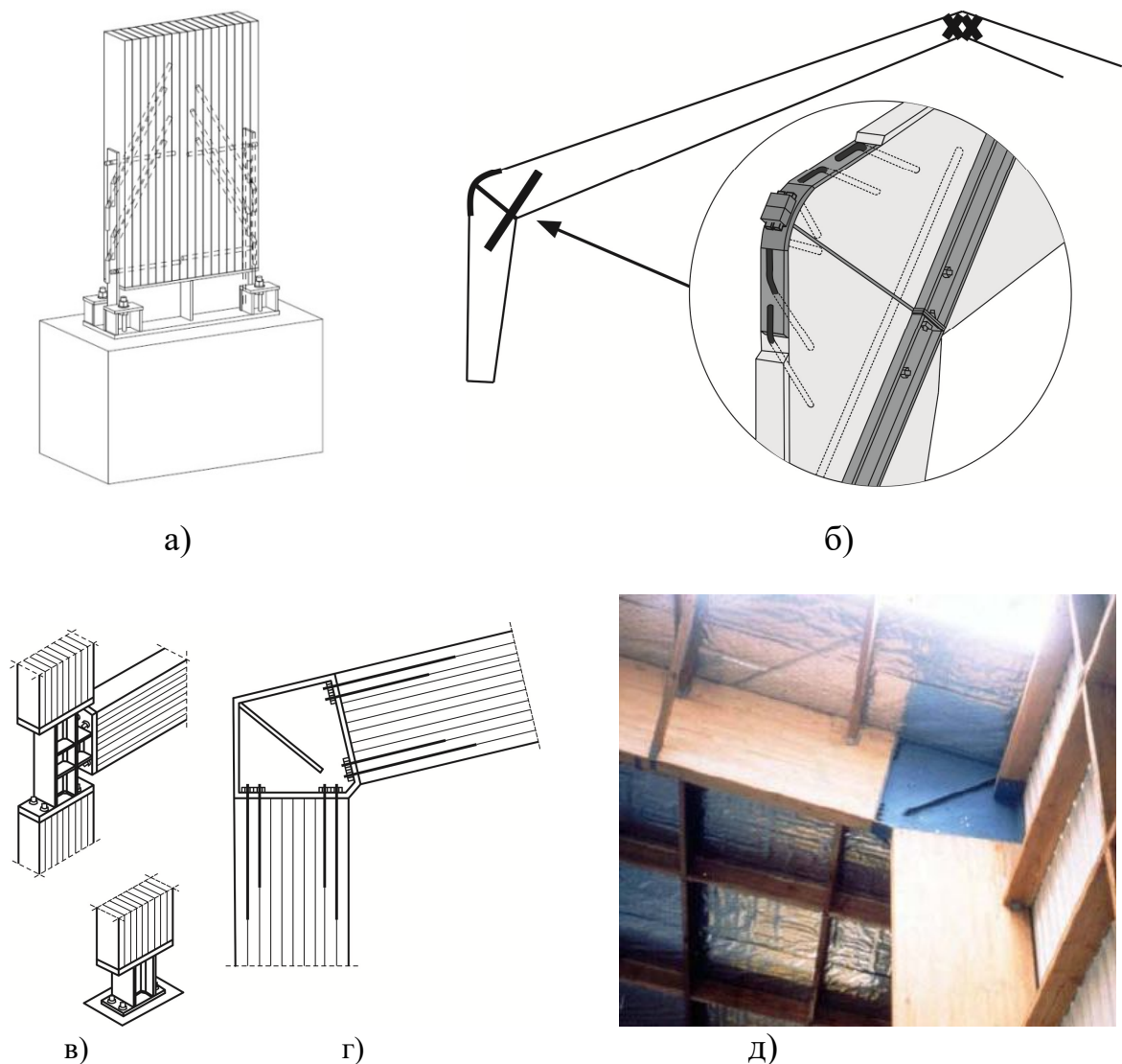


Рис. 1.12 Жорсткі і напівтверді з'єднання на клеєних стрижнях: а) жорстке з'єднання опорного вузла колони з фундаментом і карнизного вузла трьохшарнірної рами; б) напівжорстке з'єднання опорного і карнизного вузлів.

Особливо важливо визначення прогину для ферм із заниженою висотою. В роботі проф. Серова Є.Н. [27] вказується, що при наявності конкретних нормативних величин піддатливості з'єднань і довільному рівні використання їх несучої здатності, визначення прогину, викликане піддатливістю з'єднань з урахуванням діючих в них зусиль слід визначати за формулою:

$$f_{\text{п}} = f_{\text{п.н}} + f_{\text{п.в}} = \sum_1^{mk} \Delta_{\text{ні}} \frac{N_{\text{сі}}}{N_{\text{н.сі}}} + \sum_1^m \Delta_{\text{ні}} \frac{\sigma_{\text{смі}}}{R_{\text{смі}}^{\alpha} \cdot n_{\text{сі}}} \quad (1.1)$$

де $f_{\text{п.н}}$ – деформації податливості в розтягнутих з'єднаннях нагельях;

$f_{\text{п.в}}$ – деформації податливості у врубках і упорах;

k – кількість стиків на нагельях;

m – кількість стиків на врубках і упорах;

$\Delta_{\text{ні}}$ – нормативне значення піддатливості i -го з'єднання при повному використанні його несучої здатності;

$N_{\text{сі}}$ – чинне зусилля в i -м з'єднанні;

$N_{\text{н.сі}}$ – несуча здатність i -го нагельного з'єднання;

$\sigma_{\text{смі}}^{\alpha}$ – чинна напруга зминання в i -м з'єднанні;

$R_{\text{смі}}^{\alpha}$ – розрахунковий опір зминанню в i -м з'єднанні.

У посібнику до СНиП 2-25-80 з розрахунку дерев'яних конструкцій [25] запропоновано визначати переміщення вузлів ферм з урахуванням піддатливості з'єднань за правилами будівельної механіки з введенням наведеного модуля пружності (п. 6.29). З'єднання дерев'яних елементів каркасів будівель на клеєних стрижнях часто виконуються з металевими вставками різних конфігурацій, дещо імітує фланцеве з'єднання, що зустрічається в металевих конструкціях. Тип з'єднання так званого «Металева вставка» дуже популярний в різних видах конструкцій і може використовуватися як в рішеннях карнизних вузлів трьох шарнірних рам (рис. 1.12 а), так і в стійко-ригельних каркасах офісних або виробничих будівель (рис. 1.12 б), а також застосовується в різних вузлах дерев'яних конструкцій, (рис.1.13-1.15). Дане вузлове рішення збільшує швидкість монтажу конструкцій із заданою точністю сполучення елементів в вузлах конструкції.

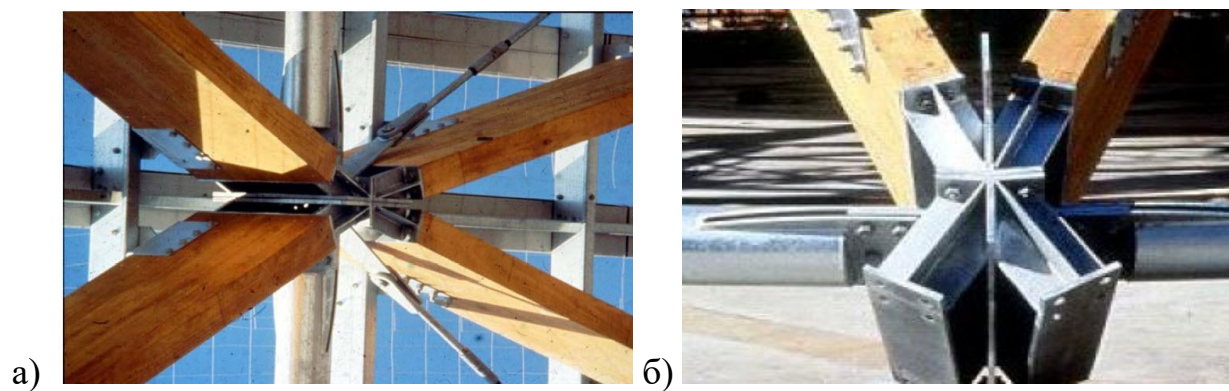


Рис. 1.13 Приклади будівель з металевими вставками на вклеєних стрижнях



Рис. 1.14 Галерея університету (University of Windsor)



Рис. 1.15 Монтажний стик відправних марок ферми.

1.5 Методи випробувань вклеєних стержнів на висмикування

Оцінка міцності з'єднань на вклеєних сталевих стержнях в залежності від їх розташування вздовж і поперек волокон деревини в випробовуваних зразках, вимагає виконання різних методів випробувань, і, відповідно, різних способів закріплення деревини. Найбільш поширеним методом випробувань вклеєною стержнів є висмикування симетрично вклеєних стержнів уздовж волокон деревини (рис. 1.16а). Такий тип випробувань був використаний в даній роботі при оцінці міцності вклеєних стержнів в LVL брусі. Він є основним і простим методом дослідження, хоча існують і інші методи дослідження, як наприклад, при висмикуванні стержнів, вклеєних поперек волокон (рис. 1.16б, в, г). Поперечна установка вклеєних стержнів відома як конструктивний захід, що використовується при посиленні елементів дерев'яних конструкцій. Як правило, це опорні вузли балок з підрізками або площадки обпирання балок на нижче лежачі елементи каркасів будівель, оскільки міцність деревини при стисканні поперек волокон не проходить при перевірці міцності на зминання.

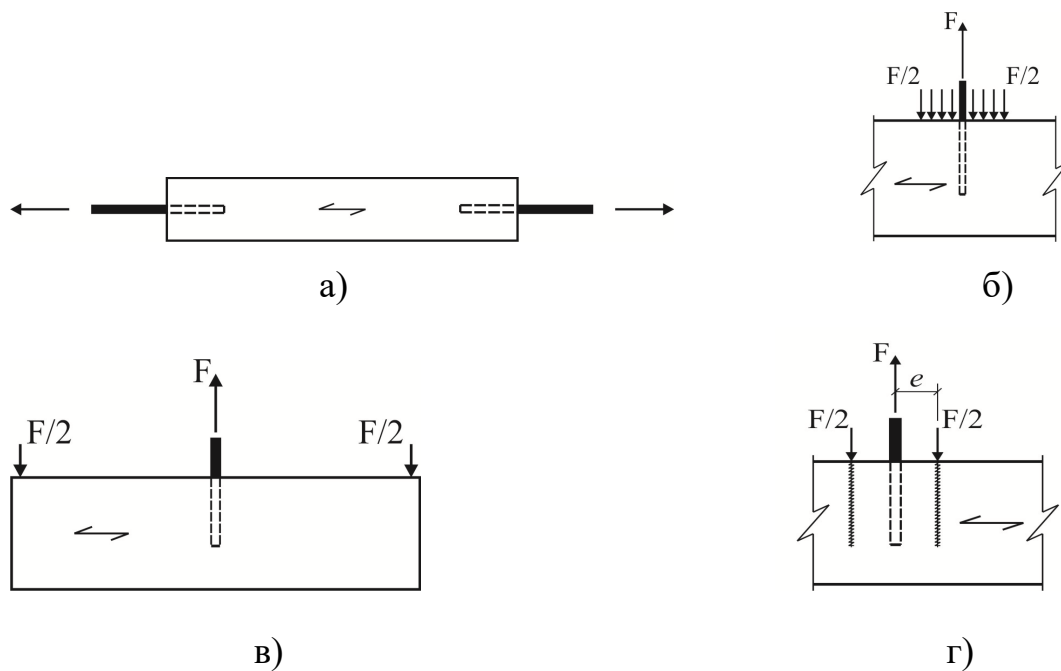


Рис. 1.16 Схеми випробувань вклеєних стержнів встановлених уздовж і поперек волокон деревини: а) висмикування - висмикування; б)

висмикування - стиснення; в) висмикування - балка; г) висмикування - з посиленням.

Також поперечна установка вклеєних стержнів відносно напрямку волокон деревини часто застосовується в коньковій зоні двосхилих і вигнутих балок, а також при посиленні перфорації в балках. Установка вклеєних стержнів поперек волокон деревини часто використовується при посиленні нагельних багаторядних з'єднань, як правило, штифтових або болтових з'єднань. Багато видів жорстких з'єднань дерев'яних конструкцій з використанням вклеєних стержнів мають конструктивні рішення з похилим розташуванням стержнів. Сюди відносяться з'єднання бази колон з фундаментами, з'єднання двох частин балок і V-подібні посилення балок на опорі. Похила установка вклеєних стержнів найбільш популярна в дерев'яних конструкціях країн Східної Європи (Україна, Білорусія і Росія), в зв'язку з чим існує окрема методика виконання випробувань. Можливо також комбіноване розташування стержнів у вузлах з різним нахилом відносно напрямку волокон. Німецькі норми з проектування дерев'яних конструкцій DIN 1052 передбачають методику розрахунку стержнів при навантаженні поперек осі стержня з відповідними рекомендаціями щодо правил розстановки з мінімальними відстанями між вклеєними стержнями і відстаней від стержня до бічної грані в поперечному перерізі елемента. Схема випробувань вклеєних стержнів, яка показана на рис. 1.16г, знаходить своє застосування в дерев'яних конструкціях каркасів будівель з попереднім напруженням конструкцій шляхом натягування тросів, встановлених всередині балок коробчастого складеного перерізу, а саме, в вузлах сполучення балок і колон. При такому інженерному вирішенні конструкцій, що знаходяться в умовах значних сейсмічних впливів, потрібне посилення деревини гвинтами поперек волокон, оскільки міцність на стиск поперек волокон для LVL бруса в 5-6 разів менше міцності на стиск уздовж волокон.

Широке застосування вклеєних стержнів в країнах Західної Європи не є рівномірним, так як виконання даного типу з'єднання конструкцій вимагає

більше трудовитрат і більшу вартість, ніж установка гвинтів різних типів. Також складність контролю якості вклейки стержнів ускладнює їх часте застосування зарубіжними колегами. Автором методу з'єднання на вклеєно стальних стержнях в Європейських країнах прийнято вважати Н. Riberholt [112], оскільки перша робота проф. Турковського С.Б. [129] англійською мовою була опублікована на рік пізніше. Однак у вітчизняних публікаціях з'єднання на вклеєних стержнях запропоновані в середині 80-х років ХХ століття. У 1986 році вклеєні стрижні були застосовані в електрофізичному комплексі Гінт-12-30, що експлуатуються на відкритому повітрі. Протягом останніх 10 років були зроблені суттєві спроби систематизації і аналізу різних методів установки і розрахунку вклеєних стержнів різними країнами, наприклад Технічний звіт Mislav Stepinac [121], виконаний в рамках комітету COST Action FP1004 "Enhancement mechanical properties of timber, engineered wood products and timber structures ". Наприклад, проект з дослідження з'єднань на вклеєних стержнях GIROD Project (1998-2000) ставив завдання аналізу впливу різних чинників на міцність з'єднань. Розглядалися такі чинники, як товщина клейового шару, діаметр сталевих стрижнів, відстані до крайки і відстань між стержнями, різні види клею, включаючи поліуретановий. У цьому проекті працювали німецькі і шведські дослідники (SP - Swedish National Testing and Research Institute, FMPA Otto-Graf Institute, Germany; University of Karlsruhe, Germany; TRADA Technology, UK; Lund University, Sweden.), результати досліджень яких опубліковані в звіті GIROD Project Rapport 2002 [90]. Також проблеми з'єднань на вклеєних стержнях розглядалася в комітетах COST Action E13 [70] і COST Action E34 [125]. Сьогодні в Єврокод-5 або EN 1995-1-1 відсутні вказівки про виконання розрахунку і правил установки вклеєних стержнів, хоча проект другої частини Єврокодів-5 (EN 1995-2) з проектування дерев'яних мостів [85] в додатку С містить ряд положень по виконанню підключень на вклеєних сталевих стержнях. Результати вжитих зусиль в питанні інтеграції методів розрахунку з'єднань на вклеєних стержнях в Єврокод-5 добре викладені в доповіді Larsen [97] «Сумна історія вклеєних

стержнів в Єврокодi-5» (The sad story of glued-in bolts in Eurocode 5) на щорічній Європейській конференції по дерев'яним конструкціям CIBW-18 в 2011 році.

Міцність з'єднання на вклеєних стержнях, які працюють на висмикування, визначається як сума міцностей кожного стержня при виконанні правил розстановки, які забезпечують розмежування областей сколювання деревини навколо висмикнутого стержня. Величина міцності вклеєного стрижня, як правило, залежить від величини площі циліндричної поверхні. Таким чином, близьке розташування стержнів не допустимо, через перетин областей сколювання деревини і зниження сумарної площі. Як показує аналіз технічних нормативних документів різних країн, відстані між стержнями від стрижня до грані мають різні нормативні величини для стержнів, вклеєних в цільну або клеєну деревину. При аналізі результатів дослідження міцності з'єднань на вклеєних стержнях підтверджені моделі руйнування, запропоновані Tlustochowicz (2010) [128], наведені на рис. 1.17. Модель руйнування, яка спостерігається при випробуваннях, залежить від ряду факторів, серед яких домінують спосіб вклеювання стержнів і характер роботи вузла.

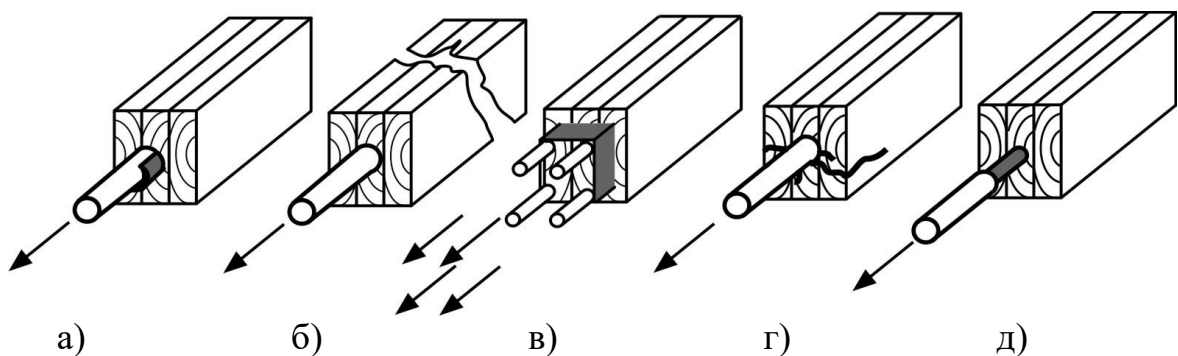


Рис. 1.17 Моделі руйнування з'єднань деревини на вклеєних стержнях, згідно Tlustochowicz і ін. (2010) [128]: а) сколювання деревини (зсувне руйнування); б) руйнування при розтягуванні деревини; в) блокове зсувне руйнування; г) розколювання; д) руйнування стержня.

Важливою особливістю при оцінці міцності з'єднання на вклеєних стержнях є точна оцінка міцності деревини на сколювання, як основного

механізму руйнування вклеєних стержнів. Випробування міцності на сколювання по пласті відрізняються від методів випробувань по межі плитних деревних матеріалів, до яких відноситься шпоновий брус LVL, які виконуються аналогічно методиці, що застосовується для цільної деревини згідно EN 408 [83] (рис. 1.18а), а по пласті, згідно EN 789 [86].

1.6 Аналіз існуючих методик розрахунку міцності вклеєних стержнів на висмикування

Випробування одиночних вклеєних стержнів в LVL брусі з односпрямованим шпоном на висмикування були проведені в лабораторії будівельних конструкцій ХНУБА. Першим і простим методом оцінки отриманих даних, є розрахунок міцності з'єднання на вклеєних стержнях з введенням величини міцності LVL бруса на сколювання в розрахункове рівняння, яке було ще запропоновано в «Посібнику до СНиП II-25-80» [25] і має наступний вигляд для стержнів вклеєних уздовж волокон:

$$T = R_{ск} \times \pi \times d_1 \times l_p \times k_c \quad (1.10)$$

де T – розрахункова несуча здатність стержня на висмикування або продавлювання, в МН; $R_{ск}$ – розрахунковий опір деревини сколювання, МПа, і прийняте $R = 6,8$ МПа; $l_p = l - l_0 \leq 30d$ розрахункова довжина в м; l – довжина зашпаровуваної частини стержня у мм, яку слід приймати за розрахункову але не менше $10d$ і не більше $30d$; $l_0 = 3d$ – глибина можливого зниження міцності клейового прошарку при зварюванні ($l_0 = 0$ для стрижнів без зварювання); d_1 – діаметр отвору, в м; $k_c = 1,2 - 0,02 \cdot l_p / d$, (l_p – глибина вклейки стержня, d – діаметр стержня) коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу напружень зсуву в залежності від довжини зашпаровувальної частини стержня. Міцність з'єднання на вклеєних стрижнях повинна бути менше добутка площі поперечного перерізу F_a і розрахункового опору матеріалу стержня R_a .

Сьогодні вираз (1.10) міститься в нормах Росії, СП 64.13330.2017 [28], в той час як в Європейській практиці використовується кілька схожі формули:

- формула запропонована в рамках проекту GIROD (2003) [90], в якому брали участь дослідники з різних країн для вирішення питання уніфікації методу розрахунку вклеєних стрижнів на підставі аналізу існуючих практик ряду виробничих компанії та дослідницьких центрів:

$$P_f = \tau_f \times \pi \times d \times l \times (\tan \omega / \omega) \quad (1.11)$$

– формула запропонована в проектній редакції єврокодів з проектування дерев'яних мостів prEN 1995-2, 2003 [85], але так і не увійшла в фінальну редакцію:

$$R_{ax,k} = \pi \times d_{equ} \times l_a \times f_{ax,k} (\tan \omega / \omega) \quad (1.12)$$

– формула, що міститься в німецьких національних нормах з проектування дерев'яних конструкцій DIN 1052, 2010 [75]:

$$R_{ax,d} = \pi \times d \times l_{ad} \times f_{k1,d} \quad (1.13)$$

де $R_{ax,k}/P_f$ – характеристичне значення опору висмикування; $R_{ax,d}$ – розрахункове значення опору висмикування; $l/l_a/l_{ad}$ – довжина вклеювання стрижня або ефективна довжина закладення стержня; d – номінальний діаметр стрижня; d_{equ} – еквівалентний діаметр; ω – величина жорсткості з'єднання; τ_f – міцність клейового шва на зрушення; $f_{v,k}/f_{k1,d}$ – характеристичне значення міцності деревини на сколювання / характеристичне значення міцності клейового шва. У загальному вигляді спрощена модель європейського підходу до розрахунку вклеєних стрижнів при осьовому висмикуванні має наступний вигляд:

$$R_{ax,k} = \pi \times d \times l \times f_{v,k} \quad (1.14)$$

де $R_{ax,k}$ – характеристичне значення опору висмикування; l – довжина вклеювання стержня; d – діаметр; $f_{v,k}$ – параметр міцності при зсуві (рис. 1.21). Параметри з'єднання на вклеєних стержнях, що розглядаються при розрахунках показані на рис.1.18.

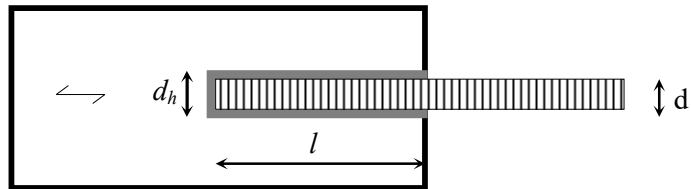


Рис. 1.18 Параметри з'єднань на вклеєних стержнях [123]

Механізм руйнування вклеєних стержнів у всіх випадках практично однаковий з масивом деревини уздовж висмикнутого стержня, як правило, клиноподібної форми (рис. 1.19б), що відповідає епюрі нормальних напружень по довжині стержня, ідеалізована форма якої має вигляд, як показано на рис. 1.19а), згідно з дослідженнями проф. Турковського С.Б. [31, 32].

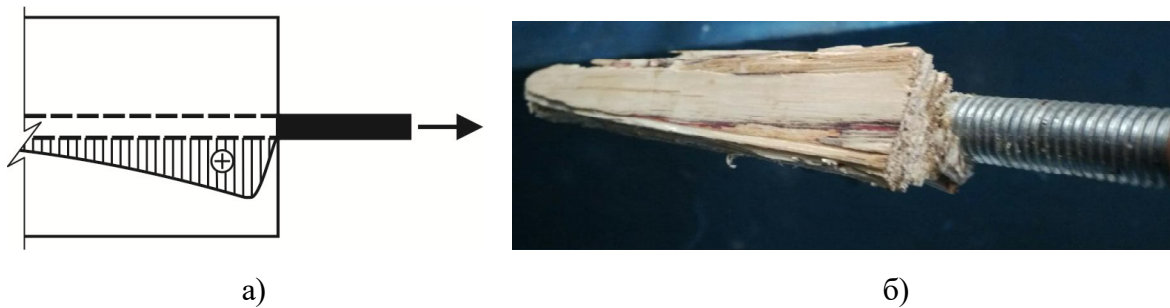


Рис. 1.19 Епюрі нормальних напружень по довжині стержня [31, 32] (а) і форма деревини навколо зруйнованого стержня (б)

Дуже часто спостерігається несиметричне об'ємне сколювання деревини навколо стержня, в зв'язку з чим і був введений коефіцієнт k_c в вітчизняних нормах. У розрахункових формулах приймається, що на сколювання працює мінімальна площа поверхні деревини рівна площі отвору. Пенетрація клею відбувається в невеликій кількості і його усадка, що спостерігається, підтверджує це, незважаючи на те, що відсутній притиск, без якого не можливе якісне склеювання дошок дерев'яних клеєних конструкцій. Товщина клейового шару в різних країнах приймається різною і коливається в діапазоні від 1 до 4 мм і залежить від технологічного процесу вклеювання стержнів, а також від обраної клейової системи.

Висновки:

1. На основі аналізу нових деревних матеріалів на основі шпону, таких як LVL брус, які мають широке розповсюдження в сучасному будівництві

різних багатоповерхових каркасів, можна зробити висновок, що дослідження вузлових з'єднань LVL бруса є важливим і актуальним завданням.

2. Аналіз методів випробувань вклеєних стрижнів показує, що одновісне навантаження елемента із вклеєними стержнями з двох сторін є уніфікованим методом випробувань, а для стержнів, встановлених поперек волокон, існують незначні відмінності в способах фіксації дерев'яного елемента.
3. Розглянуті існуючі методики розрахунку вклеєних стержнів мають загальні параметри, що враховують діаметр стержня, його довжину і міцність деревини на сколювання, і незначні відмінності у вигляді редукційних коефіцієнтів для врахування низки неоднорідностей і можливих технологічних неточностей.
4. Структурна неоднорідність LVL бруса створює різні величини міцності на сколювання уздовж волокон по пласті і по межі, що слід враховувати при аналізі характеру руйнування вклеєних стержнів при їх висмикуванні.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ АНІЗОТРОПІЇ ПЛАСТИКІВ, НА ОСНОВІ ДЕРЕВИНИ.

2.1 Загальні положення анізотропних властивостей деревини і шаруватих дерев'яних матеріалів

Робота багатьох матеріалів до деяких меж навантаження розглядається як пружна і підкоряється закону Гука, який при одноосьовому напруженому стані для ізотропного матеріалу має наступний вигляд:

$$\varepsilon = \sigma / E, \quad (2.1)$$

де ε – відносна поздовжня (лінійна) деформація;

σ – нормальні напруження;

E – модуль пружності.

В задачах, пов'язаних з розрахунком на міцність, при записі закону Гука часто застосовують технічні позначення пружності матеріалу - лінійними модулями пружності, коефіцієнтами Пуассона, модулями зсуву, і ін. В таких позначеннях закон Гука приймає наступний вигляд:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E_x} (\sigma_x - \mu_{xy} \cdot \sigma_y) \quad (2.2)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G_{xy}} \cdot \tau_{xy} \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E_y} (\sigma_y - \mu_{yx} \cdot \sigma_x) \quad (2.4)$$

де E_x и E_y – модулі поздовжньої пружності відповідно в напрямку осей x та y ;

μ_{xy} и μ_{yx} – коефіцієнт поперечної деформації (коефіцієнти Пуассона);

G_{xy} – модуль зсуву в площині xOy .

В силу симетрії константи E_x , μ_{yx} и E_y , μ_{xy} пов'язані співвідношенням:

$$E_x \mu_{yx} = E_y \mu_{xy} \quad (2.5)$$

Для ізотропного тіла пружні властивості визначаються трьома характеристиками: E , μ и G , з яких дві є незалежними, а складові напружень і деформацій віднесені до декартових осей координат x , y , z . Між цими характеристиками для ізотропних тіл існує зв'язок:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} ; \quad (2.6)$$

або

$$G_{xy} = \frac{E_{xy}^{(45)}}{2(1+\mu_{xy}^{(45)})} . \quad (2.7)$$

Для ортотропних тіл вираз (2.5) має наступний вигляд:

$$E_{xy}^{(45)} = G_{45} = \frac{E_0 E_{90}}{E_0(1+\mu_{90}) + E_{90}(1+\mu_0)} . \quad (2.8)$$

Для анізотропних тіл закон Гука має інший вигляд у зв'язку з тим, що величина деформації залежить не тільки від величини діючих напружень, а й від напрямку дії їх в матеріалі. При збігу декартових координат до напрямків осей симетрії ортотропного матеріалу, формули (2.2)-(2.4) при об'ємному напруженому стані, який визначається трьома головними напруженнями (рис. 2.1) або шістьма компонентами тензора напружень в довільних осях x , y і z закон Гука набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\mu_{yx} \cdot \sigma_y}{E_y} - \frac{\mu_{zx} \cdot \sigma_z}{E_z} , & \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}} , \\ \varepsilon_y &= -\frac{\mu_{xy} \cdot \sigma_x}{E_x} + \frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\mu_{zy} \cdot \sigma_z}{E_z} , & \gamma_{yz} &= \frac{\tau_{yz}}{G_{yz}} , \\ \varepsilon_z &= -\frac{\mu_{xz} \cdot \sigma_x}{E_x} - \frac{\mu_{yz} \cdot \sigma_y}{E_y} + \frac{\sigma_z}{E_z} , & \gamma_{zx} &= \frac{\tau_{zx}}{G_{zx}} . \end{aligned} \quad (2.6)$$

Характеристики E , μ і G мають своє значення для кожного напрямку в матеріалі, позначеного відповідними індексами. Існування в елементарному об'ємі деревини трьох площин пружної симетрії створює справедливе припущення гіпотези про ортогональність анізотропії. На рис. 2.1 показані площини симетрії кожного елементарного об'єму: площини, перпендикулярні радіальному r і тангенціальному t (по відношенню до річних шарів в разі цільної деревини, рис. 2.1а) напрямками, і площину, перпендикулярну напрямку волокон. Наявність трьох площин пружної симетрії в деревині створюють ідеалізовану розрахункову схему, яка відповідно поширюється і для шпонових матеріалів, рис. 2.1б).

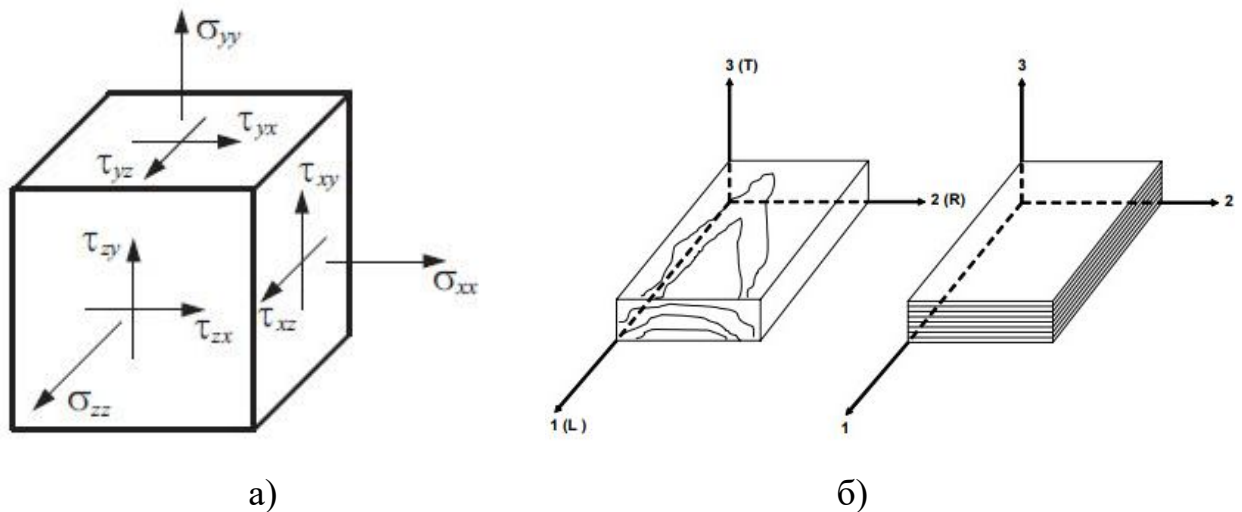


Рис. 2.1. Напружений стан трьох-вісного рівного стиснення (гідростатичного тиску) $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$: а) цільна деревина; б) шпоновий матеріал

Площина симетрії елементарного об'єму деревини відповідає площині ar , а площину rt , перпендикулярну волокнам, можна розглядати як площину симетрії лише за умови сталості властивостей по довжині стовбура і при відсутності збігу стовбура. Тангенціальну площину at можливо розглядати як площину симетрії без урахування відмінності властивостей ранньої та пізньої деревини або її шаруватого будови. В даний час найбільш поширений і обґрунтований безліччю досвідчених даних підхід до розгляду деревини як матеріал з властивостями пружної анізотропії [21, 23, 24].

Встановлена досвідченим шляхом залежність між напруженнями і деформаціями при розтягуванні, стисненні, згині і інших видах деформацій для деревини близька до лінійної практично аж до руйнування і носить анізотропний характер. Лінійний зв'язок зберігається і при випробуванні зразків в умовах складного напруженого стану. На рис. 2.2 наведені залежності пружних характеристик різних анізотропних конструкційних матеріалів від напрямку розтягування, отримані на плоских зразках [10, 11, 22].

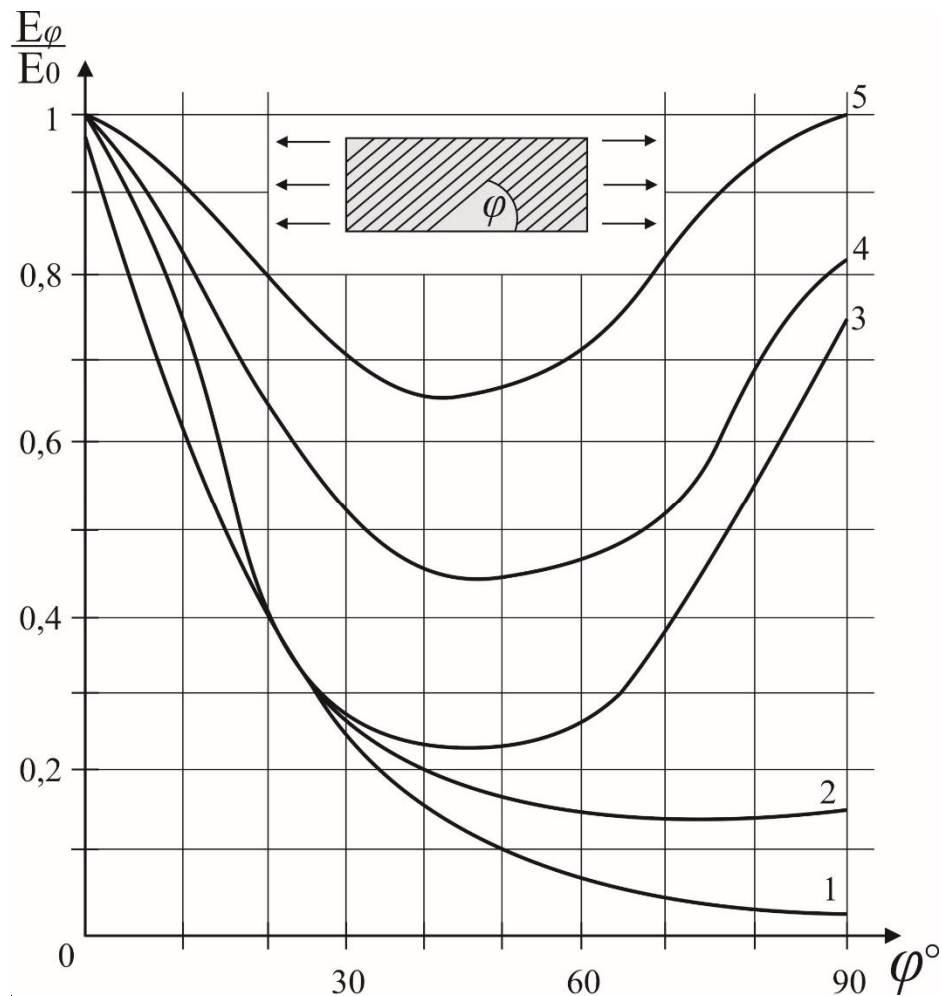


Рис. 2.2 Відносні величини модуля пружності деяких анізотропних конструкційних матеріалів в залежності від напрямку розтягування:

1 – сосна; 2 – дельта-деревина; 3 – фанера; 4 – склотекстоліт КАСТ-В; 5 – СВАМ.

Особливістю анізотропних матеріалів є також геометрія деформацій, де напрямок найбільших подовжень при одновісному розтягуванні не завжди збігається з напрямком розтягуючого зусилля (рис. 2.3). Розтягувальні

напруження, що діють не по осі симетрії, можуть викликати не тільки лінійні, але і кутові деформації, що призводить до відхилення напрямку найбільших подовжень від напрямку розтягування зразка.

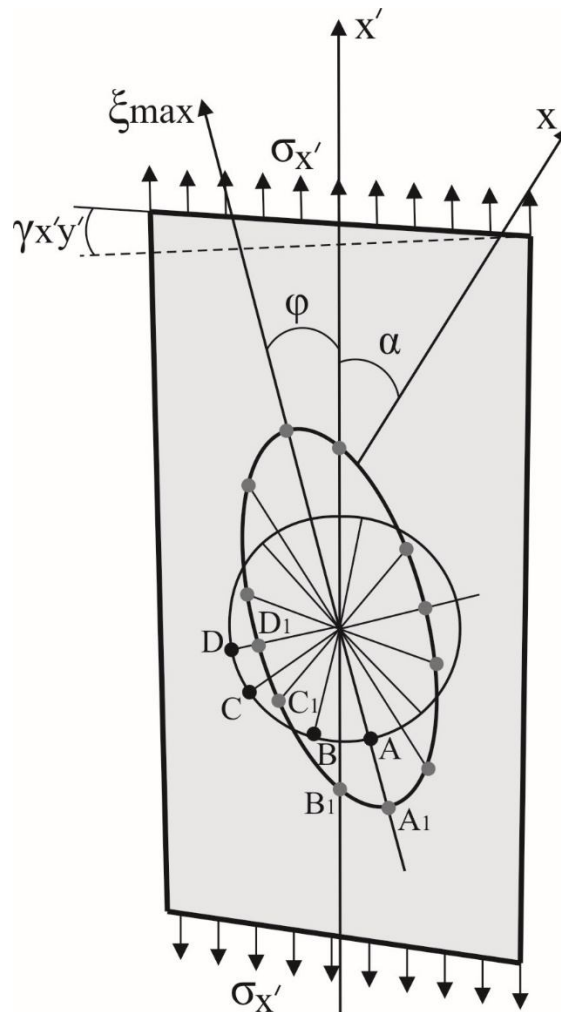


Рис. 2.3. Схематичне зображення еліпса деформацій круглого отвору при розтягуванні під кутом до волокон

Зображена на поверхні листа окружність ABCD після пружного розтягування в напрямку x / під кутом α до осі x приймає форму еліпса $A_1B_1C_1D_1$. Величина максимальної деформації $\varepsilon_{\max}$ або деформації більшої осі еліпса визначається за формулами (2.6) та (2.7):

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\varepsilon_{x'} + \varepsilon_{y'}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_{x'} - \varepsilon_{y'})^2 + \gamma_{x'y'}^2} \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\varepsilon_{x'}}{2} \left[1 - \mu_{x'y'} + \sqrt{(1 + \mu_{x'y'})^2 + \nu_{x',x'y'}^2} \right] \quad (2.7)$$

Кут φ між напрямом найбільшого подовження $\varepsilon_{\max} = \varepsilon_1$ і напрямком чинного напруги σ_x' визначається з рівняння (2.9). Обидва напрямки лежать в площині симетрії матеріалу.

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{\gamma_{x'y'}}{\varepsilon_{y'} - \varepsilon_{x'}} \quad (2.8)$$

де

$$\gamma_{x'y'} = \frac{\nu_{x',x'y'} \cdot \sigma_{x'}}{E_{x'}} \quad \varepsilon_{y'} = -\frac{\mu_{x'y'}}{E_{x'}} \cdot \sigma_{x'} \quad \varepsilon_{x'} = -\frac{\sigma_{x'}}{E_{x'}} \cdot \sigma_{x'} \quad (2.9)$$

Тоді вираз можна записати в іншому вигляді:

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{\nu_{x',x'y'}}{1 + \mu_{x'y'}} \quad (2.10)$$

При розрахунках і проектуванні елементів дерев'яних конструкцій зазвичай вводяться відмінності пружних властивостей тільки в напрямку вздовж і поперек волокон, використовуючи розрахункову схему поперечно-ізотропного матеріалу. Механічні властивості деревини різних порід в усіх напрямках, перпендикулярних волокнам, розрізняються між собою близько 10%, тому така розрахункова схема для практичних цілей цілком придатна. У старих вітчизняних будівельних нормах з проектування дерев'яних конструкцій СНиП II-25-80 [14], в теперішніх діючих нормах ДБН В.2.6-161:2017 [12] і зарубіжних нормах з проектування дерев'яних конструкцій EN1995-1-1 [77], DIN1052 [75], BS 5268, SIA 265 [118], та ін., деревина розглядається як транісotropний матеріал. Існуючі способи пресування і модифікації деревини призводять до зменшення її анісotropії і можна припустити, що при цьому не відбувається порушення розрахункової схеми ортогональної симетрії, лише збільшує міцність в напрямках, не збігаються з напрямом волокон. Дерев'яні шаруваті пластики (ДСП), до яких відноситься ЛВЛ брус, представляють листовий матеріал, що складається з листів шпону, просочених синтетичною смолою резольного типу і склеєних між собою в процесі термічної обробки під тиском. У свою чергу, шпоном позначені тонкі

листи натуральної деревини, одержувані лущенням відрізів кряжа. Лущений шпон має структуру, властиву тангенціальному розрізі стовбура дерева, і являє собою розгортку деревини на площину симетрії ат, що містить осі симетрії, одна з яких (а) паралельна волокнам, а друга (t) паралельна дотичній до річних шарів і склеюється в деревну пластину з різним напрямком волокон в суміжних шарах (рис. 2.4). Різноманіття кутів орієнтації шпону притаманні деревним шаруватим пластикам.

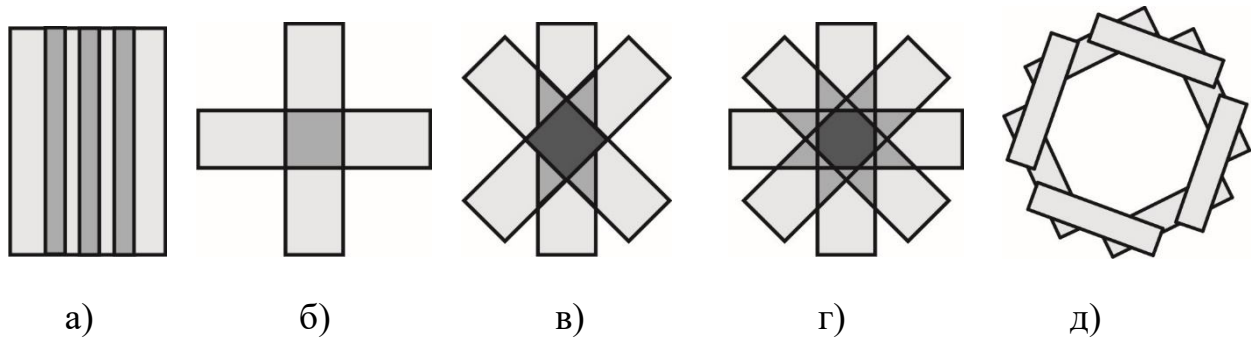


Рис. 2.4. Розташування шпону в дерев'яних шаруватих пластиках:

а) – ДСП-А, ДСП-Б; б) – ДСП-В; в) и г) – ДСП-Г, д) – зірчаста схема.

Розрізняють такі марки в залежності від напрямку волокон деревини в суміжних шарах шпони ДСП: ДСП-А, ДСП-Б, ДСП-В і ДСП-Г. Все ДСП, до яких відноситься ЛВЛ брус і фанера, де волокна в суміжних шарах шпони мають паралельне або ортогональне розташування, можуть бути віднесені до ортотропних матеріалів. У разі зірчастого розташування волокон в шарах шпони (ДСП-Г) розрахункова схема поперечної ізотропії краще відповідає дійсності. У будівництві, суднобудуванні і авіації широко застосовується фанера, що складається з склеєних між собою шарів шпону з взаємно перпендикулярним розташуванням волокон в суміжних шарах шпони, утворюючи ортотропну пластину.

Анізотропія натуральної деревини в стовбурі дерева, що росте забезпечує високу міцність. Дерев'яні шаруваті пластики, ЛВЛ брус і фанера мають не таку схему анізотропії, як натуральна деревина, що пояснюється попередньої механічної переробкою деревини в лущений шпон з наступною

термічною його переробкою. В елементах з цільної деревини, де траєкторії дії головних напружень не збігаються з напрямом волокон, міцність виявляється зниженою, в порівнянні з шаруватими пластиками.

2.2 Обґрунтування розрахункових моделей

Малі зразки з цільної деревини в кожній точці тіла мають ортогональну анізотропію або ортотропну, яку визначають три площини симетрії пружних властивостей: уздовж волокон, а в площині перпендикулярній до волокон - радіальний і тангенціальний напрямки (рис. 2.5). У цілісній колоді річні шари розташовуються по концентричних колах, і цю схему анізотропії умовно називають циліндричною з ортотропним розподілом. Ось анізотропії в цьому випадку може бути розташована всередині перетину і кількість невідомих пружних характеристик зменшується до 9, а саме: три модуля пружності, три модуля зсуву і три коефіцієнта Пуассона.

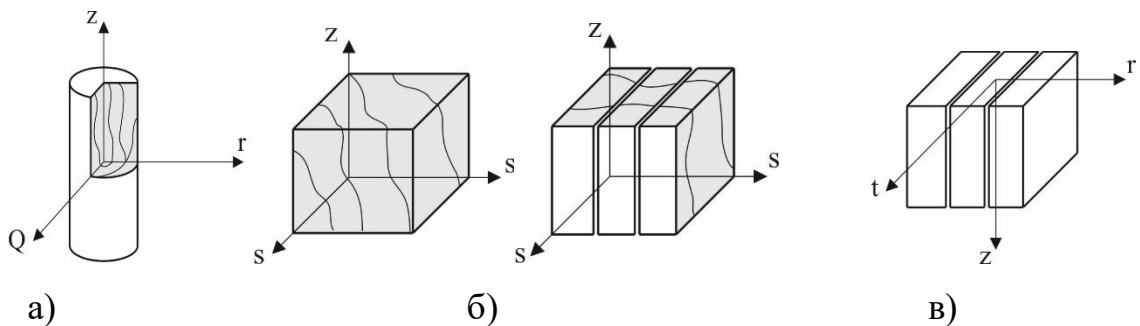


Рис. 2.5. Розрахункові моделі деревини: а – циліндрично-ізотропна; б – трансверсально-ізотропна; в– ортогонально-анізотропна.

Поняття «трансверсально-ізотропного», або «транстропного» матеріалу стосовно деревині було введено Митинським А.П. [21] на підставі гіпотези поперечної ізотропії, де всі промені, перпендикулярні до площини симетрії відносно своїх пружних властивостей, еквівалентні. За вісь симетрії приймається будь-яка вісь, паралельна волокнам. Для транстропного тіла характерно менше число пружних постійних, а саме два модуля пружності, два модуля зсуву і три коефіцієнта Пуассона. Згідно з рекомендаціями О.П.

Павлова [23, 24] і А.П. Митинського [21] для розгляду транстропного тіла необхідно мати п'ять незалежних пружних характеристик, оскільки в поперечному напрямку можна прийняти усереднений модуль пружності.

При дослідженні законів деформування анізотропних матеріалів типу фанери і склопластиків І.І. Гольденблатом [10, 11] були виділені два підходи, де перший з них передбачає розгляд матеріалу на основі шпону як монолітного анізотропного тіла (феноменологічний підхід). Другий підхід передбачає розгляд шпонового матеріалу як неоднорідне армоване середовище (структурне). Перший підхід передбачає безпосереднє використання теорії пружності анізотропних середовищ, при цьому механічні показники матеріалу (межі пружності, міцності та ін.) В даному випадку розглядаються як деякі інтегральні характеристики і визначаються при лабораторних випробуваннях зразків. При другому підході способи вираження механічних характеристик армованого матеріалу визначаються через механічні характеристики вихідних компонентів - в'язуючого і наповнювача, з урахуванням якісного і кількісного співвідношень при певній технології, істотно впливає на механічні характеристики одержуваного деревного продукту.

При виробництві ЛВЛ із заданими характеристиками міцності насамперед значна увага приділяється якості шпону, яке безпосередньо залежить від технологічного процесу лущення. При різанні шпону без притиску частини шпону зверненої до ножа (рис. 2.6), виникають максимальні розтягуючі напруження в точці контакту ножа з кряжем. Тріщини в шпоні сприяють збільшенню міцності і якості склеювання шарів шпону, а з іншого боку, вводять ряд обмежень, серед яких величина смоли і її концентрація, щоб при пресуванні запобігти пробиття шпону смолою і її вихід назовні або в суміжний шар.

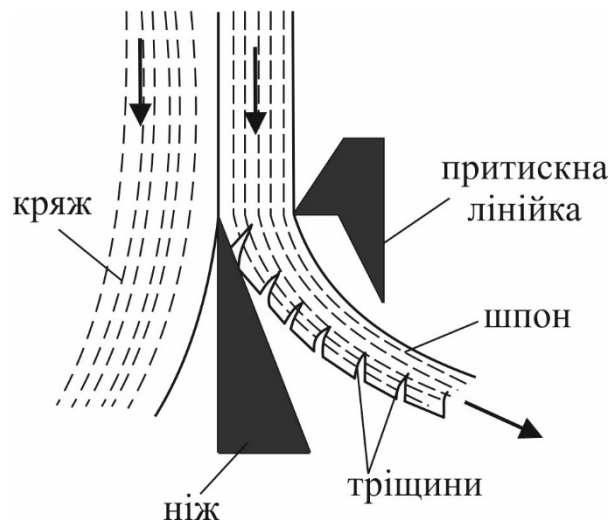


Рис. 2.6. Схема луцення шпону

При виробництві дерев'яних матеріалів на основі шпону встановлено ряд факторів, від яких залежить ступінь проникнення смоли в шпон і заповнення тріщин. До таких параметрів належать витрата смоли, тиск пресування, температура пресування, в'язкість смоли і тривалість пресування. Існує пряма залежність між межею міцності при сколюванні по клейовому шару і щільністю деревини. Крім того, здатність смоли заповнювати пористу структуру деревини, слід розглядати як позитивний фактор, що забезпечує тісний контакт і велику поверхню зіткнення смоли з деревиною. Завдяки гарної хімічної взаємодії адгезиву і субстрату, міцність зв'язку буде тим вище, чим більше площа, на якій здійснюється взаємодія.

Виконані дослідження з'єднань шарів шпону ЛВЛ за допомогою збільшувальною техніки, дозволили детально розглянути глибину проникнення різних типів клеїв в структуру шпону, величину самої адгезії, її технології і виявити вплив цих факторів на міцність кінцевого деревного продукту. Це дозволило не виконувати стикування шпону по довжині, що явно виражено в структурі ЛВЛ бруса. На рис. 2.7 показана схема розташування шпону в поздовжньому напрямку ЛВЛ бруса.

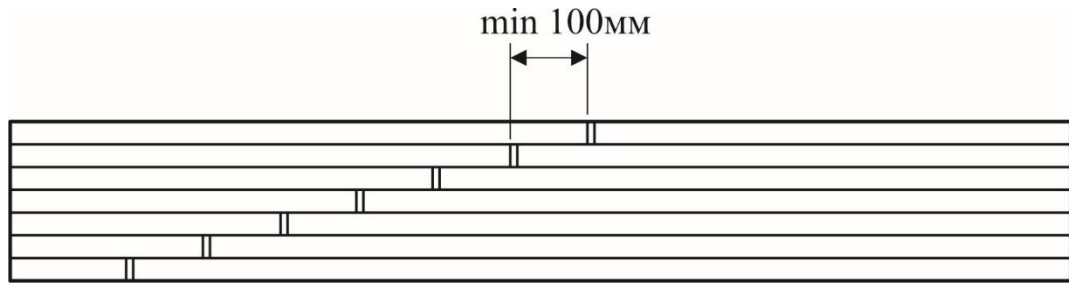


Рис. 2.7. Схема розташування листів шпону в поздовжньому напрямку в ЛВЛ брусі.

Високий ступінь просочення клеєм шпону стала основою для моделі розрахунку напруженого стану фанери або іншого матеріалу на основі шпону по елементарному прошарку. Раніше був запропонований розрахунок модуля пружності фанери в залежності від пружних властивостей окремого шару шпону, на підставі якого, розглядаючи фанеру, середня площа збігається з площиною xu прямокутної системи координат, а осі x і y мають той же напрямок, що і головні осі ортотропного матеріалу. Для багатошарової фанери величина модуля пружності E при розтягуванні визначається за формулою:

$$E = \frac{a \cdot E_0 + b \cdot E_{90}}{a + b} \quad (2.11)$$

де a, b – числа шарів шпону з розташуванням вздовж і поперек волокон лицьового шару;

E_0, E_{90} – модулі пружності з поздовжнім і поперечним розташуванням волокон лицьового шару фанери або ЛВЛ.

Обчислення приведенного модуля пружності при розтягуванні вимагає великих обчислень, що незручно для практичного застосування. Модуль пружності, який визначається при згині для багатошарових пластин, при дії згинального моменту визначається по формулам:

$$\chi_x = \frac{\varepsilon_x}{z} \quad (2.12)$$

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{bmatrix}, \quad (2.13)$$

де $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – деформації, які не залежать від координати z ;

N_x, N_y – розтягуюче напруження;

A_{ij} – компоненти тензора жорсткості.

Якщо формули (2.13) розглядати стосовно кожної напівпластини і проінтегрувати, то вони набувають такий вигляд:

$$\begin{bmatrix} \mu_x \\ \mu_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \chi_x \\ \chi_y \end{bmatrix}, \quad (2.14)$$

тут

$$\mu_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_z dz; \quad D_{ij} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} e_{ij} z^2 dz; \quad (2.15)$$

де χ_x, χ_y – викривлення пластинки;

D_{ij} – компоненти тензора жорсткості при згині;

h – товщина пластинки.

$$\begin{aligned} D_{11} &= \left[12 a c^2 + \frac{E_2}{E_1} (n^2 - 1)(n - 3) + (n + 1)(n - 3)(n - 5) \right] \frac{E_1 \cdot t}{24}; \\ D_{22} &= \left[12 b c^2 + (n^2 - 1)(n - 3) + \frac{E_2}{E_1} (n - 1)(n - 3)(n - 5) \right] \frac{E_1 \cdot t}{24}; \end{aligned} \quad (2.16)$$

где $a = \frac{Edx}{E_1} \cdot \frac{d}{t}; \quad b = \frac{Edy}{E} \cdot \frac{d}{t};$

$$c = \left(n - 2 + \frac{d}{t} \right);$$

t – товщина внутрішнього шпону;

n – кількість шарів шпону;

d – товщина лицьової шпони.

Діленням жорсткості D_{11} або D_{12} на величину $h^3 / 12$ отримаємо наведений модуль пружності при вигині:

$$E_{np} = \frac{D_{11}}{h^3} 12 \quad (2.17)$$

В роботі Рабиновича А.Л. [26] жорсткість шаруватої пластинки при згині в одній площині ($\mu = 0$) визначається з виразу:

$$B_{11} = \frac{E_{b_{11}} \delta^3}{12 (1 - \mu_{b,0}) \mu_{b,90}} \quad (2.18)$$

де B_{11} – жорсткість пластинки;

δ – товщина пластинки;

$E_{b_{11}}$ – наведений модуль пружності при вигині пластинки;

Для фанери і ЛВЛ бруса, де всі шари шпону рівні по товщині, наведений модуль пружності дорівнює:

$$E_{b_{11}} = E_{b,0} = \frac{E_0}{2n^3} [n^3 (1 + \lambda) + (3n^2 - 2)(1 - \lambda)] \frac{1 - \mu_{b,0} \mu_{b,90}}{1 - \mu_0 \mu_{90}} \quad (2.19)$$

$$E_{b_{22}} = E_{b,90} = \frac{E_{90}}{\lambda 2n^3} [n^3 (1 + \lambda) + (3n^2 - 2)(1 - \lambda)] \frac{1 - \mu_{b,0} \mu_{b,90}}{1 - \mu_0 \mu_{90}} \quad (2.20)$$

де E_0 – модуль пружності елементарного шару;

n – кількість шарів шпону;

$\lambda = E_{90}/E_0$

$\mu_{b,0}, \mu_{b,90}$ – приведені коефіцієнти Пуассона;

$$\mu_{b,0} = \frac{2n^3 \mu_0 \lambda}{n^3 (1 + \lambda) - (3n^2 - 2)(1 - \lambda)} \quad (2.21)$$

$$\mu_{b,90} = \frac{2n^3 \mu_{90}}{n^3 (1 - \lambda) + (3n^2 - 2)(1 - \lambda)} \quad (2.22)$$

Для випадку, коли шари шпону по товщині не рівні, приведений модуль пружності при вигині визначається з виразів:

$$E_{b_{11}} = \frac{E_0 \delta_m^3}{8 \delta^3} [(1 + \varepsilon \nu_x) b_1 + (1 - \varepsilon \nu_x) b_2] \frac{1 - \mu_{b,0} \mu_{b,90}}{1 - \mu_0 \mu_{90}} \quad (2.23)$$

$$E_{b_{22}} = \frac{E_{90} \delta_m^3}{8 \delta^3} \left[(1 + \varepsilon_{y_1}) b_1 + (1 - \varepsilon_{y_2}) b_2 \right] \frac{1 - \mu_{b,0} \mu_{b,90}}{1 - \mu_0 \mu_{90}} \quad (2.24)$$

де δ_m – товщина зовнішнього шару;

δ – товщина фанери або ЛВЛ бруса.

$$\varepsilon = \frac{\delta_m - 1}{\delta_m} \quad (2.25)$$

$$b_1 = (1 + \varepsilon)^2 n^3 + 2(1 + \varepsilon^2) + n(1 - \varepsilon)^2 \quad (2.26)$$

$$b_2 = (1 + \varepsilon)^2 (3n^2 - 2) + 2n(1 - \varepsilon)^2 + (1 - \varepsilon)^2 \quad (2.27)$$

Наведені вище методи розрахунку багатошарових шпонових матеріалів дозволяють зробити деякі узагальнення, як те, що метод розрахунку наведеного модуля пружності не враховує впливу клейових шарів, значення яких має велике значення. Розрахунок наведеного модуля пружності з урахуванням впливу клейових шарів має обмежений характер, оскільки цей метод можна застосовувати тільки для шпонових матеріалів з рівною товщиною всіх шарів шпону або зі зміною товщини тільки зовнішніх шарів. Характеристики міцності показники елементарного шару зростають з переходом до менших товщинам, що викликано зменшенням розміру тріщин від лущення на шпоні менших товщин.

2.3 Розрахунок напруженого стану по елементарному шару шпону

Міцність деревних матеріалів на основі шпону суттєво залежить від величини клейового шару, що сприяло створенню теоретичних передумов для методів розрахунку напруженого стану ЛВЛ і фанери по елементарному прошарку. Поняття «елементарний шар» має на увазі лист шпону, просочений клеєм або смолою. Несуча здатність шпонового матеріалу визначається граничною деформацією ставленням σ_{y-i}/E_{y-i} . Зв'язок між деформаціями та напруженнями для елементарного прошарку при плоскому напруженому стані описується законом Гука:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\mu_{xy}}{E_y}; \\ \varepsilon_y &= -\frac{\mu_{yx}}{E_x} + \frac{\sigma_y}{E_y}.\end{aligned}\quad (2.28)$$

Приведений модуль пружності при згині має такий вигляд:

$$E_x = E_{x_0} \left(\frac{H_0}{H} \right)^3 + \sum_{i=1}^m E_{x_i} \left[\left(\frac{H_i}{H} \right)^3 \left(\frac{H_{i-1}}{H} \right)^3 \right], \quad (2.29)$$

де

H_0 – половина товщини шпону, лежачого на осі симетрії листа ЛВЛ;

H_i – товщина елементарного поздовжнього шару шпону;

H_{i-1} – товщина елементарного поперечного шару шпону;

H – товщина ЛВЛ бруса.

Напруження в кожному елементарному шару шпону визначається виразами:

$$\begin{aligned}\sigma_{x_i} &= \frac{E_{x_i}}{(1 - \alpha_i)} (K_x + \mu_{xy_i} K_y) z; \\ \sigma_{y_i} &= \frac{E_{y_i}}{(1 - \alpha_i)} (K_y + \mu_{yx_i} K_x) z;\end{aligned}\quad (2.30)$$

де $\alpha = \mu_{xy-i} \cdot \mu_{yx-i}$;

z – половина товщини ЛВЛ.

$$\begin{aligned}K_x &= \frac{P_{yy} \mu_x}{(P_{xx} P_{yy} - P_{xy} P_{yx}) b}; \\ K_y &= \frac{P_{yx} \mu_x}{(P_{xx} P_{yy} - P_{xy} P_{yx}) b};\end{aligned}\quad (2.31)$$

де P_{xx}, P_{yy}, P_{xy} – вираження жорсткості для головних напрямків анізотропії в зоні розтягу та стиску:

$$P_{xx} = \frac{2}{3} \left[\frac{E_{x_0}}{1 - \alpha_0} H_0^3 + \sum_{i=1}^m \frac{x_i}{1 - \alpha_i} (H_i^3 - H_{i-1}^3) \right]; \quad (2.32)$$

$$P_{xy} = \frac{2}{3} \left[\frac{\mu_{xy_0} E_{x_0}}{1 - \alpha_0} H_0^3 + \sum_{i=1}^m \frac{\mu_{xy_0} E_{x_i}}{1 - \alpha_i} (H_i^3 - H_{i-1}^3) \right];$$

$$P_{yx} = \frac{2}{3} \left[\frac{\mu_{yx_0} E_{y_0}}{1 - \alpha_0} H_0^3 + \sum_{i=1}^m \frac{\mu_{yx_i} E_{y_i}}{1 - \alpha_i} (H_i^3 - H_{i-1}^3) \right];$$

$$P_{yy} = \frac{2}{3} \left[\frac{E_{y_0}}{1 - \alpha_0} H_0^3 + \sum_{i=1}^m \frac{E_{y_i}}{1 - \alpha_i} (H_i^3 - H_{i-1}^3) \right];$$

де b – ширина ЛВЛ;

$\mu_x = Pl/4$ (l – відстань між опорами; P - навантаження).

З введенням поняття «елементарний шар», можливо дати аналітичний розрахунок міцності шпону зі зміною глибини проникнення смоли в деревину шпону. При розгляді розтягу і згину шару шпону, просоченого смолою, товщиною Δ , модуль пружності змінюється за лінійним законом (рис. 2.8а). Критерієм оцінки будь-якого методу розрахунку може служити тільки порівняння розрахункових даних з експериментом. З роботи [19] видно, що метод розрахунку наведеного модуля пружності по елементарному прошарку дає найбільш близький збіг з експериментальними даними.

Модуль пружності

$$E = E' + K(z - h); \quad K = \frac{E'' - E'}{\Delta}. \quad (2.33)$$

При спільній дії згину і розтягу деформація визначається:

$$\varepsilon = \varepsilon' + \alpha(z - h); \quad \alpha = \frac{\varepsilon'' - \varepsilon'}{\Delta}, \quad (2.34)$$

де $E'', E', \varepsilon'', \varepsilon'$ – модулі пружності та деформації нижніх і верхніх волокон шпону, просоченого смолою.

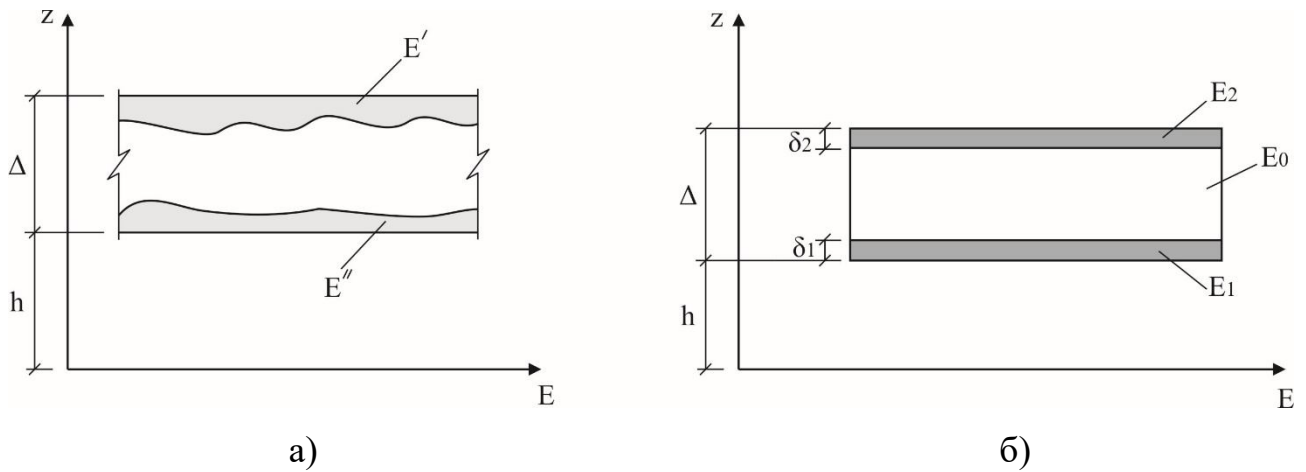


Рис. 2.8. Розрахункові схеми: а) шпону просоченого смолою, б) елементарного шару фанери.

Сила і момент, що виникають в елементарному шарі:

$$P = \int_h^{h+\Delta} \sigma dz = \sigma'_\Delta + \mu' \frac{\Delta}{2} + \nu \frac{\Delta^3}{3} = \left(\sigma' + \frac{1}{2} \mu' \Delta + \frac{1}{3} \nu \Delta^2 \right) \Delta; \quad (2.35)$$

$$\begin{aligned} m &= \int_\Delta^{h+\Delta} \sigma_z dz = \int_h^{h+\Delta} \sigma (z-h) dz + h \int_h^{h+\Delta} \sigma dz = \sigma' \frac{\Delta^2}{2} + \mu' \frac{\Delta^3}{3} + \nu \frac{\Delta^4}{4} + Ph = \\ &= \left(\frac{1}{2} \sigma' + \frac{1}{3} \mu' \Delta + \frac{1}{4} \nu \Delta^2 \right) \Delta^2 + Ph. \end{aligned} \quad (2.36)$$

При розгляді розтягу і згину просоченого з двох сторін шпону як з'єднання трьох шарів (рис. 2.8-б):

$$E \left\{ \begin{array}{ll} E'_0 - K_1(z-h-\delta_1); & h \leq z \leq h+\delta_1; \\ E_0; & h+\delta_1 \leq z \leq h+\Delta-\delta_2; \\ E'_0 - K_2(z-h-\Delta-\delta_2); & h+\Delta-\delta_2 \leq z \leq h+\Delta, \end{array} \right\} \quad (2.37)$$

$$\text{де } K_1 = (E_1 - E'_0) / \delta_1; \quad (2.38)$$

$$K_2 = (E_2 - E'_0) / \delta_2; \quad (2.39)$$

E_0 – модуль пружності натурального шпону;

E'_0 – приведений модуль пружності елементарного шару.

Представляючи силу розтягу і згинаючий момент шпону у вигляді:

$$\begin{aligned}
 P &= \varepsilon_1' E_u^p \Delta + \alpha E_u^{1p} \frac{\Delta^2}{2}; \\
 m &= \varepsilon_1' E_u^{1u} \frac{\Delta^2}{2} + \alpha E_u^u \frac{\Delta^3}{3};
 \end{aligned}
 \tag{2.40}$$

отримаємо такі вирази:

$$\begin{aligned}
 E_u^p &= \frac{1}{\Delta} \left[E_1 \delta_1 + E_0 (\Delta - \delta_1 - \delta_2) + E_0' \delta_2 - K_1 \frac{\delta_1^2}{2} + K_2 \frac{\delta_2^2}{2} \right]; \\
 E_u^u &= \frac{3}{\Delta^3} \left[E_1 \frac{\delta_1^3}{3} + E_0 \frac{(\Delta - \delta_1 - \delta_2)^3}{3} + E_0' \frac{\delta_2^3}{3} - K_1 \frac{\delta_1^4}{4} + K_2 \frac{\delta_2^4}{4} + \right. \\
 &\quad \left. + \left(E_1 \frac{\delta_1^2}{2} - K_1 \frac{\delta_1^3}{3} \right) h + E_0 \frac{(\Delta - \delta_1 - \delta_2)^2}{2} (h + \delta_1) + \left(E_0' \frac{\delta_2^2}{2} + K_2 \frac{\delta_2^3}{3} \right) (h + \Delta - \delta_2) \right]. \\
 E_{II} &= E_0 + (E_u^u - E_0) \frac{\Delta}{\delta_1 + \delta_2},
 \end{aligned}
 \tag{2.41}$$

де E_{II} – модуль частини шпону просочений смолою в поперечному перерізі.

Високий модуль пружності шпону в просоченій смолою зоні пояснюється тим, що смола заповнює тріщини, порожнини судин і робить матеріал в цій зоні більш однорідним. При цьому смола знімає концентрацію напружень в шпоні, викликаних порожнечами пористої структури деревини і тріщин на його поверхні, тим самим створюючи однорідність матеріалу. Згідно з експериментальними даними, глибина проникнення смоли в шпон при склеюванні фанери з підпресовкою становить близько 0,08 мм, або $\delta_1 = \delta_2 = 0,08$ мм. Заповнення смолою провідних елементів структури деревини і тріщин призводить до зміни міцності і пружних характеристик шпону і шпонового матеріалу в цілому. Для шпону ЛВЛ бруса глибина просочення декілька збільшена через товщину шпону, методу розкрутки кряжа і через те, що використовується шпон хвойних порід, на відміну від фанери, де застосовуються листяні породи.

2.4 Пластична модель для клейових з'єднань деревини

Розроблена проф. Е. Серрано [114] нова модель аналізу клейового з'єднання як контакту, об'єднана з моделлю пластичності для матеріалу клею і є актуальною для врахування особливостей роботи клейового шару в з'єднаннях на вклеєних стержнях.

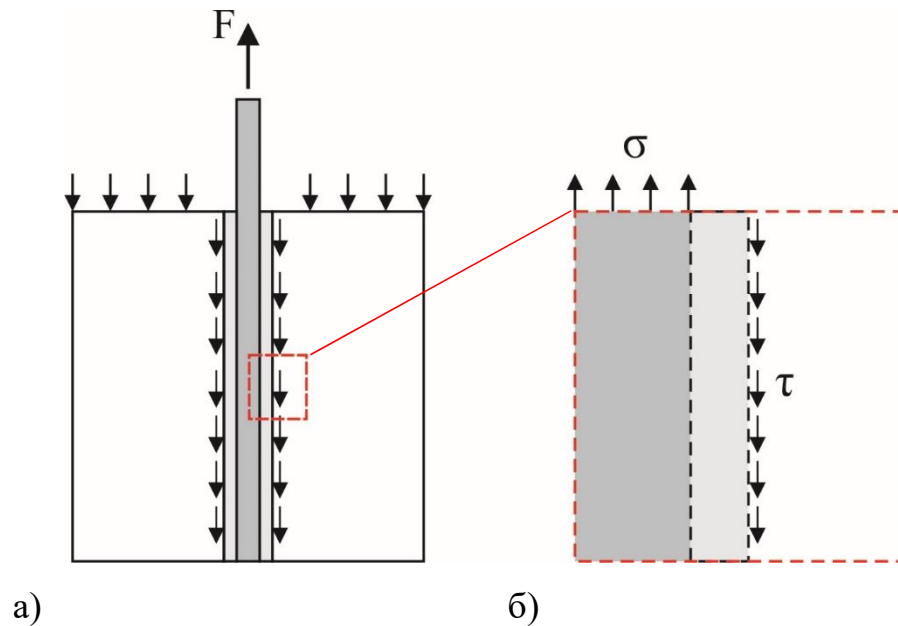


Рис. 2.8 Схема роботи клейового шва в з'єднаннях на вклеєно стержнях: а) дотичні напруження вздовж стержня; б) збільшена схема розподілу напруження вздовж клейового шва.

Для повноти, розглянутого питання буде приведений короткий висновок класичної теорії пластичності, в основному слідуючи схемі, наведеною в роботі [108], заснований на теорії малих деформацій, на відміну від того, що для деяких типів адгезивів, таких як на основі ПВА, на лінії зрощування [115, 116] можуть розвиватися надзвичайно великі деформації. Запропоновані нижче рівняння і висновки виходять за рамки моделі пластичності адгезивов, і стверджується, що можна використовувати теорію пластичності великих деформацій. Вибір того, яку теорію пластичності великий деформації використовувати, далекий від очевидності згідно роботі [113]. Відправною точкою теорії пластичності малих деформацій є поділ загальної деформації в

пружну або відновлювану і пластичну або безповоротну частина. Відповідно до теорії малих деформацій, тензор деформації визначається відповідно до виразу:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad (2.43)$$

як це співвідношення лінійно по u_i , то звідси витікає:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i^e}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^e}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i^{pl}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^{pl}}{\partial x_i} \right) = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^{pl} \quad (2.44)$$

Загальноприйнятим є припущення про аддитивне розкладання тензора повної деформації, яке може бути виконане, оскільки деформація вимірюється лінійно. Також слід зазначити, що пружні деформації визначаються законом Гука:

$$\dot{\sigma}_{ij} = D_{ijkl} (\epsilon_{kl} + \epsilon_{kl}^{pl}) \quad (2.45)$$

де передбачається, що тензор пружності D_{ijkl} постійний. Можна визначити критерій плинності F , який є функцією напруження і набору параметрів зміцнення, які визначають зміну поверхні плинності в залежності від навантаження на пластик, K^α ($\alpha=1,2,3,\dots$):

$$F(\sigma_{ij}, K^\alpha) = 0 \quad (2.46)$$

Передбачається, що параметри зміцнення, K^α , залежать від набору внутрішніх перемінних, k^α , які контролюють історію завантаження пластика матеріалу. Це, в свою чергу, означає, що для пружного навантаження отримаємо такий вираз:

$$K^{\dot{\alpha}} = \frac{\partial K^\alpha}{\partial k^\alpha} \dot{k}^\alpha = 0 \quad (2.47)$$

При текучості напруження повинні залишатися на поверхні виходу, що говорить про пов'язаності відносин:

$$F = \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \dot{\sigma}_{ij} + \frac{\partial F}{\partial K^\alpha} K^{\dot{\alpha}} = 0 \quad (2.48)$$

Закон течії:

$$\dot{\epsilon}^{pl} = \dot{\lambda} \frac{\partial G}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2.49)$$

визначає еволюцію пластичної деформації і стверджує, що швидкість пластичної деформації спрямована паралельно нормалі пластичного потенціалу G , скалярна величина $\dot{\lambda}$ називається пластичним множником. Якщо припустити, що закони еволюції внутрішніх перемінних є однорідними функціями часу, то можна написати:

$$\dot{k}^{\alpha} = k^{\alpha} \left(\dot{\lambda}, \dot{\sigma}_{ij}, \dot{K} \right) = \dot{\lambda} k^{\alpha} (\sigma_{ij}, K) \quad (2.50)$$

Вводячи закон течії (2.50) в рівняння (2.47) і використовуючи результат щодо погодженості (2.48), отримуємо:

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \dot{\sigma}_{ij} - H \dot{\lambda} = 0, \quad (2.51)$$

де H - узагальнений модуль пластичності і визначається формулою:

$$H = - \frac{\partial F}{\partial K^{\alpha}} \frac{\partial K^{\alpha}}{\partial k^{\beta}} k^{\beta} = 0. \quad (2.52)$$

Тепер, використовуючи закон Гука (2.45) в законі течії (2.49), отримаємо

$$\dot{\sigma}_{ij} = D_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\lambda} D_{ijmn} \frac{\partial G}{\partial \sigma_{mn}}. \quad (2.53)$$

Помноживши це на $\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}$ і вставивши його в співвідношення узгодженості (2.51), отримаємо:

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \left(D_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\lambda} D_{ijmn} \frac{\partial G}{\partial \sigma_{mn}} \right) - H \dot{\lambda} = 0 \quad (2.54)$$

які після перетворення мають вигляд:

$$\dot{\lambda} = \frac{\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}}{H + \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} D_{ijmn} \frac{\partial G}{\partial \sigma_{mn}}} D_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl} \quad (2.55)$$

В кінцевому підсумку маємо такий вираз:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{pl} = \frac{\frac{\partial F}{\partial \sigma_{kl}} D_{klmn} \dot{\epsilon}_{mn} \frac{\partial G}{\partial \sigma_{ij}}}{H + \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} D_{ijmn} \frac{\partial G}{\partial \sigma_{mn}}} \quad (2.56)$$

Формула (2.56) показує, що швидкість пластичної деформації може бути обчислена, якщо ми маємо повну швидкість деформації $\dot{\epsilon}_{ij}$, а після вставки вираження (2.55) в вираз (2.53) отримаємо:

$$\dot{\sigma}_{ij} = D_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl} - \frac{D_{ijmn} \frac{\partial G}{\partial \sigma_{mn}} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{st}} D_{stkl}}{H + \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} D_{ijmn} \frac{\partial G}{\partial \sigma_{mn}}} \dot{\epsilon}_{kl} = D_{ijkl}^{ep} \dot{\epsilon}_{kl} \quad (2.57)$$

Це визначає не залежить від швидкості еласто-пластичного тензора жорсткості, D_{ijkl}^{ep} . Так як загальна швидкість деформації використовується в цьому відношенні, вона називається форматом керованого напруження, який використовується при інтегруванні еласто-пластичних конститутивних рівнянь, щоб оновити невідомі напруження для наступного кроку процедури інкрементного (покрокового) рішення. Для етапу навантаження, що включає чисто пластичну поведінку, можливо записати формально такий вираз:

$$\sigma^{i+1} = \sigma^i + \int_{\epsilon_i}^{\epsilon_{i+1}} D^{ep} d\epsilon \quad (2.58)$$

Далі буде представлена схема розкладання деформацій, яка може бути використана для тонких ліній зв'язку. Основна ідея полягає в тому, щоб охарактеризувати адгезійний зв'язок шляхом розгляду одиничного шару «сполучного матеріалу», характеристики якого залежать від двох шарів, які називаються відповідно адгезійним шаром клею і проміжним шаром клею. Для загальних проектних ситуацій в дерев'яних конструкціях, товщина

зв'язуючих ланок клею дійсно мала, так як типова товщина з'єднувальної лінії знаходиться в діапазоні 10^{-4} - 10^{-3} м. Інше визначення тонкої лінії зв'язку може полягати в тому, що напруга, перпендикулярний площині лінії зв'язку і два компоненти зсувної площини є постійними по відношенню до напрямку товщини. Іншими словами, можна вважати, що напруження σ_{xy} , σ_{yz} и σ_{yy} повинні бути постійними щодо y . Оскільки з причин безперервності, це повинно виконуватися в межі, коли товщина лінії зв'язку наближається до нуля. Використовуючи такий же аргумент безперервності, можна зробити висновок, що деформації ϵ_{xy} , ϵ_{yz} и ϵ_{yy} також можуть передбачатися постійними по відношенню до напрямку товщини.

Механічна поведінка дерев'яних адгезійних зв'язків сильно залежить від поведінки деревини [115, 116, 133]. Для масивної деревини також є дослідження, які свідчать про те, що деревина при розтягуючому навантаженні, перпендикулярному до зерна і поздовжньому зсуві, дійсно може розглядатися як пом'якшувальний деформацію матеріал [61, 72].

Передбачається, що лінія зв'язків складається з двох шарів, позначених попередніми верхнім рядках 1 і 2 з різною товщиною t_1 и t_2 . Напруження і жорсткість цього гомогенізованого матеріалу позначені зіркоподібним індексом. Вводиться умова, що t_1 більше ніж t_2 , і ці два шари є клейким шаром і областю розділу з одного боку лінії зв'язку.

Використовуючи вищезгадані припущення щодо компонентів напруги і деформації, припустимо, що конститутивні відносини двох шарів дані в вигляді швидкості, подібно до тієї, яка використовується в теорії пластичності:

$${}^1\dot{\sigma} = {}^1D \cdot {}^1\dot{\epsilon}, \quad {}^2\dot{\sigma} = {}^2D \cdot {}^2\dot{\epsilon}, \quad {}^*\dot{\sigma} = {}^*D \cdot {}^*\dot{\epsilon}, \quad (2.59)$$

де розміри матриці узгоджуються з кількістю компонентів активного напруження. Це означає, що матриці жорсткостей мають розміри (6x6) і вектори напружень і деформацій мають розміри (6x1). Для різних компонентів можуть використовуватися такі символи:

$${}^1\dot{\sigma} = \begin{bmatrix} {}^1\dot{\sigma}_{xx} \\ {}^1\dot{\sigma}_{yy} \\ {}^1\dot{\sigma}_{zz} \\ {}^1\dot{\sigma}_{xy} \\ {}^1\dot{\sigma}_{xz} \\ {}^1\dot{\sigma}_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^1\dot{\sigma}_1 \\ {}^1\dot{\sigma}_2 \\ {}^1\dot{\sigma}_3 \\ {}^1\dot{\sigma}_4 \\ {}^1\dot{\sigma}_5 \\ {}^1\dot{\sigma}_6 \end{bmatrix} \quad {}^1D = \begin{bmatrix} {}^1D_{11} & {}^1D_{12} & {}^1D_{13} & {}^1D_{14} & {}^1D_{15} & {}^1D_{16} \\ {}^1D_{21} & {}^1D_{22} & {}^1D_{23} & {}^1D_{24} & {}^1D_{25} & {}^1D_{26} \\ {}^1D_{31} & {}^1D_{32} & {}^1D_{33} & {}^1D_{34} & {}^1D_{35} & {}^1D_{36} \\ {}^1D_{41} & {}^1D_{42} & {}^1D_{43} & {}^1D_{44} & {}^1D_{45} & {}^1D_{46} \\ {}^1D_{51} & {}^1D_{52} & {}^1D_{53} & {}^1D_{54} & {}^1D_{55} & {}^1D_{56} \\ {}^1D_{61} & {}^1D_{62} & {}^1D_{63} & {}^1D_{64} & {}^1D_{65} & {}^1D_{66} \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

де індекси доданків відносяться до їх строки стовпчика.

Відповідно до припущень тонкого зв'язку, для напружень маємо такі вирази:

$${}^1\dot{\sigma}_2 = {}^2\dot{\sigma}_2 = \dot{\sigma}_2^*, \quad {}^1\dot{\sigma}_4 = {}^2\dot{\sigma}_4 = \dot{\sigma}_4^*, \quad {}^1\dot{\sigma}_6 = {}^2\dot{\sigma}_6 = \dot{\sigma}_6^*, \quad (2.61)$$

Це можна інтерпретувати як послідовну систему перенесення напруження. Щоб забезпечити безперервність зміщення для гомогенізованого матеріалу по відношенню до зміщення в двох шарах, ми повинні мати (для постійних деформацій всередині кожного шару):

$${}^1\dot{\epsilon}_2 t_1 + {}^2\dot{\epsilon}_2 t_2 = \dot{\epsilon}_2^* (t_1 + t_2) \quad (2.62)$$

$${}^1\dot{\epsilon}_4 t_1 + {}^2\dot{\epsilon}_4 t_2 = \dot{\epsilon}_4^* (t_1 + t_2) \quad (2.63)$$

$${}^1\dot{\epsilon}_6 t_1 + {}^2\dot{\epsilon}_6 t_2 = \dot{\epsilon}_6^* (t_1 + t_2) \quad (2.64)$$

Аналогічне припущення щодо деформацій:

$${}^1\dot{\epsilon}_1 = {}^2\dot{\epsilon}_1 = \dot{\epsilon}_1^*, \quad {}^1\dot{\epsilon}_3 = {}^2\dot{\epsilon}_3 = \dot{\epsilon}_3^*, \quad {}^1\dot{\epsilon}_5 = {}^2\dot{\epsilon}_5 = \dot{\epsilon}_5^*, \quad (2.65)$$

які можуть бути отримані з вимог безперервності в граничному випадку нульової товщини. Рівняння (2.65) можна розглядати як паралельну систему при перенесенні напружень, причому механічна аналогія є пучок напружених волокон. Сили на двох шарах і на гомогенізованому матеріалі статично еквівалентні, якщо маємо (для постійного напруження всередині кожного шару):

$${}^1\dot{\sigma}_1 t_1 + {}^2\dot{\sigma}_1 t_2 = \sigma_1^* (t_1 + t_2) \quad (2.66)$$

$${}^1\dot{\sigma}_3 t_1 + {}^2\dot{\sigma}_3 t_2 = \sigma_3^* (t_1 + t_2) \quad (2.67)$$

$${}^1\dot{\sigma}_5 t_1 + {}^2\dot{\sigma}_5 t_2 = \sigma_5^* (t_1 + t_2) \quad (2.68)$$

Розкладання деформацій здійснюється шляхом пошуку такого виразу, яке при заданій повній деформації в гомогенізованому матеріалі дозволить розрахувати деформації в шарах 1 і 2. Можна використовувати конститутивні співвідношення (2.59), щоб отримати напруження в шарах і далі використовувати співвідношення (2.61) і (2.66) - (2.68) для отримання напружень в гомогенізований матеріалі. Щоб отримати тангенціальну матрицю жорсткості гомогенізоване матеріалу, можна переписати відповідно до шістьох, в тривимірному випадку основних одноосьових станів, а отримані напруження потім еквівалентно стовпцям матриці D.

$${}^1\dot{\epsilon} = \begin{bmatrix} {}^1\dot{\epsilon}_1^* \\ {}^1\dot{\epsilon}_2^* \\ {}^1\dot{\epsilon}_3^* \\ {}^1\dot{\epsilon}_4^* \\ {}^1\dot{\epsilon}_5^* \\ {}^1\dot{\epsilon}_6^* \end{bmatrix} \quad {}^2\dot{\epsilon} = \begin{bmatrix} {}^2\dot{\epsilon}_1^* \\ {}^2\dot{\epsilon}_2^* \\ {}^2\dot{\epsilon}_3^* \\ {}^2\dot{\epsilon}_4^* \\ {}^2\dot{\epsilon}_5^* \\ {}^2\dot{\epsilon}_6^* \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

Це призводить до трьох невідомих компонентів деформації в кожному шарі. Для розв'язання матриць спочатку необхідно використовувати конститутивні співвідношення (2.74), які дозволяють встановити два вирази

для напружень ${}^1\dot{\sigma}_2$ и ${}^2\dot{\sigma}_2$ відповідно.

$${}^1\dot{\sigma}_2 = {}^1D_{21} {}^1\dot{\epsilon}_1 + {}^1D_{22} {}^1\dot{\epsilon}_2 + {}^1D_{23} {}^1\dot{\epsilon}_3 + {}^1D_{24} {}^1\dot{\epsilon}_4 + {}^1D_{25} {}^1\dot{\epsilon}_5 + {}^1D_{26} {}^1\dot{\epsilon}_6 \quad (2.70)$$

$${}^2\dot{\sigma}_2 = {}^2D_{21} {}^2\dot{\epsilon}_1 + {}^2D_{22} {}^2\dot{\epsilon}_2 + {}^2D_{23} {}^2\dot{\epsilon}_3 + {}^2D_{24} {}^2\dot{\epsilon}_4 + {}^2D_{25} {}^2\dot{\epsilon}_5 + {}^2D_{26} {}^2\dot{\epsilon}_6 \quad (2.71)$$

Скориставшись рівнянням (2.69) в (2.70) і використовуючи (2.62) - (2.64), ми виключаємо деформації ${}^2\dot{\epsilon}_2$, ${}^2\dot{\epsilon}_4$ і ${}^2\dot{\epsilon}_6$ та отримуємо:

$${}^1\dot{\sigma}_2 = {}^1D_{21} \dot{\epsilon}_1^* + {}^1D_{22} \dot{\epsilon}_2 + {}^1D_{23} \dot{\epsilon}_3^* + {}^1D_{24} \dot{\epsilon}_4 + {}^1D_{25} \dot{\epsilon}_5^* + {}^1D_{26} \dot{\epsilon}_6 \quad (2.72)$$

$$\begin{aligned} {}^2\dot{\sigma}_2 = & {}^2D_{21} \dot{\epsilon}_1^* + {}^2D_{22} t_\alpha \dot{\epsilon}_2^* - {}^2D_{22} t_b \dot{\epsilon}_2 + {}^2D_{23} \dot{\epsilon}_3^* + {}^2D_{24} t_\alpha \dot{\epsilon}_4^* - {}^2D_{24} t_b \dot{\epsilon}_4 + \\ & + {}^2D_{25} \dot{\epsilon}_5^* + {}^2D_{26} t_\alpha \dot{\epsilon}_6^* - {}^2D_{26} t_b \dot{\epsilon}_6 \end{aligned} \quad (2.73)$$

де введені позначення $t_\alpha = (t_1 + t_2)/t_2$ и $t_b = t_1/t_2$. Використовуючи рівняння (2.46), ми можемо відняти друге рівняння з першого, щоб виключити ${}^1\dot{\sigma}_2$ і ${}^2\dot{\sigma}_2$, та тоді отримаємо:

$${}^1a \dot{\epsilon}_1^* = {}^1b \dot{\epsilon}^* \quad (2.74)$$

де

$$\begin{aligned} {}^1\alpha &= \begin{bmatrix} {}^1D_{21} + {}^2D_{22} t_b & {}^1D_{24} + {}^2D_{24} t_b & {}^1D_{26} + {}^2D_{26} t_b \end{bmatrix}; \\ \hat{{}^1\dot{\epsilon}} &= \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_2 & \dot{\epsilon}_4 & \dot{\epsilon}_6 \end{bmatrix}; \\ {}^1b &= \begin{bmatrix} {}^2D_{21} - {}^1D_{21} & {}^2D_{22} t_\alpha & {}^2D_{23} - {}^1D_{23} & {}^2D_{24} t_\alpha & {}^2D_{25} - {}^1D_{25} & {}^2D_{26} t_\alpha \end{bmatrix} \\ \dot{\epsilon}^* &= \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_1^* & \dot{\epsilon}_2^* & \dot{\epsilon}_3^* & \dot{\epsilon}_4^* & \dot{\epsilon}_5^* & \dot{\epsilon}_6^* \end{bmatrix}^T. \end{aligned}$$

Результат можна записати в наступному вигляді:

$$\begin{bmatrix} {}^1a \\ {}^2a \\ {}^3a \end{bmatrix} \hat{{}^1\dot{\epsilon}} = \begin{bmatrix} {}^1b \\ {}^2b \\ {}^3b \end{bmatrix} \dot{\epsilon}^* \quad ; \quad (2.60)$$

або з очевидними позначеннями приходимо до виразу

$$A \overset{\wedge}{\epsilon} = B \overset{\cdot}{\epsilon}^* \quad , \quad (2.61)$$

Явним видом матриць А і В є

$$A = \begin{bmatrix} {}^1D_{22} + {}^2D_{22}t_b & {}^1D_{24} + {}^2D_{24}t_b & {}^1D_{26} + {}^2D_{26}t_b \\ {}^1D_{42} + {}^2D_{42}t_b & {}^1D_{44} + {}^2D_{44}t_b & {}^1D_{46} + {}^2D_{46}t_b \\ {}^1D_{62} + {}^2D_{62}t_b & {}^1D_{64} + {}^2D_{64}t_b & {}^1D_{66} + {}^2D_{66}t_b \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

$$B = \begin{bmatrix} {}^2D_{21} - {}^1D_{21} & {}^2D_{22}t_\alpha & {}^2D_{23} - {}^1D_{23} & {}^2D_{24}t_\alpha & {}^2D_{25} - {}^1D_{25} & {}^2D_{26}t_\alpha \\ {}^2D_{41} - {}^1D_{41} & {}^2D_{42}t_\alpha & {}^2D_{43} - {}^1D_{43} & {}^2D_{44}t_\alpha & {}^2D_{45} - {}^1D_{45} & {}^2D_{46}t_\alpha \\ {}^2D_{61} - {}^1D_{61} & {}^2D_{62}t_\alpha & {}^2D_{63} - {}^1D_{63} & {}^2D_{64}t_\alpha & {}^2D_{65} - {}^1D_{65} & {}^2D_{66}t_\alpha \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

Рішення рівняння (2.61) знаходиться шляхом інверсії А і виходить розв'язання:

$$\overset{\wedge}{\epsilon} = A^{-1} B \overset{\cdot}{\epsilon}^* \quad (2.64)$$

Для випадку, коли жорсткості матеріалу 1D и 2D є ортотропними, загальний випадок зводиться до трохи більш зручного виразу:

$$\begin{bmatrix} \frac{{}^2D_{21} - {}^1D_{21}}{{}^1D_{22} + {}^2D_{22}t_b} & \frac{{}^2D_{22}t_\alpha}{{}^1D_{22} + {}^2D_{22}t_b} & \frac{{}^2D_{23} - {}^1D_{23}}{{}^1D_{22} + {}^2D_{22}t_b} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{{}^2D_{44}t_\alpha}{{}^1D_{44} + {}^2D_{44}t_b} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{{}^2D_{66}t_\alpha}{{}^1D_{66} + {}^2D_{66}t_b} \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

Вищенаведений метод розкладання деформації еквівалентний застосуванню циклічних граничних умов до частини сполучної лінії в нескінченній області $dx \cdot dy$ і в припущенні, що напруження і деформації повинні бути постійними в кожному шарі. Результуючі деформаційні стани еквівалентні отриманим для двоелементної сітки (з застосованими циклічними граничними умовами). Номінальна деформація зсуву гомогенізованого матеріалу розкладається на зсувні деформації протилежних знаків в двох шарах. Щоб використовувати описану вище схему розкладання

для загального зростаючого рішення для кожного збільшення (зростання) необхідно виконувати не тільки розкладання деформації і напруження, а й обчислювати тангенціальні матриці жорсткості матеріалів.

Як правило, при реалізації скінченних елементів при заданих усереднених деформаціях обчислити нову гомогенізовану матрицю жорсткості і відповідні напруження. Спочатку ми використовуємо рівняння (2.61) для розрахунку шаруватих деформацій для шести одноосових, пов'язаних швидкостей деформації, використовуючи останню відому оцінку тангенціальної матриці жорсткості. Після цього рівняння (2.44) використовується для обчислення відповідних швидкостей напружень у відповідних шарах, і далі обчислюються швидкості напружень в гомогенізованому матеріалі, використовуючи рівняння (2.46) і (2.51) - (2.53). Вектор, утворений з шістьма гомогенізованими швидкостями напружень, поділеними на компонент деформації, дорівнює стовпцям нової оцінки тангенціальної матриці жорсткості.

Висновки:

1. На підставі структурного аналізу LVL бруса як шаруватого матеріалу доведена необхідність розгляду LVL бруса як ортотропного матеріалу через шарувату структуру розташування шпону. Можливо використовувати ортотропну модель пружних властивостей матеріалу при моделюванні у програмних комплексах з застосуванням методів скінченних елементів (МСЕ).
2. При виконанні чисельних досліджень LVL бруса із застосуванням МСЕ необхідно використовувати три модуля пружності, три модуля зсуву та коефіцієнти Пуассона, які відповідають трьом осям пружної симетрії матеріалу ортотропного тіла як окремому випадку анізотропії.
3. Для спрощеного аналізу міцності та жорсткості LVL бруса запропоновано застосування розрахунків напруженого стану шпону за елементарним шаром.

4. Зазначено особливості роботи клейового шва для вклеєних стержнів, де товщина клейового шару сягає 3 мм, з урахуванням теорії пластичності малих деформацій з розподілом загальної деформації на пружню та пластичну.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ЛВЛ БРУСУ І ВКЛЕЄНИХ СТЕРЖНІВ

3.1 Аналіз існуючих зразків і даних експериментів LVL Л при стисненні під різними кутами

Відсутність показників міцності при стисненні під різними кутами в ряді технічних протоколів і звітах про випробуванні LVL бруса виробництва Ultralam [119, 53, 13, 72, 68] створило передумови для виконання досліджень, вкрай необхідних при проектуванні вузлів суцільних і наскрізних конструкцій, де елементи конструкції навантажені під різними кутами до напрямку волокон. Подібні дослідження для виробників LVL бруса інших компаній, таких як Kerto, CHH hySPAN, Nelson Pine, і ін. виконані зарубіжними колегами [49, 50].

Величини міцності при навантаженні під різними кутами до волокон і величини модулів пружності, а також інших пружних характеристик (модуль зсуву і коефіцієнт Пуассона), необхідні для виконання автоматизованих розрахунків вузлів при моделюванні об'ємними кінцевими елементами.

Шпоновий брус LVL, як і фанера, має яскраво виражену анізотропну структуру, але на відміну від фанери, шпоновий брус має крім схеми зі взаємно перпендикулярним розташуванням шпон, ще дві схеми: з односпрямованим шпоном і з співвідношенням односпрямованого до поперечного 1: 5. Структурна особливість LVL повинна враховуватися не тільки в кількісних показниках міцності під різними кутами, а й в якісній оцінці характеру руйнування. Поведінка LVL при руйнуванні в різних постановках дає можливість прийняти правильні рішення для виконання посилення з'єднань або перевантажених частин конструкцій для виключення, по можливості, їх крихкого руйнування і підвищення несучої здатності

конструкції. Так звані «проектні посилення» елементів конструкцій і вузлових нагельних з'єднань виконуються на стадії проектного виготовлення конструкції містяться в нормах Австрії ÖNORM B EN 1995-1-1 діє до: 2015 [109] і Німеччини DIN 1052: 2008 [75] або DIN EN 1995-1 -1 / NA-2013 [74].

Для виконання випробувань LVL бруса на стиск під різними кутами були обрані зразки кубічної форми. Ці досліді є продовженням багаторічної роботи проф. Фурсова В.В. щодо модуля об'ємної деформації [43-45], а також міцності при стисненні клеєної деревини під різними кутами [46, 47] з урахуванням масштабного фактора [48]. Дані зразки відрізняються від розмірів зразків, необхідних для цільної деревини, згідно випробувань за європейським стандартом EN 408, розміри яких становлять $45 \times 70 \times 90$ мм, а згідно зі стандартом EN 14374 [82], параметри поперечного перерізу повинні бути 45×45 мм. Висота перерізу не вказується, але, наприклад, в технічному звіті Штудгартського університету по випробуванню LVL бруса компанії Ultralam [111] висота перетину зразків була прийнята 135 мм. Для клеєної деревини згідно EN 408 площа навантажувальної поверхні зразка повинна становити не менше 25000 мм^2 , при цьому одна зі сторін не менше 100 мм, а висота повинна бути 200 мм. Американський стандарт ASTM 143-94: 200 [55] вказує наступні розміри зразків двох типів для цільної деревини: $50 \times 50 \times 200$ мм і $25 \times 25 \times 100$ мм, див. рис. 3.1.

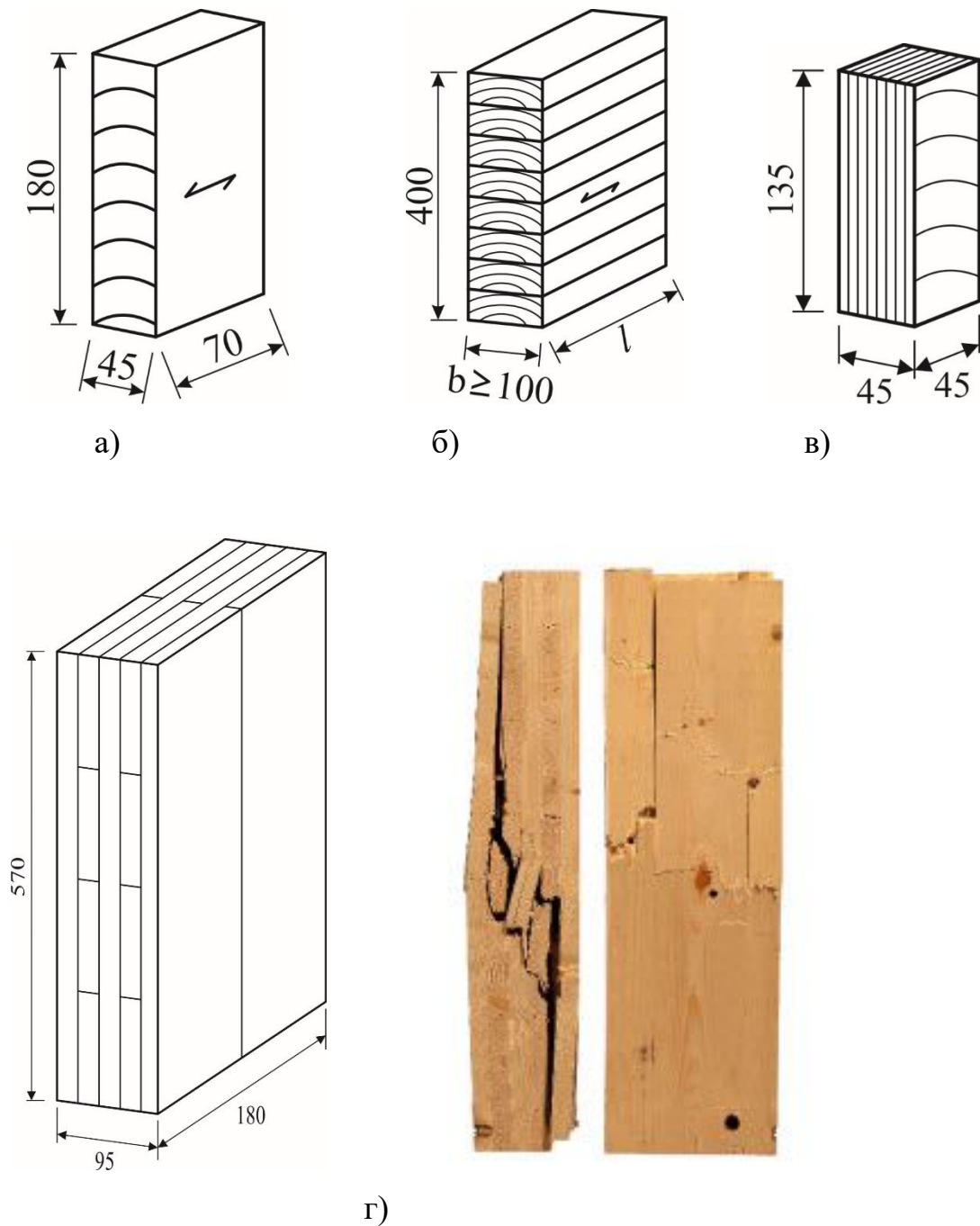


Рис. 3.1 Розміри зразків при стисканні вздовж волокон: а) цільна деревина; б) клеєна деревина; в) LVL брус; г) поперечна клеєна деревина (ПКД) [67]

Останні дослідження міцності LVL при стисненні під кутами були виконані австрійськими дослідниками шляхом навантаження стінок отворів нагелями. Зміна кута відносно розташування волокон до осі нагеля виконувалось шляхом повороту зразків на спеціальному обертовому стенді при оцінці міцності різного типу нагельних з'єднань в LVL брусі [62-64].

Пружні характеристики LVL бруса визначалися в даній роботі для точної оцінки міцності з'єднань LVL бруса при об'ємному скінчено-елементному моделюванні з'єднань на вклеєних стрижнях в аналітичному розрахунково-теоретичному комплексі, розглянутому в інших розділах. Характеристичні значення характеристик міцності і пружних характеристик, зазначені в протоколах випробувань і технічних звітах різних лабораторій [8, 53, 68, 111, 119,] мають дещо відмінні величини, які залежать від багатьох факторів. Об'єктивна оцінка міцності з'єднання можлива тільки при безпосередньому виконанні випробувань деревини, використовуваної в даному з'єднанні конструкції.

Встановлені характеристики міцності при стиску під кутом до нахилу волокон дозволяють якісно оцінити характер анізотропії матеріалу в одній з його робочих площин. При цьому важливим аспектом є характер руйнування зразків і їх поведінку до руйнування для розробки методів посилення елементів конструкцій і їх вузлів. Кутова передача навантаження на елементи дерев'яних конструкцій характеризується тим, що при зміні кута дії навантаження щодо нахилу волокон змінюється вид напруженого стану, а саме стиск вздовж волокон, сколювання і зминання або стиск поперек волокон. Сколювання, як правило, відбувається при кутах нахилу від 15° до 75° і характеризується крихким руйнуванням, вкрай небажаним для дерев'яних конструкцій. Наявність поперечних шарів шпону в деяких типах ЛВЛ бруса збільшує міцність при сколюванні і робить руйнування більш в'язким, при цьому виконуючи роль армуючого шару, хоча тільки в перпендикулярному напрямку.

Статичні випробування всіх зразків проводилося в 3 етапи:

- 1) пробне випробування двох зразків у кожній серії з доведенням до руйнування з метою оцінки їх несучої здатності і встановлення кроку навантаження;

- 2) випробування зразків ступінчастим вантаженням до рівня 35 - 40% від встановленої на першому етапі руйнівного навантаження. На цьому етапі

проводилося тензометрування, після чого зразки поступово розвантажувалися з кроком рівним навантаженню;

3) випробовувані зразки доводилися до руйнування, при цьому оцінювався його характер і особливості, шляхом фіксації тріщин, їх кількості, розташування.

Всі етапи навантажень супроводжувалися розвантаженням, фіксуючи показники датчиків в навантаженому і ненавантаженому станах, згідно з програмою проведення експерименту. При виконанні випробувань фіксувалася температура всередині лабораторії, відносна вологість повітря і вологість зразків. На підставі вищевикладеного, пропонується наступний план експериментальних досліджень:

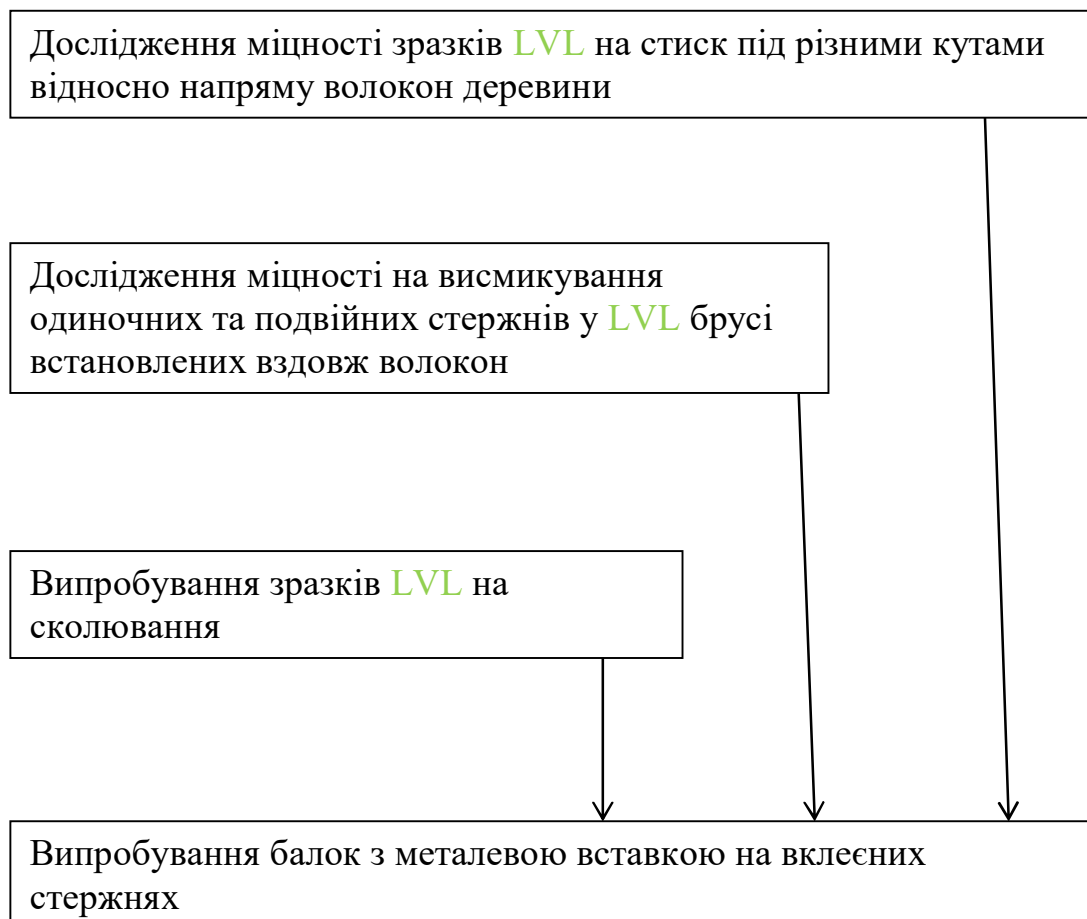


Рис. 3.2 План-схема експериментальних досліджень.

3.1.1 Методика проведення експериментальних досліджень

У лабораторії залізобетонних і кам'яних конструкцій ХНУБА вивчення анізотропії цільної і клеєної деревини проводяться більше 30 років, а в період з 2014 по 2016 рік були виконані комплексні випробування шпонового бруса LVL типу R (з односпрямованим шпоном) торгової марки Ultralam при різних видах напружених станів, у тому числі випробування з'єднань на вклеєно стержнях, встановлених уздовж волокон [42].

Зразки мали кубічну форму з розміром грані 75 мм і навантажувались як показано на схемі (рис. 3.2). При стиску зразків поперек волокон по пласті руйнування у вигляді розколювання або розшарувань не спостерігалось. За точку руйнування приймалася швидка зміна деформацій при наростанні навантаження. Результати випробувань зразків приведені до вологості 12%. Для перерахунку показників механічних властивостей до стандартної вологості була використана формула:

$$B_{12}=B_w(1+\alpha(W-12)) \quad (3.1)$$

де B_{12} – показник даної властивості матеріалу при вологості 12%;

B_w – показник якості при вологості 12%;

α – поправочний коефіцієнт на вологість, рівний 0,04 при стисненні і вигині і 0,05 при розтягуванні.

На кожній грані були встановлені датчики активного опору, що дозволяють виконати оцінку не тільки міцності, а й характер зміни пружних характеристик LVL типу R, які замірялися на ділянці навантаження від 0,1 до 0,4 від руйнівного навантаження $F_{\max}$, як цього вимагає стандарт EN 408 [83] із зазначеною швидкістю навантаження зразків. Всі зразки випилювалися з LVL бруса тієї ж заводської партії, що і балкові елементи, які були випробувані в подальшому. Проведення випробувань зразків виконувалося з урахуванням досвіду виконання аналогічних випробувань зразків з цільної і клеєної деревини, при цьому контролювалося якість поверхні зразків,

черговість навантаження граней і візуальний контроль зразків на предмет сколювання крайніх шарів шпону через неякісне розпилювання.

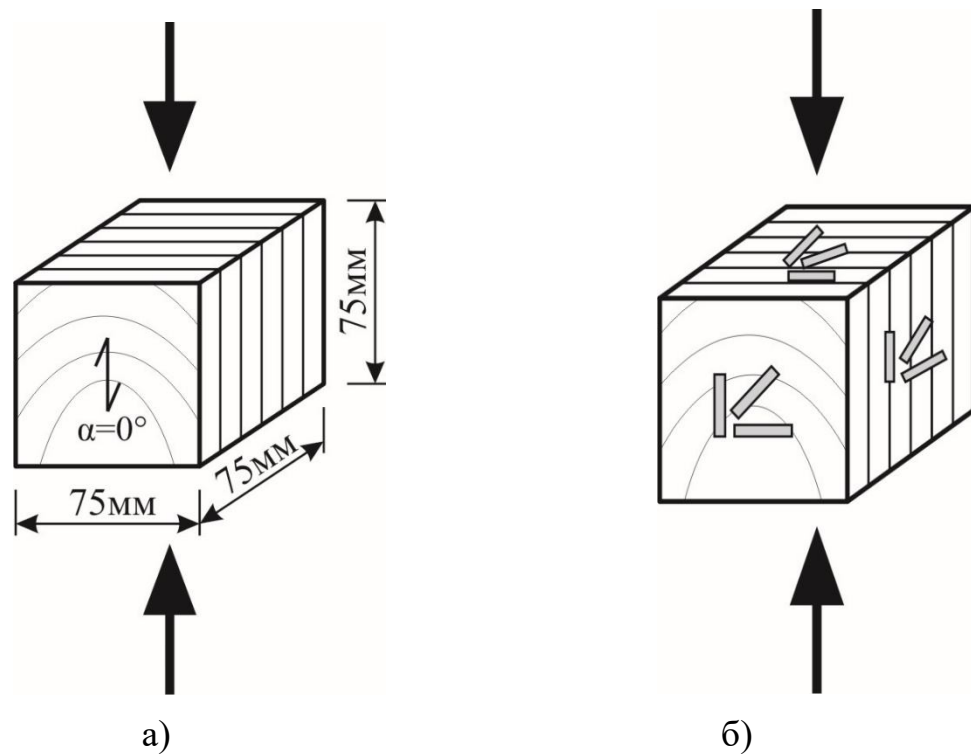
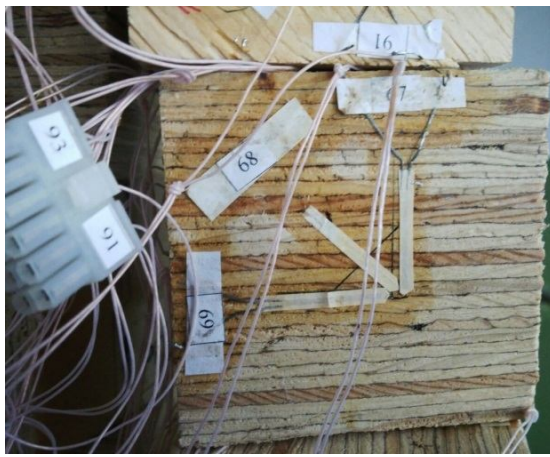


Рис. 3.2 Схема навантаження зразків і розміщення датчиків при стисненні під кутами: а) уздовж волокон, $\alpha = 0^\circ$; б) схема розташування датчиків

Для вимірювання величини деформації при випробуванні деревини використовувалися як вітчизняні датчики на паперовій основі (рис. 3.3-а), так і датчики японської компанії "TML Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd." марки FP-20-11 на поліамідної основі (рис. 3.3б). База датчиків 20мм з провідникові 110 Ом. Встановлювалися датчики за допомогою клейової системи марки CN для даного типу датчиків (CN cyanoacrylate adhesive), запропонованої виробником датчиків.



а)



б)

Рис. 3.3 Датчики активного опору на зразках з LVL бруса: а) датчики на паперовій основі; б) датчики на поліамідній основі

При моделюванні зразків до уваги були прийняті наступні критерії подібності: геометричні і температурно-вологісні подібності. Також дотримувалася кінетична подібність, хоча швидкість навантаження зразків була однаковою, і час руйнування всіх серій зразків знаходилося в заданому допустимому інтервалі. Вони забезпечувалися умовами випробувального стенду і витримкою зразків у лабораторних умовах протягом двох місяців. ЛВЛ брус поставляється з заводу в спеціальних пакувальних пакетах, які забезпечують постійну вологість матеріалу і захист від ультрафіолетових променів. Випробуванню були піддані 6 груп зразків (5 кутів нахилу волокон деревини в зразках по межі і одна група зразків поперек волокон по пласті). Вплив неоднорідностей, характерних для цільної і клеєної деревини, на розподіл напружень від прикладеного зовнішнього навантаження більш рівномірно, як і розподіл міцностей. Сучки і інші неоднорідності деревини в ЛВЛ брусі присутні, але розосереджені, ніж та забезпечена однорідність матеріалу, яка спостерігається в результатах міцних показників отриманих при випробуваннях.

Обробка показників тензометрування здійснювалася за рекомендаціями проф. Є.К. Ашкеназі [1-3]:

$$\sigma_x = \frac{E_x(\varepsilon_x + \mu_{yx}\varepsilon_y)}{1 - \mu_{xy}\mu_{yx}} \quad (3.2)$$

$$\sigma_y = \frac{E_y(\varepsilon_y + \mu_{xy}\varepsilon_x)}{1 - \mu_{xy}\mu_{yx}} \quad (3.3)$$

$$\tau_{xy} = G_{xy}\gamma_{xy} \quad (3.4)$$

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{45} - \varepsilon_x - \varepsilon_y \quad (3.5)$$

де $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{45}$, - відповідно показання розетки індикаторів в напрямку волокон – x, поперек волокон – y, і під кутом 45° – показання діагонального датчика.

Обробка результатів досліджень і їх аналіз виконувався за допомогою програми Microsoft Excel.

Існуючі дослідження міцності LVL бруса і його пружних характеристик, як правило, обмежуються визначенням двох модулів пружності і одного модуля зсуву. На жаль, коефіцієнт Пуассона не використовується в розрахунках дерев'яних конструкцій, в зв'язку з чим його величина рідко зустрічається в технічних звітах виконаних випробувань. Також існує складність в методах його визначення та встановлення точного зв'язку з величинами модулів пружності щодо осей пружної симетрії матеріалу: $\mu_{ik} \cdot E_k = E_i \cdot \mu_{ki}$. Наприклад, величини модулів пружності, які є в СНиП II-25-80 [14] і рівні 10 000 МПа і 400 МПа, а також коефіцієнти Пуассона, рівні 0,5 і 0,02, якраз і підтверджують вимогу про виконання співвідношень, обов'язкових для транстропного матеріалу, розглянутого в даному випадку.

Найчастіше навіть при використанні розрахункових комплексів, величина коефіцієнта Пуассона автоматично визначається після введення модулів пружності.

Важливість пружних характеристик LVL бруса, в тому числі і коефіцієнтів Пуассона, важлива не тільки для скінчено-елементного аналізу міцності вузлів і подальшого порівняння з експериментальними даними з метою отримання точної інженерної методики розрахунку стосовно ЛВЛ

брусу, але і для отримання даних про поперечних деформаціях в умовах складного напруженого стану. Подібні пружні характеристики представляються у вигляді модулів об'ємної деформації і вкрай необхідні при розгляді роботи з'єднань з позиції кріпильних циліндричних нагелів.

3.1.2 Характеристичні і нормативні показники міцності деревини

Механічні і пружні характеристики деревних матеріалів при різних видах напружених станів є основними параметрами, що дозволяють виконати оцінку міцності конструкції і її деформативності. Методика визначення характеристичних або нормативних значень міцності значно відрізняється від методик, пропонованих вітчизняними нормами проектування. Європейські норми певною мірою ускладнюють ситуацію, вводячи диференціацію фізичних і пружних параметрів, використовуючи поняття «середнього», «характеристичного» і «5%-го» значення. Також наголошено на диференціацію величин пружних характеристик при різних видах напружених станів, чого старі вітчизняні норми [14] вважали за краще не підкреслювати, щоб не ускладнювати інженерні підходи при розрахунку дерев'яних конструкцій з урахуванням транстропних властивостей матеріалу.

У документі «Посібник до СНиП 2-25-80» [25] перехід від значень тимчасового опору до розрахункового опору визначався за такою формулою:

$$R = (R^H/\gamma_m)m_{дл}, \quad (3.6)$$

де γ_m – коефіцієнт надійності за матеріалом, що враховує відхилення в бік менших значень міцності матеріалу з більш високою забезпеченістю по відношенню до нормативного опору.

$$R^H/\gamma_m = R/m_{дл} = \bar{R}, \quad (3.7)$$

де $\bar{R}$ – короткочасний розрахунковий опір.

Із умови:

$$R^H = R_{вр}(1 - \eta_n v), \quad (3.8)$$

$$\bar{R} = R_{вр}(1 - \eta v), \quad (3.9)$$

знаходимо

$$\gamma_m \geq (1 - \eta_n v) / (1 - \eta v), \quad (3.10)$$

де $R_{вр}$ – середнє значення тимчасового опору при стандартних випробуваннях матеріалу;

η_n и η – множники, що залежать від прийнятого рівня забезпеченості (довірчої ймовірності) і виду функції щільності розподілу відповідно для нормативного та розрахункового опорів;

v – коефіцієнт варіації.

Для нормального розподілу при забезпеченості $P = 0,95$, $\eta_n = 1,65$ і при $P = 0,99$, $\eta = 2,33$. Коефіцієнт варіації міцності деревини v залежить від виду напруженого стану і сорту матеріалу; його величина коливається в межах 0,15 - 0,25.

Згідно Єврокоду-5, розрахункове значення міцності деревини та деревних матеріалів для різних видів напруженого стану визначається за такою формулою:

$$f_{...,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{...,k}}{\gamma_M} \quad (3.11)$$

де $f_{...,d}$ розрахункове значення міцності;

$f_{...,k}$ характеристичне значення міцності (далі m_k);

k_{mod} коефіцієнт перетворення;

γ_M приватний коефіцієнт властивостей матеріалу.

Характеристичні значення міцності визначаються відповідно до формул і вимог, зазначеним в стандарті, що нещодавно було перевидано EN 14358:2006 (Calculation of characteristics 5-percentile value and acceptance criteria for a sample) та заміненим новою редакцією EN 14358 діє до: 2016.

Характеристичні значення міцності деревини та деревних матеріалів визначаються за наступним виразом:

$$m_k = \exp(\bar{y} - k_s s_y) \quad (3.12)$$

де компоненти, що входять до даного виразу, в свою чергу визначаються так:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln m_i \quad (3.13)$$

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln m_i - \bar{y})^2} \quad (3.14)$$

Коефіцієнт k_s визначається по табл. 3.2 документа EN 14358:2006 в залежності від кількості випробуваних зразків:

Таблиця 3.2 – Значення коефіцієнт k_s

Кількість зразків, n	k_s
3	3,15
5	2,46
10	2,10
15	1,99
20	1,93
30	1,87
50	1,81
100	1,76
500	1,71
∞	1,65

Зазначені вище формули (3.12-3.14) показують дещо інший підхід до визначення міцності, ніж рекомендації посібника до СНиП II-25-80 і в роботах [15-17], що і пояснює іншу назву міцнісного показника як

«характеристичне». Середнє значення пружних характеристик вище 5%-го значення приблизно на 30%. Спроби вдосконалення і перегляду методів отримання характеристичних показників міцності при різних видах напружених станів триває, як наприклад, в роботі проф. Бласса Х. Й. [89].

Характеристичні значення міцності згідно з новою редакцією EN 14358 діє до: 2016 або BS EN14358 діє до: 2016 слід визначати по кілька ускладненою методикою, основні вираження якої наведені вище в формулах (3.12-3.14) відповідає логнормальному розподілу. Довірчий рівень $\alpha = 75\%$ приймається при визначенні характеристик міцності, що також рекомендовано в EN 1990. При нормальному розподілі середнє значення і стандартне відхилення s_y розраховуються за формулами:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \quad (3.15)$$

$$s_y = \max \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{y})^2}, 0,05\bar{y} \right\} \quad (3.16)$$

Для логнормального розподілу результатів випробувань, стандартне відхилення s_y має бути не менше ніж:

$$\sqrt{\ln(1 + 0,05^2)} \approx 0,05 \quad (3.17)$$

Нова редакція стандарту містить рівняння для визначення 5%-го і 95%-го характеристичного значення міцнісної або пружної характеристики за такими формулами:

- для логнормального розподілу 5%-го значення

$$m_k = \exp(\bar{y} - k_s(n)s_y) \quad (3.18)$$

- для логнормального розподілу 95% -е значення

$$m_k = \exp(\bar{y} + k_s(n)s_y) \quad (3.19)$$

- для нормального розподілу 5% -е значення

$$m_k = \bar{y} - k_s(n)s_y \quad (3.20)$$

- для нормального розподілу 95% -е значення

$$m_k = \bar{y} + k_s(n)s \quad (3.21)$$

де $k_s(n)$ визначається за формулою:

$$k_s(n) = \frac{k_\alpha(n)}{\sqrt{n}} \quad (3.22)$$

або в спрощеному варіанті

$$k_s(n) = \frac{6,5 \cdot n + 6}{3,7n - 3} \quad (3.23)$$

Імовірнісні моделі розподілу для міцності і пружних характеристик при різних видах напружених станів підпорядковуються різним законам розподілу або різним імовірнісним моделям. Нова редакція стандарту EN 14358 діє до: 2016 передбачає необхідність визначення «95% -го» значення показників міцності при аналізі експериментальних даних, чого не було потрібно раніше.

Вкрай важливим аспектом при отриманні міцності і пружних характеристик є не тільки точність проведення експерименту, а й правильна статистична обробка отриманих даних. Сформовані закономірності і правила виконання аналізу експериментальних сьогодні стандартизовані, що дозволяє виконувати об'єктивне порівняння з результатами, отриманими іншими дослідниками і лабораторіями. Значні труднощі і неточності виникають при спробах порівнювання величин міцності, отримані при інших стандартах зразків, інших умовах навантаження і методів визначення характеристичних значень міцності.

3.1.3 Результати експериментальних досліджень зразків з ЛВЛ брусу на стиск під різними кутами

Міцні і пружні характеристики деревини при стисненні під різними кутами мають феноменологічну особливість, яка добре простежується на графіку представленому на рис. 3.4, де криві міцності і криві модуля пружності не збігаються. Ці графіки взяті з таких відомих класичних робіт наступних авторів, як: Р. Niemz [107] див. рис. 3.4а, а також загальний характер кривих згідно наступних робіт (рис. 3.4б) Н. Neuhaus [102], М. Siemers [76], Є. К. Ашкеназі [1], Ю. М. Іванов [18].

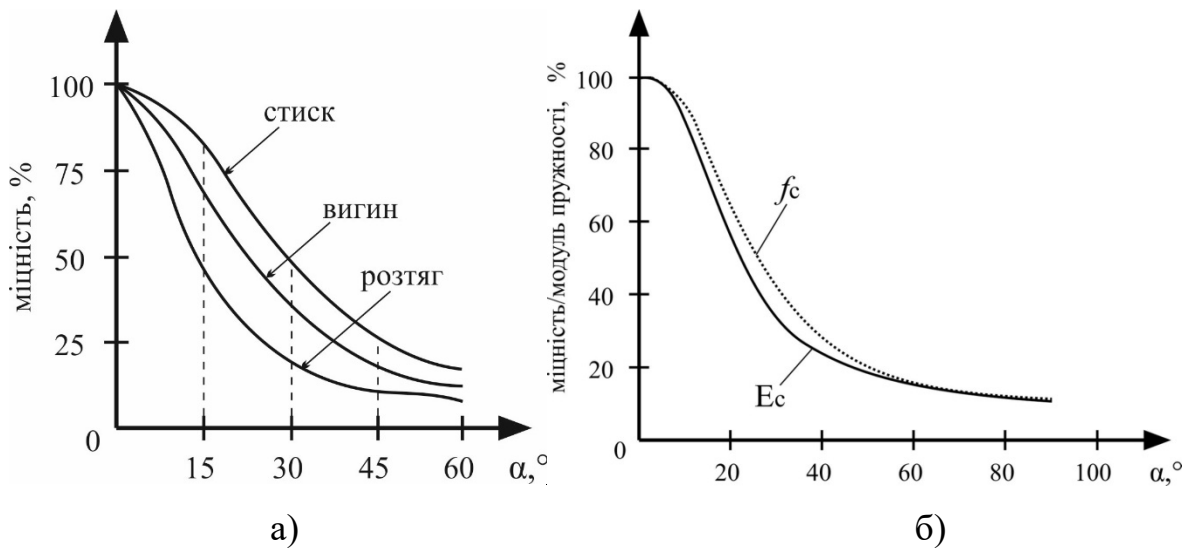


Рис. 3.4 Пружні і міцностні характеристики деревини при стиску в залежності від кута нахилу волокон деревини: а) Р. Niemz [107]; б) загальний характер кривих

Аналіз перерахованих робіт дозволив зробити ряд важливих висновків:

- Р. Niemz (рис. 3.4а) підтвердив досить близькі показники міцності деревини, навантаженої під кутами до волокон для стиснення і розтягування;
- викликають питання щодо даних по вигину (рис. 3.4а), оскільки точних результатів при нахилі волокон більше 15° отримати не вдається. На це вказують численні дослідження Флаксермана [33], а також випробування, проведені в лабораторії ХНУБА в період з 1985-2015 років;

- відхилення модулів пружності E від закону Гука є найбільш істотними від 10° до приблизно 45° . У зв'язку з цим у вітчизняних нормах величина гранично допустимого косою не повинна перевищувати 10° .

При цьому слід зазначити, що вузлових з'єднаннях стропильних систем і ферм, як було встановлено в процесі численних обстежень, тріщини з'являються в основних стрижнях (кроквяні ноги і пояса ферм), де в зоні вузла сполучення модулі пружності E мають знижені значення (передача стискає сили розкосу або підкосу під кутом до волокон деревини основного елемента).

Модуль пружності під кутами визначається за формулою (3.24) запропонованої Möhler (1980) [101]:

$$E_\alpha = \frac{E_{\parallel} \cdot E_{\perp}}{E_{\perp} \cos^3 \alpha + E_{\parallel} \sin^3 \alpha} \quad (3.24)$$

Міцність деревини при розтягуванні під кутами до волокон представлена відомою формулою Ханкінсона (3.25), яка запропонована ще на початку 20-го століття [92] в 1921 р, хоча однією з перших робіт вітчизняних дослідників була робота Флаксермана [33], опублікована в 1931 році.

$$f_\alpha = \frac{f_{\parallel} \cdot f_{\perp}}{f_{\parallel} \sin^2 \alpha + f_{\perp} \cos^2 \alpha} \quad (3.25)$$

де $f_{\parallel}$ і $f_{\perp}$ міцність деревини при розтягуванні вздовж і поперек волокон.

Величини міцності і пружних характеристик випробуваних зразків і їх основні статистичні параметри наведені в таблиці 3.3. Характер руйнування зразків при проведенні випробувань представляв вторинний інтерес, деякі фотографії яких показані на рис. 3.5.

Механічні і пружні характеристики деревини, як правило, показують значний розкид одержуваних величин, який відповідно залежить від виду випробувань або виду напруженого стану. При дослідженні зразків з цільної і клеєної деревини причиною розкиду даних можуть бути неоднорідності структури зразків, вплив яких зведено до мінімуму в LVL брусі

Таблиця 3.3. Результати випробувань зразків LVL бруса на стиск під різними кутами

напрямок волокон	Розмір зразка	Кіл-сть зразків	Міцність			Модуль пружності
			σ МПа	ν %	P %	E МПа
0°	75x75x75	14	61.31	5.88	1.57	26150
30°		7	19.82	12.49	4.72	3525
45°		6	20.34	7.76	3.17	3590
60°		8	14.00	11.57	4.09	3052
90°		6	10.79	5.38	2.20	2165

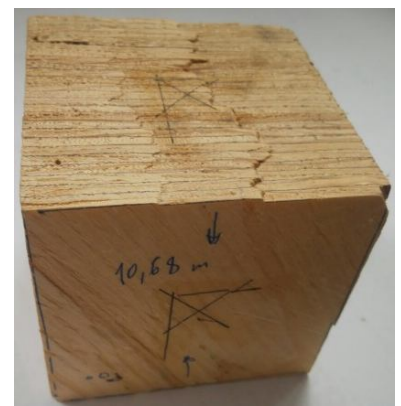
Випробувані зразки характеризувалися в основному такими ознаками, як поздовжні і похилі тріщини, ступеневі руйнування на бічних поверхнях кубів, відколи крайніх шарів шпону і депланація з площини.



а) кут нахилу 30°



б) кут нахилу 45°



в) кут нахилу 60°



г) кут нахилу 0°



д) кут нахилу 0°



е) кут нахилу 90°

Рис. 3.5 Характер руйнування зразків

Дещо несподіваним в результатах випробувань односпрямованого LVL бруса при стисненні під кутами, було зниження показників міцності під кутом 30° в порівнянні з міцністю під кутом 45° , що не характерно для клеєної і цілісної деревини. На рис. 3.6 наведені графіки [46], де розглянуто міцність деревини під кутами і неточності формули СНиП II-25-80 [14] містить « $\sin^3$ » замість « $\sin^2$ » в знаменнику формули, згідно з якою визначається міцність при зім'ятті під різними кутами.

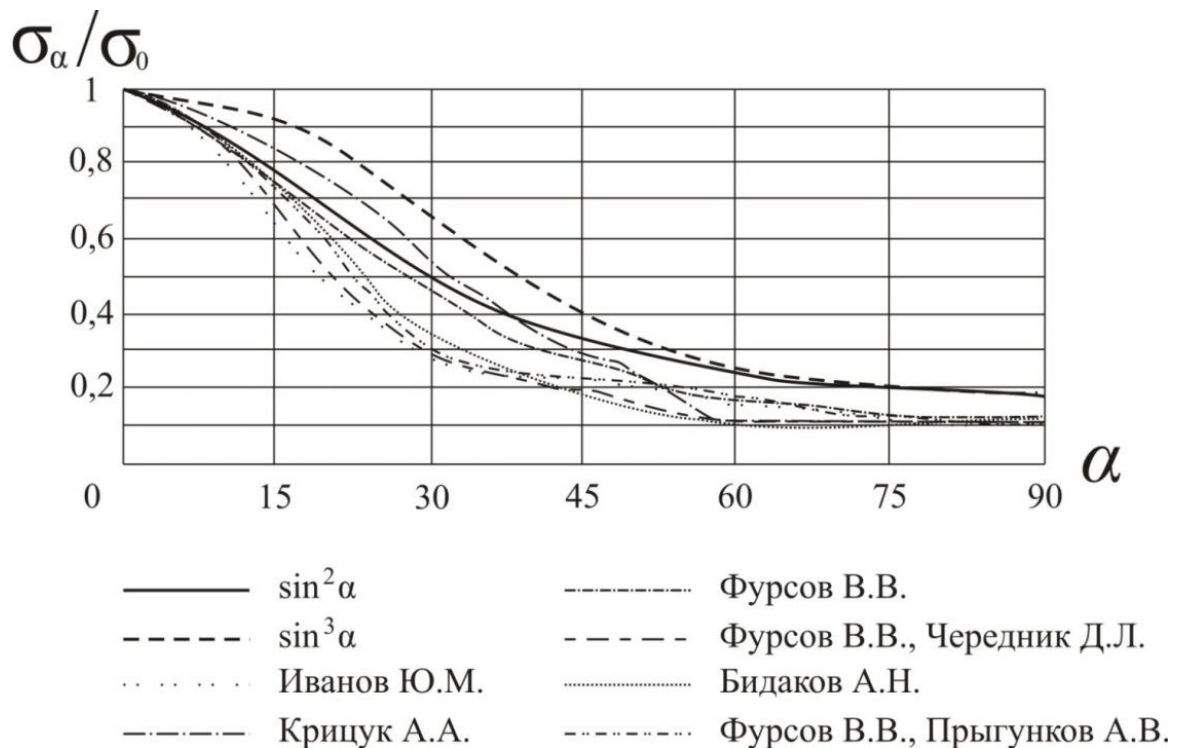


Рис. 3.6 Міцність деревини при стисненні під кутом до волокон [46]

Формула Ханкінсона (3.25) і її графічне відображення наведене з робіт Штуссі [126, 127] на рис. 3.7, може бути застосовна для розрахунків міцності LVL при стисненні під кутами, оскільки величина відхилення кривої міцності відповідно до виконаних випробувань «а» має незначне відхилення від кривої, отриманої за формулою Ханкінсона [92], в порівнянні з величиною «б», отриманої для цільної і клеєної деревини, рис. 3.7.

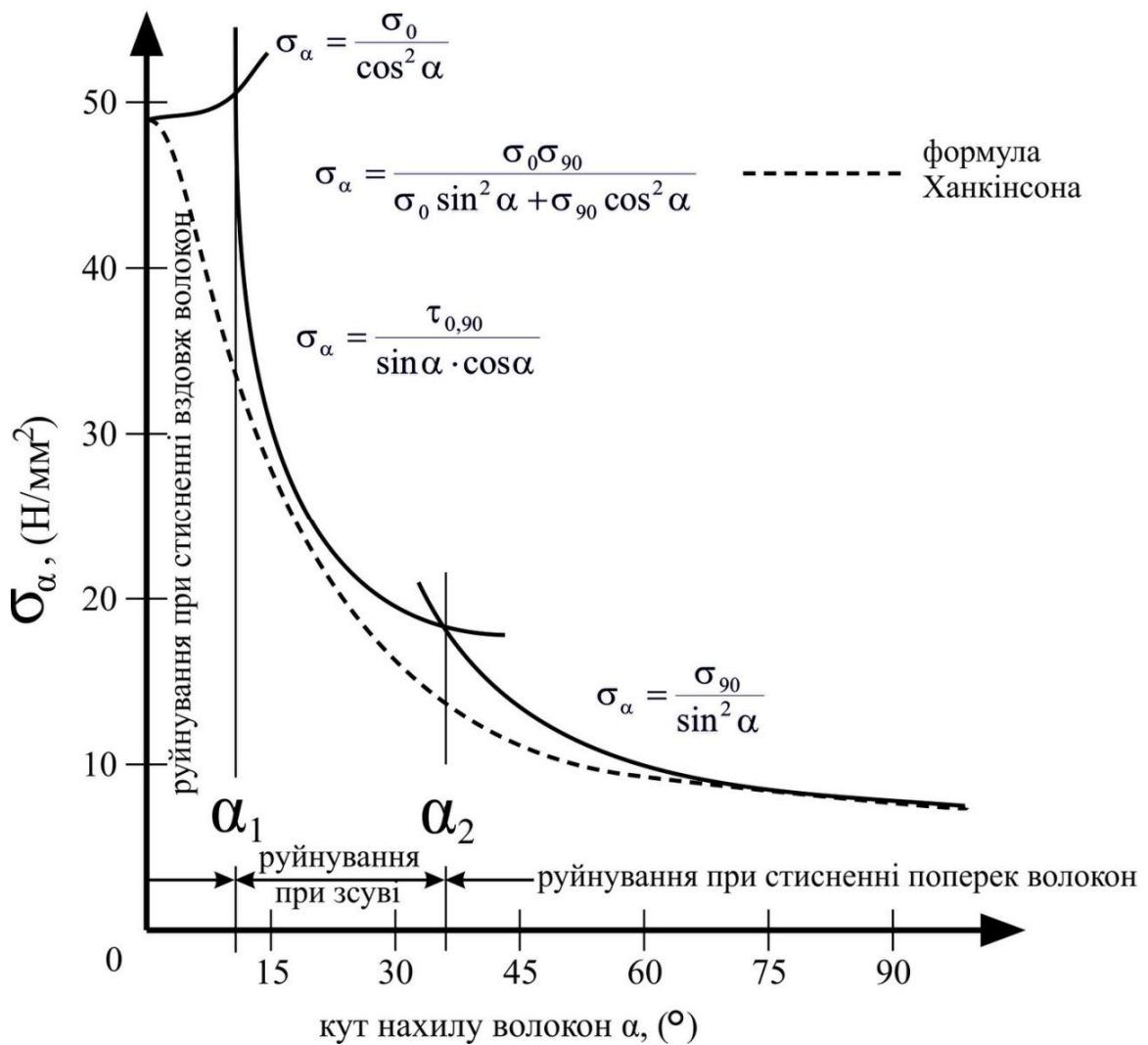


Рис. 3.7 Залежність міцності деревини від кута нахилу волокон в зразку при стисканні (Stussi 1946, 1949 [126, 127]).

В результаті експериментальних досліджень пружних характеристик, отриманих при виконанні компресійних випробувань LVL бруса з напрямком волокон в зразках під різними кутами, була отримана емпірична крива зміни модуля пружності в залежності від кута нахилу волокон. Крива міцності і модуля пружності при стисненні показані на рис. 3.8, де простежується їх подібність з незначними відхиленнями, що справедливо для деревини та матеріалів на її основі.

З огляду на те, що характер руйнування зразків під кутами характеризувався ступінчастим сколюванням не по кордоні одного шпону, а

по суміжних 2-3 верствам шпону, що спостерігається стрибок на графіку можна пояснити структурою матеріалу, яка утворена не тільки технологією різання та пресування матеріалу. Подібне спостереження викликає додатковий інтерес до аналогічних досліджень LVL інших типів, де відбувається чергування односпрямованого шпону з поперечним.

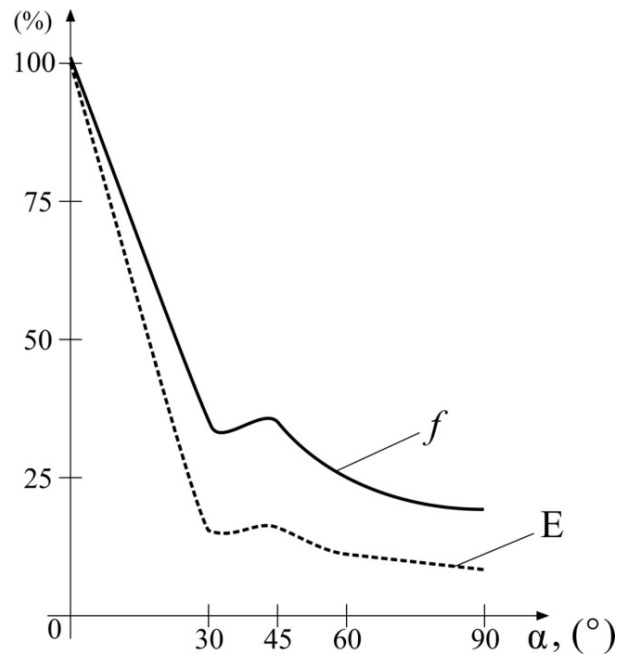


Рис. 3.8 Криві міцності і модуля пружності при стисненні під кутами до волокон

Як правило, поперечні шари шпону знижують пікові частини кривої міцності шляхом перерозподілу напружень в випробовуваних зразках. Додаткові дослідження LVL бруса з односпрямованим шпоном типу R_s (міцніше типу R на 10%) також цікаві і необхідні для оцінки впливу сорту шпону на зміну величини міцності при стисненні під кутами.

3.2 Випробування вклеєних стрижнів на висмикування

У лабораторії залізобетонних і кам'яних конструкцій ХНУБА в 2015-2016 роках були проведені дослідження LVL типу R на статичні навантаження для визначення характеристик міцності і пружних характеристик при стисненні під різними кутами.

Статичні випробування на висмикування вклеєних стрижнів виконувалися із зразків LVL з односпрямованим шпоном марки Ultralam типу R. Перетин стрижнів LVL елементів становила 75×75 мм, а довжина 500 мм. Глибина вклейки стрижнів була прийнята 180 мм з величиною отвори 18 мм. Діаметр одиночних вклеєних стрижнів був прийнятий 14 мм, а діаметр стрижнів, встановлених попарно в кожному торці був прийнятий 16 мм. Висмикування стержнів виконувалося шляхом навантаження елемента з двосторонніми вклеєними стрижнями на рівну глибину вклейки (рис. 3.9). Клас міцності сталі сталевих шпильок 5.8. Зарубіжні колеги використовують клас міцності сталі вклеєних шпильок, як правило, 8.8 або 10.9.

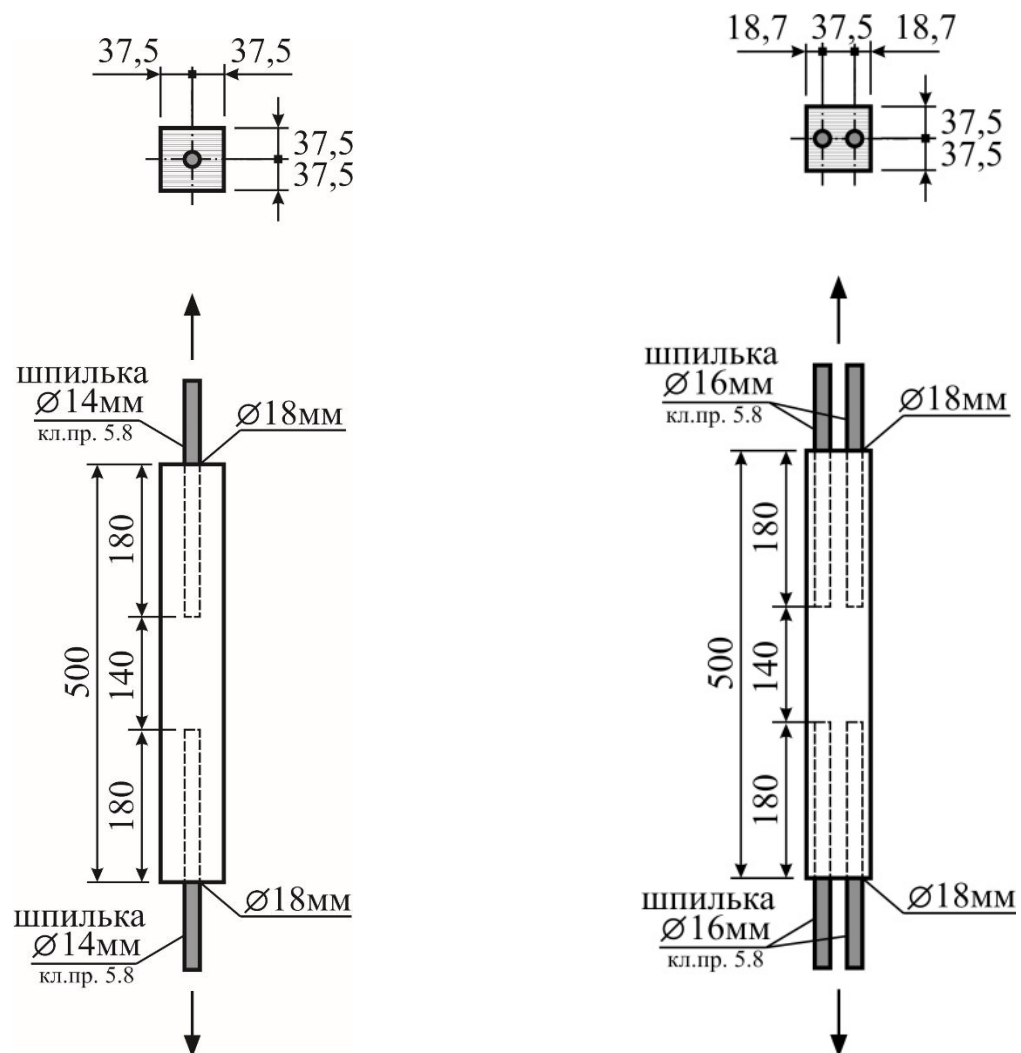


Рис. 3.9 Схема проведення випробування і геометричні параметри зразків

Для вклейки стрижнів використовувався двокомпонентний епоксидний клей на базі смоли ЕД-20. Після затвердіння клею спостерігалася його усадка, яка не перевищувала 2 мм. Застосування добавок-наповнювачів на основі цементного порошку для зниження усадки клею не передбачалося, оскільки діаметр використовуваних клеєно стрижнів невеликий. Максимально допустимий діаметр клеювання стрижнів становить 30 мм.

Прийняті відстані між стрижнями і від центру стрижня до бічних граней елемента в поперечному перерізі менше величин, рекомендованих для клеювання стрижнів в цільну або клеєну деревину, згідно з нормами різних країн: СП 64.13330.2011 (Росія), DIN 1052: 2008-12 (Німеччина), В 1995-1-1 (Австрія). Небагато країн містять вказівки про правила виконання з'єднань на клеєних стержнях і методах їх розрахунку, що проаналізовано в роботі хорватського дослідника Stepinac M. [120].

Випробування стрижнів на висмикування виконувалися відповідно до європейського стандарту EN1382:1999. Швидкість навантаження була постійною і становила 0,5-1,5 мм/хв до руйнування з'єднання. При випробуваннях велика увага приділялася не тільки величиною міцності з'єднання, а й поведінки зразка на всіх етапах навантаження. Всього було випробувано 16 зразків з поодинокими і подвійними клеєно стрижнями. Вологість зразків деревини, якість вклейки стержня і його центрування перевірялися перед виконанням випробувань. Також проводилися окремі випробування сталевих шпильок для перевірки класу міцності стали з заявленими величинами для даного типу стрижнів.

Вказівки щодо відстаней для клеєних стрижнів, встановлених в LVL брусі відсутній, і при експериментальних дослідженнях була прийнята менше, ніж рекомендовані, з огляду на результати попередніх пробних випробувань (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 Відстані між вклеєними стрижнями, встановленими вздовж волокон, згідно з нормативними документами різних країн і в проведених випробуваннях

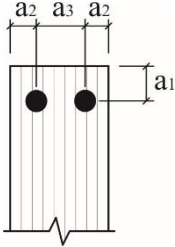
	СП 64.13330.2017 (Россия) [28]	DIN 1052 DIN EN 1995-1-1/NA (Германия) [75]	ÖN B 1995-1-1:2015 (Австрия) [109]	Новая Зеландия [106]	R. Steiger (Швейцария) [124]	Z-9.1-791 [51]	Z-9.1-778 [54]	Експеримент
a1	2d	2,5d	2,5d	2,5d	2,3d	1,75d	1,875d	1,16d (18,5 мм)
a2	2d	2,5d	2,5d	2,5d	2,3d	1,75d	1,875d	1,16d (18,5 мм)
a3	3d	5d	5d	2d	4d	3,5d	3,75d	2,37d (38 мм)

Схема руйнування зразків має типовий крихкий характер, що супроводжується висмикуванням стержня з частиною деревини (рис. 3.10), і розколюванням торців елементів деревини, в які вклеєні сталеві стрижні. Результати випробувань показані в таблиці 3.5 зі схематичними зображеннями руйнування торців кожного зразка.



а)



б)



в)



г)

Рис. 3.10 Схема руйнування зразків: а) по деревині; б) по деревині з розколюванням; в) розрив стержня; г) нерівномірне по деревині

Результат руйнування з'єднання з розривом сталевго стрижня (рис. 3.10в) ще раз доводить ефективність вклеєних стрижнів у якості методу виконання жорстких зіткнень елементів не тільки з клеєної деревини, але і елементів з LVL. На рис. 3.11 показаний графік приросту деформацій при збільшенні навантаження до руйнування деяких вклеєною стрижнів.

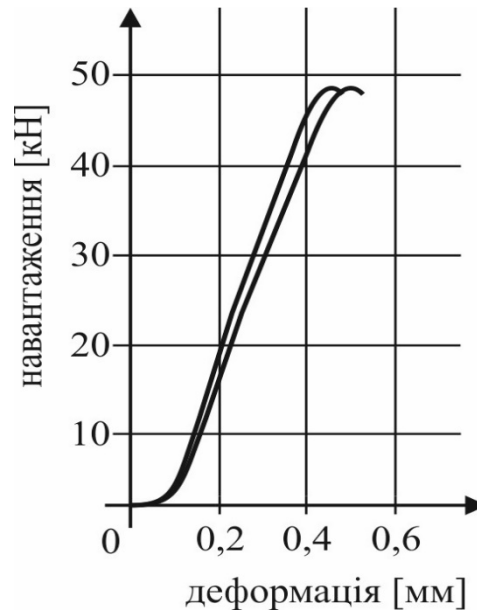


Рис. 3.11 Крива зміни деформації з'єднання в залежності від величини навантаження

Таблиця 3.5 Результати випробувань зразків

Номер зразка	Один стержень			Два стержня		
	Руйнівне навантаження, [кН]	Характер руйнування	Примітки	Руйнівне навантаження, [кН]	Характер руйнування	Примітки
1	58		2 тріщини	85		4 тріщини
2	53		3 тріщини	84,5		4 тріщини
3	62		2 тріщини	72,5		4 тріщини
4	59		4 тріщини	84,5		3 тріщини
5	60		без тріщин	113		2 тріщини
6	55		3 тріщини			
7	56		2 тріщини			
8	60		2 тріщини			
9	68		3 тріщини			
10	63		руйнування сталевго стрижня			
11	62		1 тріщина			

3.3 Експериментальне дослідження міцності LVL бруса при сколюванні

Крихке руйнування при сколюванні як експериментальних зразків, так і елементів конструкцій є небажаним, а іноді і не допустимим видом руйнування. Також в рамках випробувань з визначення міцності з'єднань LVL на вклеєних стрижнях проводилися випробування на сколювання

зразків трьох типів (рис. 3.12) товщиною 75 мм торговельної марки Ultralam тип R з односпрямованим розташуванням шпону деревини хвойних порід. Основні статистичні параметри результатів випробувань трьох серій зразків показані в таблиці 3.6. Необхідність виконання випробувань на сколювання обумовлена механізмом руйнування з'єднань на вклеєно стрижнях, а саме висмикуванням стрижнів внаслідок сколювання деревини навколо стержня. Для аналізу міцності з'єднання необхідні значення тимчасового опору ЛВЛ бруса при сколюванні для подальшого аналізу результатів експериментальних даних і даних, одержуваних при розрахунках методом кінцевих елементів.

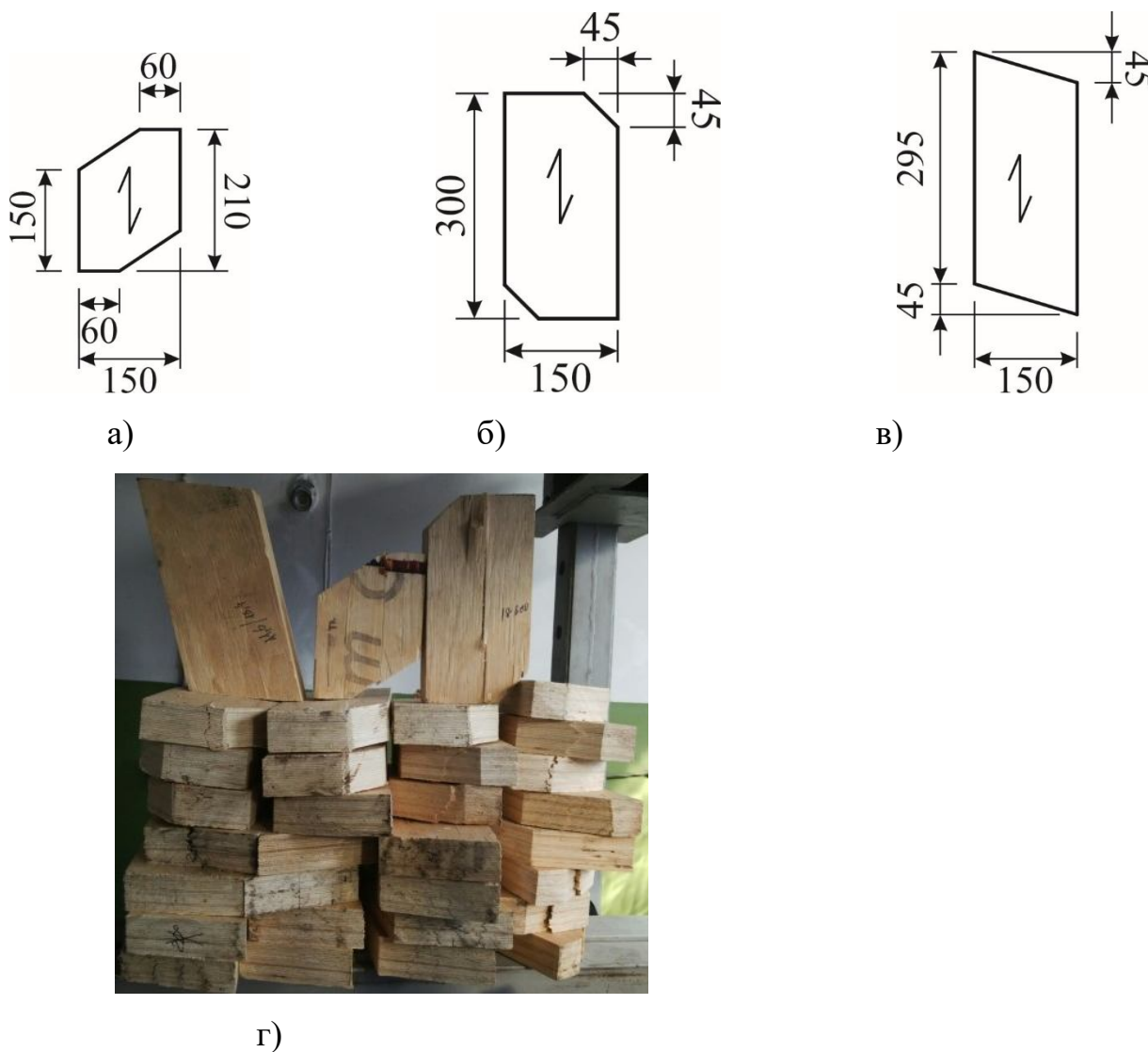


Рис. 3.12 Види і розміри зразків, використаних при випробуваннях:

а) тип А; б) тип Б; в) тип В; г) зразки після руйнування

Навантаження зразків виконувалося відповідно до вимог стандарту EN408:2010 та період навантаження становив інтервал часу 300 ± 120 секунд до руйнування зразка. Характеристичне значення міцності для кожної серії зразків визначалося відповідно до вимог нової редакції стандарту EN14358:2016.

Таблиця 3.6 Результати випробувань серій зразків на сколювання

Серії зразків	Кіл-сть зразків	Мін. значення (Н/мм ²)	Середн. значення (Н/мм ²)	Макс. значення (Н/мм ²)	Стандартне відхилення	Коеф. варіації	Характеристичне значення міцності (Н/мм ²)
тип А	11	3,73	5,15	7,11	1,05	0,2	1,13
тип Б	8	6,81	9,64	11,5	1,77	0,18	6,07
тип В	14	3,62	7,32	13,8	3,09	0,42	3,03

Спостережувані при випробуваннях схеми руйнування зразків мали типовий для даного виду напруженого стану крихкий характер руйнування. Руйнування зразків відбувалося по лінії, практично паралельної напрямку волокон без значних відхилень, оскільки зразки даного типу LVL бруса мали односпрямоване розташування шпону. Яскраво виражене крихке руйнування зразків спостерігалось при високих навантаженнях, і в деяких випадках руйнування супроводжувалося гучним хлопком і, як результат, порушенням структури зовнішніх шарів шпону. Малий кут нахилу зразків типу «В» був прийнятий аналогічно схемі випробувань цільної деревини і ПКД (або CLT) панелей.

3.4 Методика проведення випробувань балок з з'єднанням на вклеєних стернях

У 2016 році були проведені випробування вузлового з'єднання на вклеєних стернях з металевою вставкою, встановленого в середині балки з ЛВЛ бруса. На рис. 3.13 показана схема навантаження балок статичним навантаженням і місця установки вимірювальних пристроїв для визначення деформацій. Деревина балок - LVL брус з односпрямованим шпоном Ultralam

(тип R). Випробування вузла стали ключовим і завершальним логічним етапом циклу досліджень LVL бруса [8, 40], оскільки для повного аналізу роботи вузла були виконані випробування на міцність і пружних характеристик при стисненні під різними кутами, випробування зразків на сколювання і випробування зразків на висмикування поодиноких вклеєних стержнів.

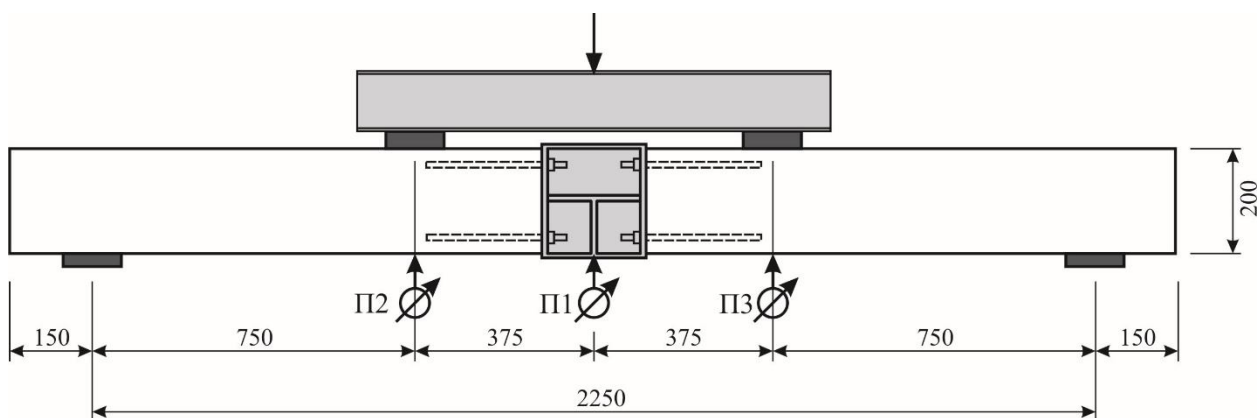


Рис. 3.13 Схема навантаження балок з металевою вставкою і місця установки прогиномірів

Було випробувано 5 балок з поперечним перерізом 75x200 мм, прольотом 2,25 м з вузлом, розташованим в середині балки, де в першому варіанті у верхній і нижній частині були встановлені шпильки М16. Другий тип балок відрізнявся від першого тим, що у верхній частині поперечного перерізу були вклеєні шпильки М10, а в нижній - М16. Також випробовувалися цільні балки без вузлового з'єднання. Клас міцності стали шпильок 5.8. Клейове з'єднання на основі смоли ЕД-20. Глибина клеївки становила 180 мм і діаметр всіх отворів виконувався на 2 мм більше діаметру вклеюється стержня. Відстані між осями стержнів у всіх перетинах були прийняті однакові (рис. 3.14).



а)



б)



в)



г)

Рис. 3.14 Характер руйнування балок з металевою вставкою:

а) загальний вид балки при випробуванні; б) характер руйнування стержнів;
в), г) вид вузла після руйнування

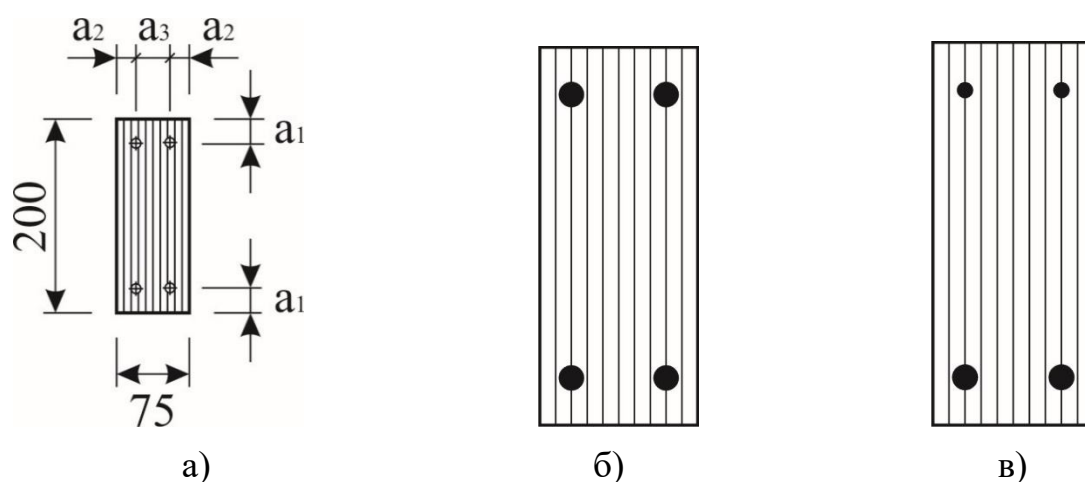


Рис. 3.15 Розташування стержнів в перерізі балки: а) схема розташування стержнів; б) стержні однакового діаметра; в) стержні різного діаметра

Випробування балок проводилося шляхом статичного навантаження їх домкратом 25 т через траверсу, розподіляє навантаження на 2 точки в третинах прольоту, рис. 3.16.

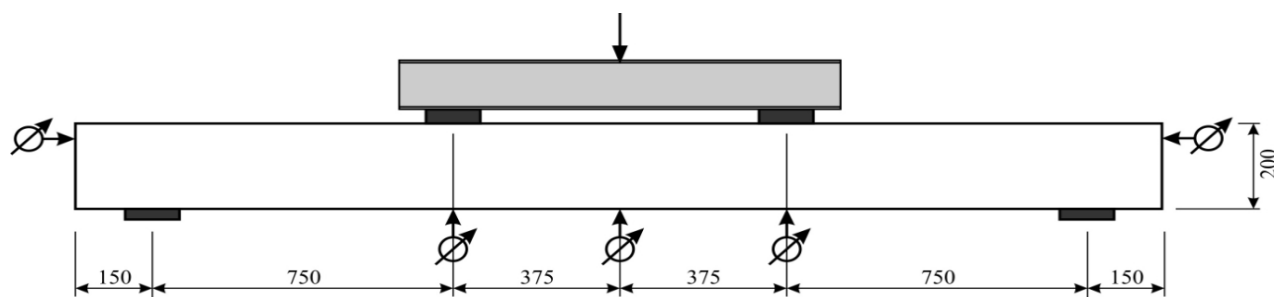


Рис. 3.16 Схема навантаження балок і місця установки вимірних пристроїв

Модель була розкріплена з площини на опорах і в місцях прикладання навантаження. Схема обпирання балки на опори шарнірна. Перед випробуванням кожна балка навантажувалась на 1 т і повністю розвантажувалась, після чого підтягувалися всі гайки в з'єднанні. Крок навантаження 1 т на кожную точку, з витримкою навантаження на кожному кроці 2 хв. Всі балки доводилися до руйнування. Величини переміщень

замірялися на опорах і в прольоті за допомогою індикаторів годинникового типу з ціною поділки 0,001 мм - на опорах і 0,01 мм в прольоті. Температура при випробуванні була + 23-25° С, а вологість ЛВЛ становила 10-11%.

Для вимірювання деформацій застосовувалися індикатори лінійних переміщень годинного типу з точністю 0,01 мм, які встановлювалися не тільки в місцях прикладання навантаження і в середині прольоту, а й в торцях балки біля опор для вимірювання кутових переміщень. Також додатково встановлювалися індикатори годинникового типу з точністю 0,001 мм біля металевої вставки в нижній і верхній зоні, для фіксації контактних деформацій деревини на всіх етапах завантаження.

Програма випробувань балок з металевою вставкою передбачала випробування балки без вставки для оцінки впливу напівжорсткого вузла на вклеєних стержнях на загальну жорсткість балки. Схема навантаження балки і місця установки вимірювальних приладів були прийняті аналогічно випробуванням балок зі вставкою.

Зварна конструкція металевої вставки і товщини пластин, з яких вона складається, показані на рис. 3.17. У верхній частині вузла було передбачено горизонтальне ребро і вертикальне, що підвищує стійкість стінки в стислій зоні.

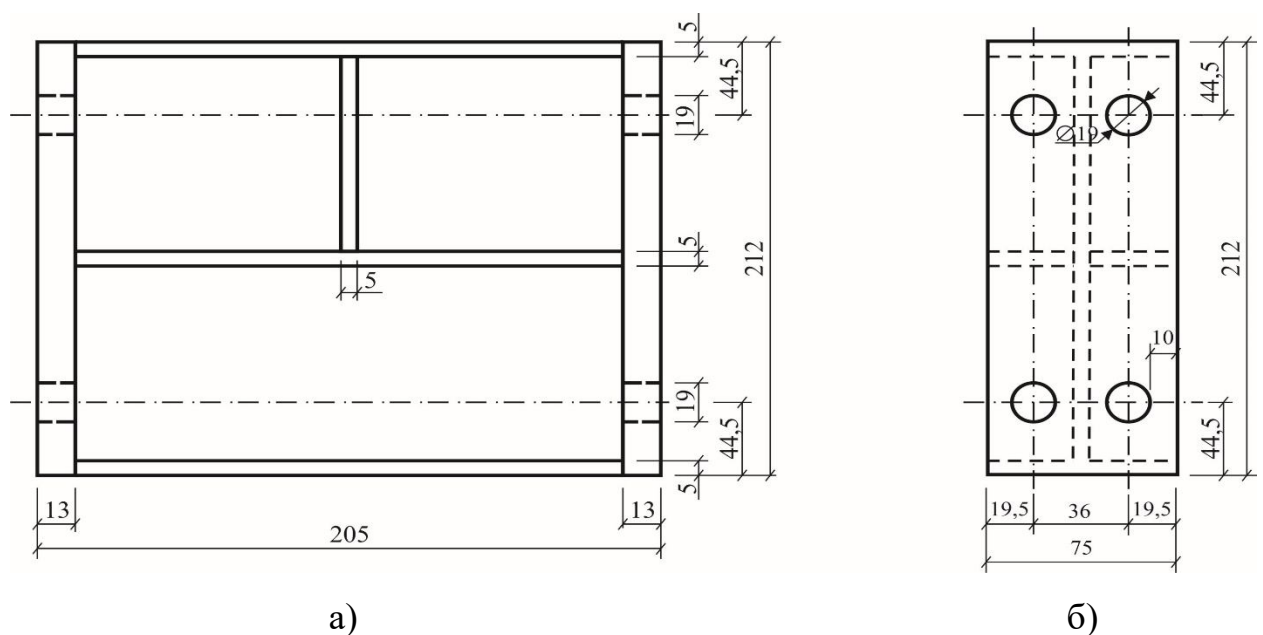


Рис. 3.17 Конструкція металевої вставки: а) фронтальний вид; б) вид збоку

Отвори в металевому вузлі були виконані на 3 мм більше діаметра використовуваних шпильок. Кріплення вклеєних стержнів до металевої вставки здійснювалося шляхом установки двох гайок, що встановлюються з одного боку і шайби.

3.5 Аналіз результатів натурних експериментальних досліджень балок

Схема руйнування зразків має типовий крихкий характер у вигляді висмикування стержнів, покритих шаром деревини або клиноподібне сколювання деревини навколо стрижнів. При виконанні свердління отворів було прийнята міжосьова відстань і відстань до граней менше, ніж рекомендують стандарти різних європейських країн і європейських технічних висновків [75, 51, 54], як показано в таблиці 3.4, де d - діаметр вклеєного стрижня. З огляду на результати проведених випробувань одиночних вклеєних стержнів при осьовому навантаженні в зразках LVL бруса з односпрямованим шпоном відзначено, що схема руйнування має характерне розколювання і невелику область виколування деревини, що детально описано в публікації [42]. Крім одиночних вклеєних стрижнів також були випробувані зразки з двома вклеєними стрижнями з міжосьовими відстанями менше рекомендованих. Наприклад, згідно норм РФ з проектування дерев'яних конструкцій СП64.13330.2017 [28] мінімальна відстань від граней пакета до осі стрижня повинна бути не менше $2d$ і між осями стрижнів відстань повинна бути не менше $3d$.

Знижені міжосьові відстані вклеєних стержнів і відстані до граней не порушили передбачувану схему руйнування, оскільки область виколування деревини не виходила на межі або зовнішні кромки, як показано на рис. 3.18. Аналіз характеру руйнування стержнів дозволяє відзначити, що відбувається овалізація області сколювання деревини навколо вклеєного стрижня. Найбільша частина деревини сколюється уздовж шарів шпону в поперечному перерізі ЛВЛ бруса, де виколує область деревини, що не перевищує 4-х

шарів шпону загальною шириною 13-15 мм. Така овальна форма руйнування деревини LVL бруса навколо вклеєного стержня (рис. 3.19а) пояснюється не тільки шпоноюю структурою матеріалу, але як наслідок цього, різною міцністю на сколювання вздовж волокон по пласті і по грані.

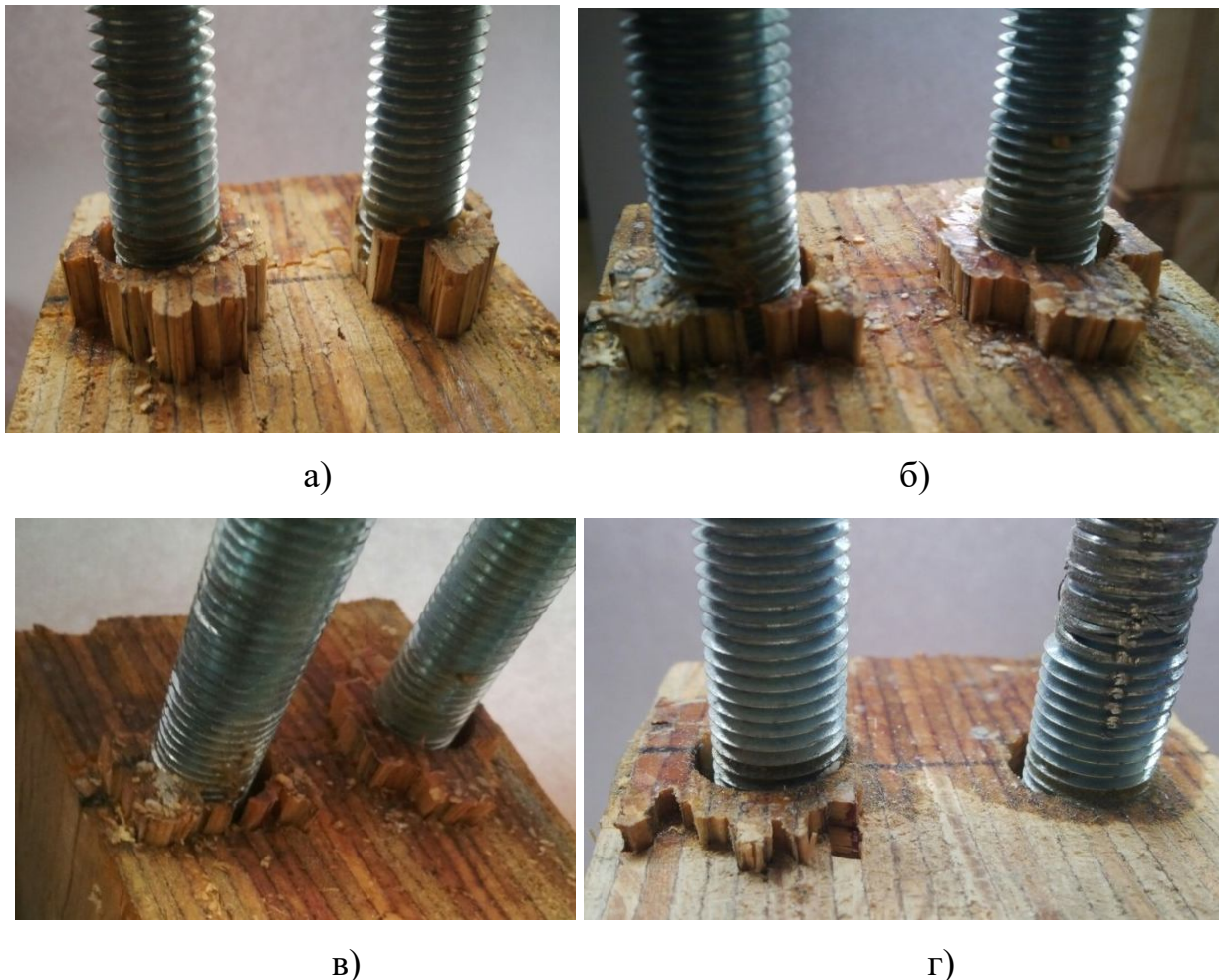


Рис. 3.18 Схема руйнування вклеєних стержнів: а), б) руйнування по двох стержнях; в) руйнування з розколюванням; г) руйнування по одному стержню.

Міцність на сколювання по грані вздовж волокон (поперек шарів шпону) більше, ніж по пласті приблизно на 30%, і відповідно лінія руйнування вздовж шпонових шарів в поперечному перерізі LVL бруса більш розвинена і утворює витягнуту частину овалу області сколювання деревини. Даний ефект дозволяє знизити відстань між стержнями в напрямку поперечному розташуванню шарів шпону поперечного перерізу бруса, що в кінцевому підсумку дає можливість збільшити несучу здатність вузлового з'єднання.

Рекомендації по мінімальним відстаням між вклеєними стержнями і від вклеєного стержня до граней елемента в поперечному перерізі LVL бруса наведені в Додатку В. Спостережуваний феноменологічний характер руйнування враховується і при виконанні розрахунків міцності вклеєних стержнів в LVL брусі за новою методикою, наведеною в цьому ж додатку.

Також були випробувані балки з незначною модифікацією вузла, шляхом установки шпильок меншого діаметра у верхній зоні поперечного перерізу, які в результаті практично не вплинули на величину руйнівного навантаження та деформативність балки в середині прольоту. Верхні стержні не включалися в роботу на продавлювання, а тільки фіксували металеву вставку з площини, яка м'яла верхню частину поперечного перерізу балки. Також деформація у верхній зоні балки збільшувалася за рахунок зминання різьблення стержнів у верхній зоні. Рівень затягування гвинтів не контролювався.

Для зниження деформативності вузла є необхідним установка гайок між металевою вставкою і деревиною для включення в роботу стрижнів у верхній частині вузла на продавлювання і виключення того, що зім'яло деревину, як показано схематично на рис. 3.19б).

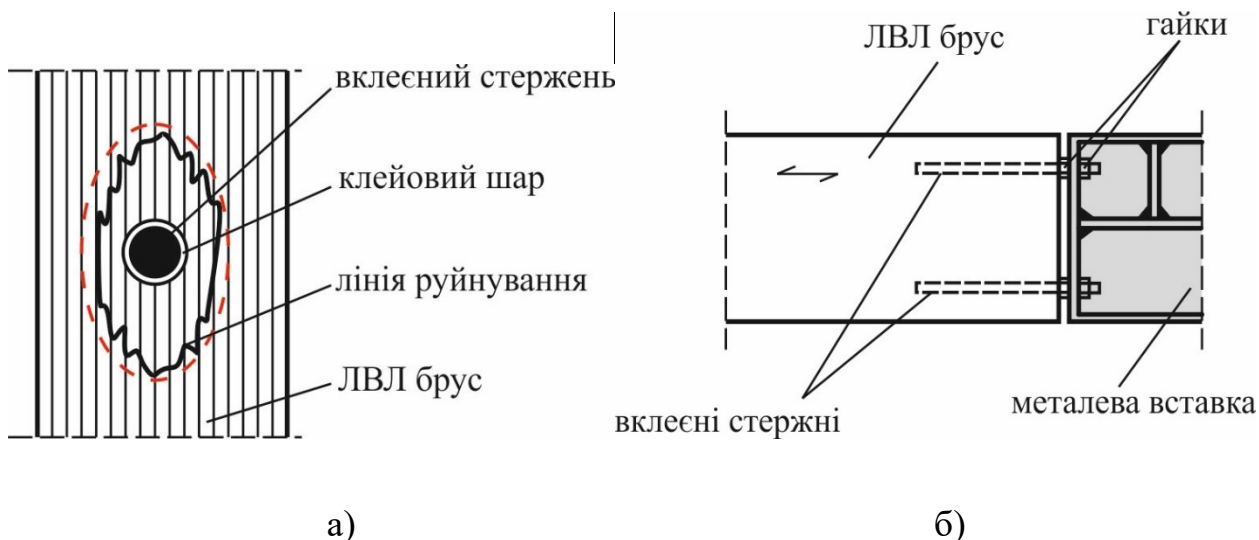


Рис. 3.19 Модель руйнування вклеєних стержнів встановлених уздовж волокон LVL бруса: а) овалізація області сколювання деревини; б) двустороння установка гайок

Висновки:

1. Міцність LVL бруса з односпрямованим шпоном при стисненні під різними кутами і виконаний порівняльний аналіз отриманих даних дають можливість оцінити кількісну зміну міцності від кута нахилу волокон щодо напрямку діючого навантаження.

2. Характер руйнування зразків ще раз підкреслює спостережуваний поліморфізм руйнування, який був відзначений Флаксерманом А.Н. при випробуваннях цільної деревини.

3. Отримані пружні постійні при випробуванні зразків LVL бруса на стиск необхідні для оцінки міцності та деформативності деревини в вузлових з'єднаннях як ортотропного матеріалу.

4. Характер руйнування зразків LVL з односпрямованим розташуванням шпону при стисненні під різними кутами до нахилу волокон показав близьку збіжність не більше 15% з характером руйнування зразків з цільної і клеєної деревини.

5. Феноменологічний зниження міцності шпонового бруса LVL (Ultralam type R) під кутом дії навантаження 30° слід враховувати при виконанні розрахунків з використанням відомих розрахункових формул заснованих на формулі Ханкінсона з деякими поправками або зміною розрахункової формули діапазону кутів від 20° до 40° .

6. У наступних випробуваннях слід додатково і ретельно вивчити місце отриманого викривлення графіка «міцність - кут нахилу волокон» для підтвердження отриманих даних.

7. Аналіз проведених випробувань вклеєних стержнів, встановлених в елементи з шпонового бруса LVL Ultralam типу R при осьовому висмикуванні, дозволяють використовувати таке з'єднання в несучих конструкціях різного типу.

8. При випробуваннях спостерігалось руйнування сталевих стержнів класу міцності 5.8, що підтверджує необхідність використовувати для вклеєних стержнів клас міцності мінімум 8.8.

9. Аналіз міцності LVL бруса при сколюванні показав залежність висоти зразка від величини руйнівного навантаження та умов навантаження.

10. Проведені випробування вузлового з'єднання на вклеєних стержнях з металевою вставкою і аналіз отриманих експериментальних даних підтверджують можливість зниження міжосьової відстані між вклеєними стержнями до $2,4d$ і відстань до граней до $1,2d$, при цьому, не уникаючи блокову схему руйнування групи вклеєних стержнів. Крихкий характер руйнування з утворення тріщин уздовж і поперек шпону вимагає установки гвинтів або застосування LVL бруса з поперечними шарами шпону.

РОЗДІЛ 4

ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ З'ЄДНАНЬ НА ВКЛЕСНИХ СТЕРЖНЯХ

4.1 Основні положення і вихідні дані розрахункової моделі

Для порівняльної оцінки отриманих експериментальним шляхом показників міцних з'єднання і результатів розрахунку використовувався програмний комплекс ANSYS. При моделюванні зразка дотримувалися всі геометричні параметри. Пружні характеристики деревини були прийняті на підставі випробувань, виконаних для кубічних зразків: модуль пружності ЛВЛ уздовж волокон $E_1=16600\text{МПа}$, модуль пружності ЛВЛ поперек волокон $E_2=680\text{МПа}$ $E_3=240\text{МПа}$, модуль зсуву $G_1=G_2=590\text{МПа}$ и $G_2=34\text{МПа}$, коефіцієнти Пуассона $\nu_1=0,43$, $\nu_2=0,016$ и $\nu_3=0,012$. Пружні характеристики клею також були запозичені з ряду робіт і мали такі значення: $E=7000\text{МПа}$, $G=2400\text{МПа}$, $\nu=0,38$. Пружні характеристики сталі приймалися за сертифікатом, значення яких були підтверджені при перевірочних випробуваннях шпильок.

Оскільки з'єднання сталевго стрижня і деревини є жорстким, отримані величини деформацій мають високу збіжність, так як, наприклад, при розрахунку нагельних з'єднань і контактних з'єднань присутні так звані «рихлі деформації», які не враховуються розрахунковими моделями через ідеалізовану геометрію елементів. Величина рихлих деформацій, як правило, складається з таких компонентів як: початкове обминання деревини і проковзування вклеєного стержня в отворі металевої вставки на величину допуску.

Дані, отримані в результаті розрахунку, залежать від ряду таких параметрів, як розмір сітки і виду 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. На рис. 4.1 показана геометрична модель балки з дерев'яними

накладками, через які передавалася навантаження на балку при випробуваннях. У місцях контакту дерев'яних накладок і дерев'яної балки в опорних зонах і в місцях прикладання навантаження вводився коефіцієнт тертя бокових поверхонь деревини, рівний 0,2.

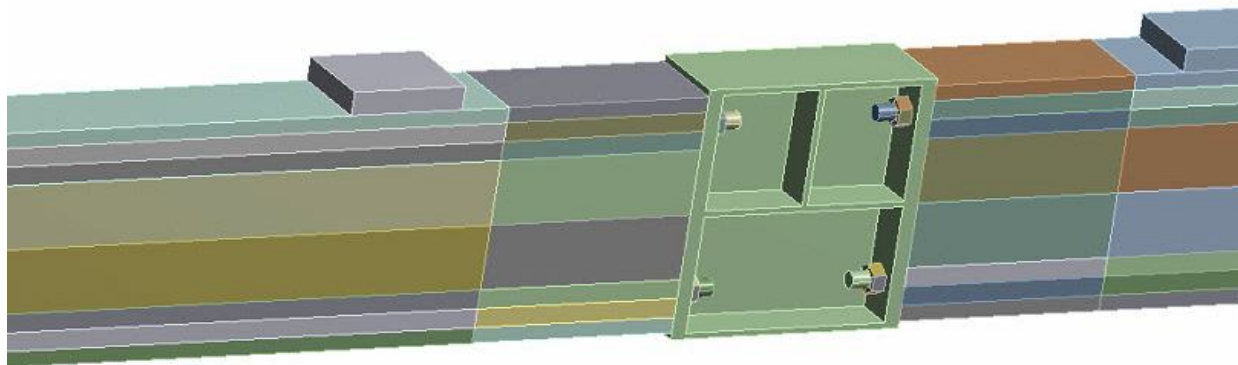


Рис. 4.1 Геометрична модель балки

У розрахунковій моделі балки використовувався восьмивузловий просторовий анізотропний скінченних елемент SOLID 64. Розмір сітки генерувався не автоматично, а з заданими параметрами і представлені скінченні елементи у вигляді паралелепіпедів зі сторонами $4 \times 2 \times 2$ см. У зоні вклеювання стержнів, 180 мм від торців з боку вузла дроблення сітки в 2 рази було збільшено (рис. 4.2). Також згущення сітки виконувалося навколо кожного стержня (рис. 4.3).

4.2 Аналіз чисельних досліджень напружено-деформованого стану з'єднань на вклеєних стержнях

Деформації балок з металевою вставкою в середині прольоту при навантаженні 4 т становить від 12 до 15 мм, що досить близько до результатів розрахунку, показаним на рис. 4.2, де деформація балки досягає практично 11 мм. Деформації балки в точках прикладання навантаження при випробуваннях також близькі до розрахункових величин 7-8 мм, що також показано на рис. 4.9б.

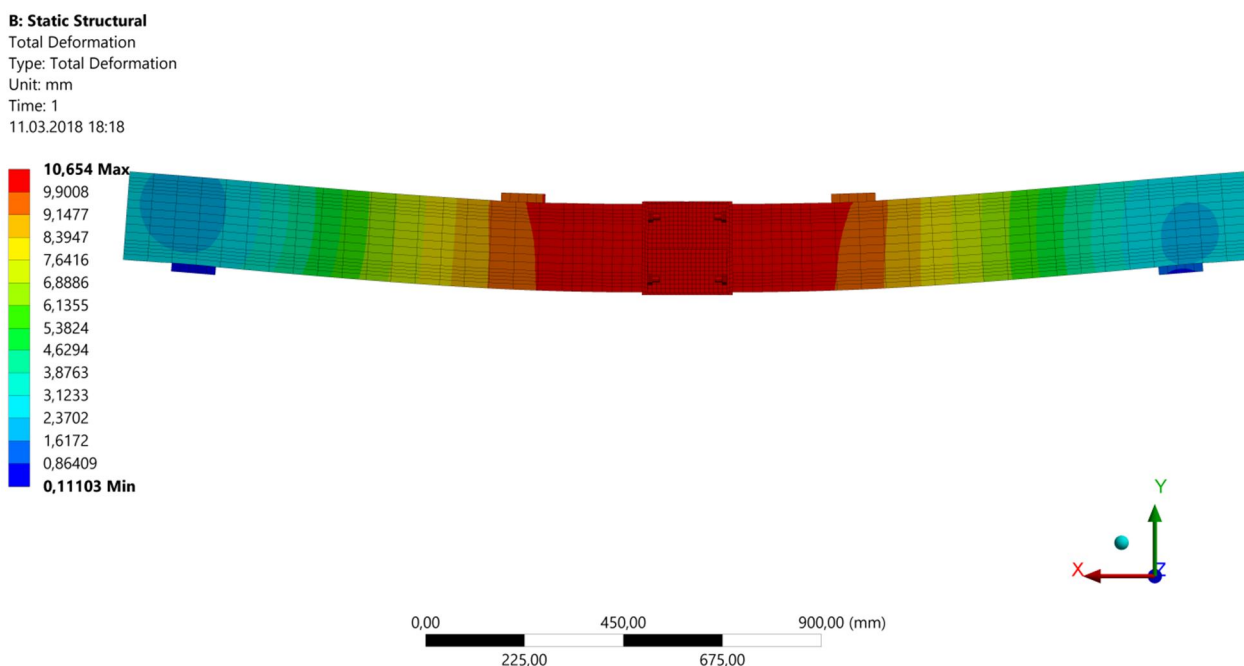
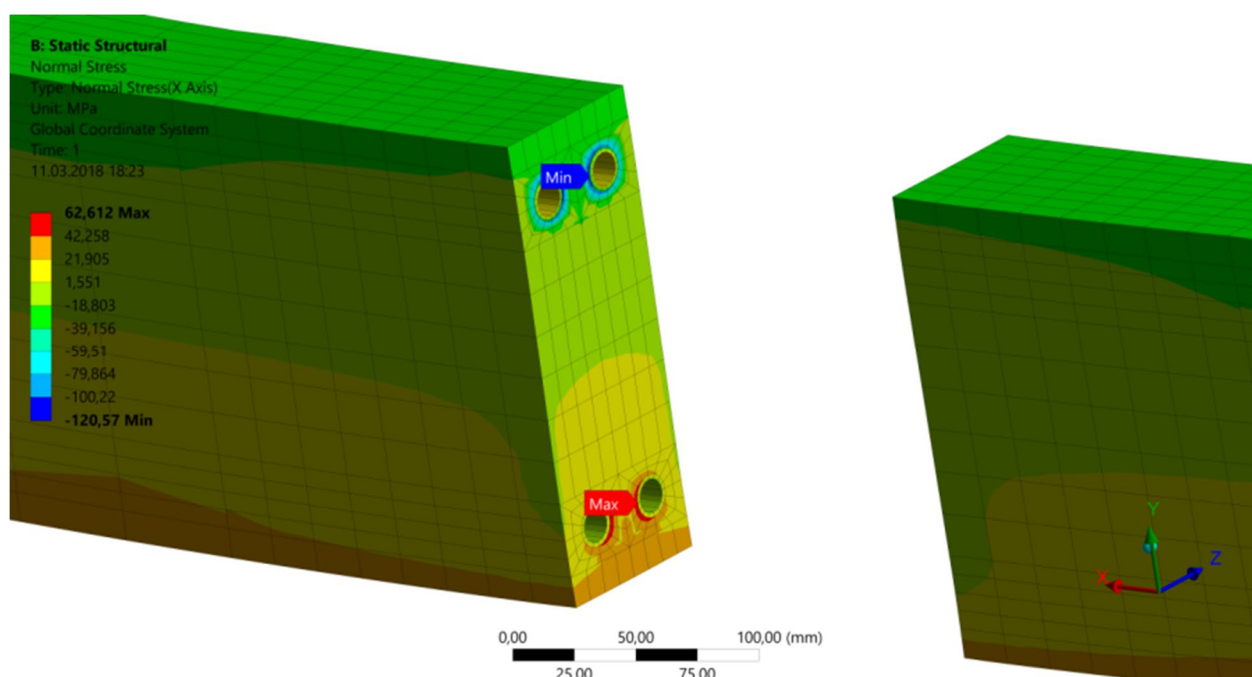
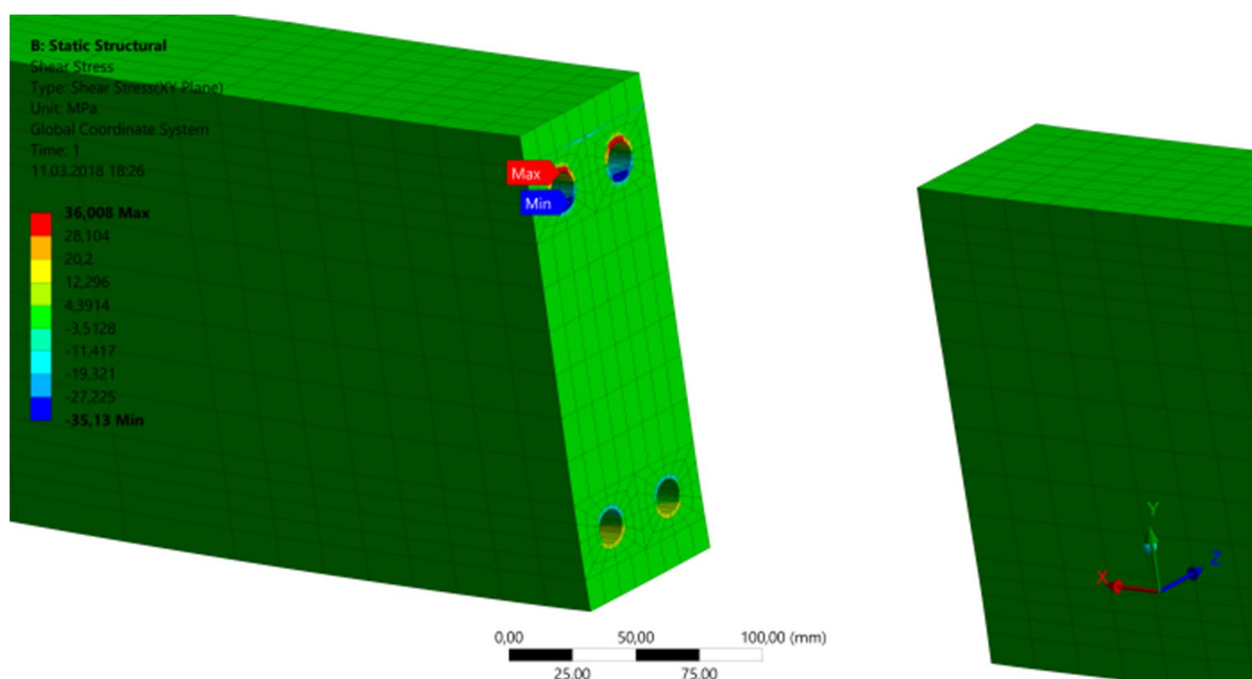


Рис. 4.2 Деформація балки при навантаженні 4 т в кожну точку.

При детальному аналізі отриманих даних розрахунковій моделі, а саме, величини нормальних напружень по трьох осях (X, Y, Z) і величини дотичних напружень в трьох площинах (XY, XZ, YZ), видно, що отримані значення, близькі до експериментальних, у тому числі характер розподілу напружень розтягнутої і стиснутої зон балок. На рис. 4.3 а показані нормальні напруги по осі X, а на рис. 4.3 б дотичні напруження в площині XY. Результати розрахунку для нормальних і дотичних напружень в напрямку різних осей і різних площинах показані на рис. 4.4 – 4.7.



a)



б)

Рис. 4.3 Ізополя нормальних напружень по осі X (а) і дотичних напружень в площині XY(б)

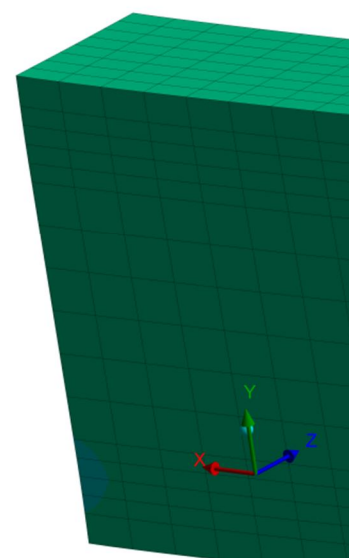
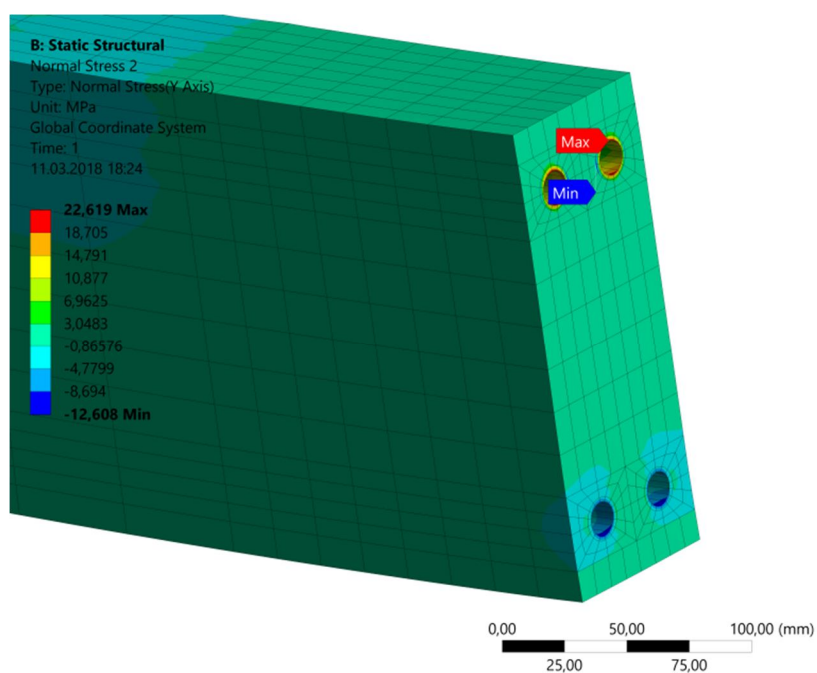


Рис. 4.4 Ізополя нормальних напружень по осі Y

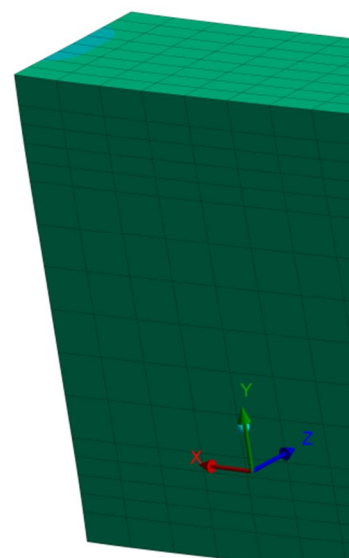
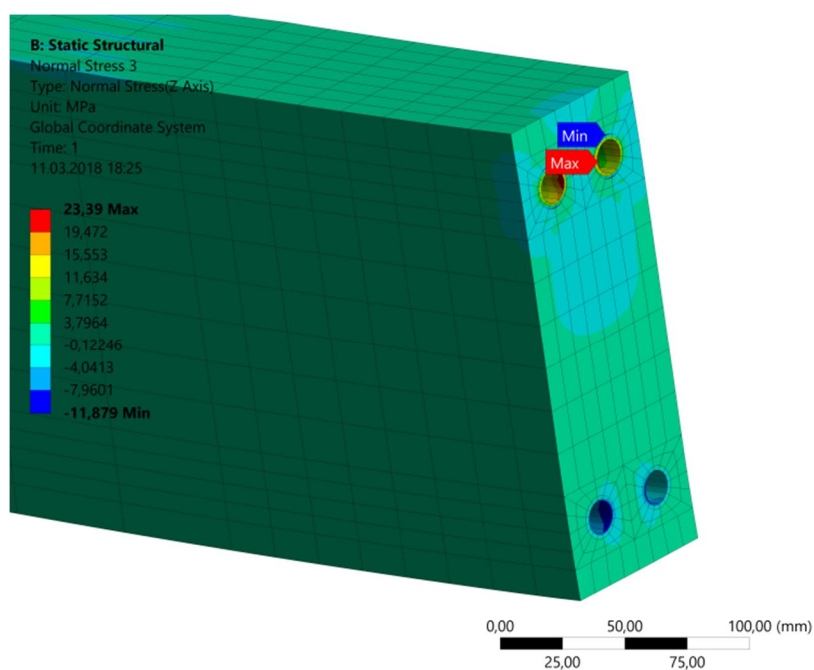


Рис. 4.5 Ізополя нормальних напружень по осі Z

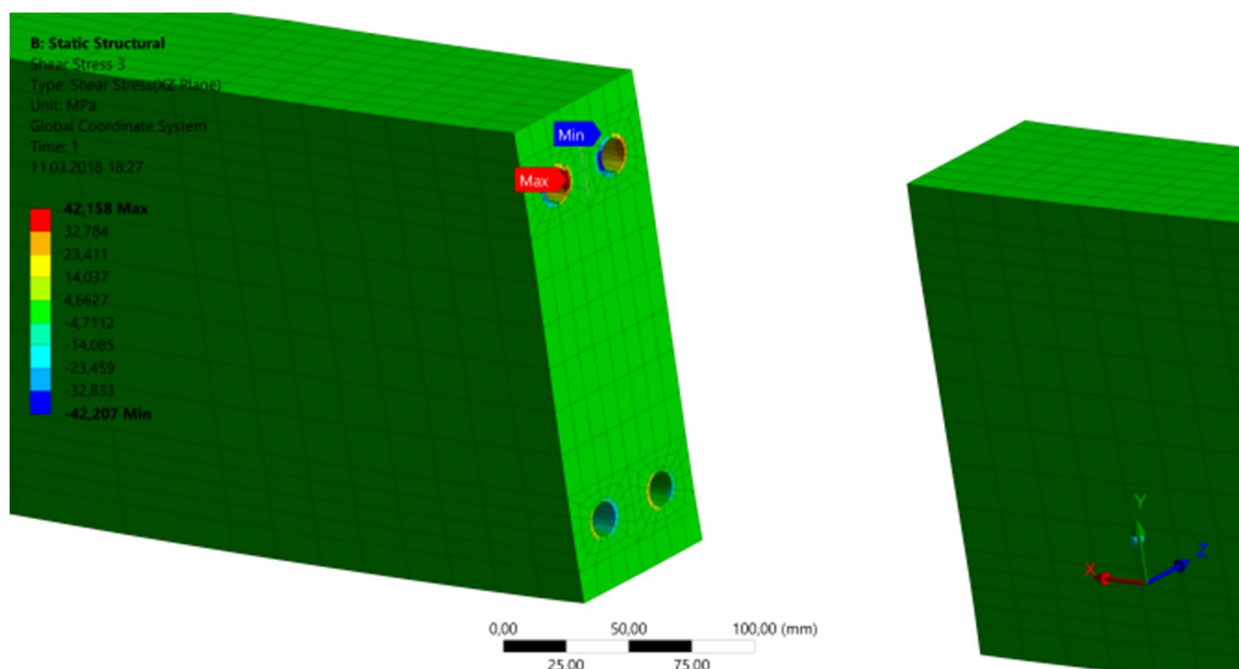


Рис. 4.6 Ізополя дотичних напружень в площині XZ

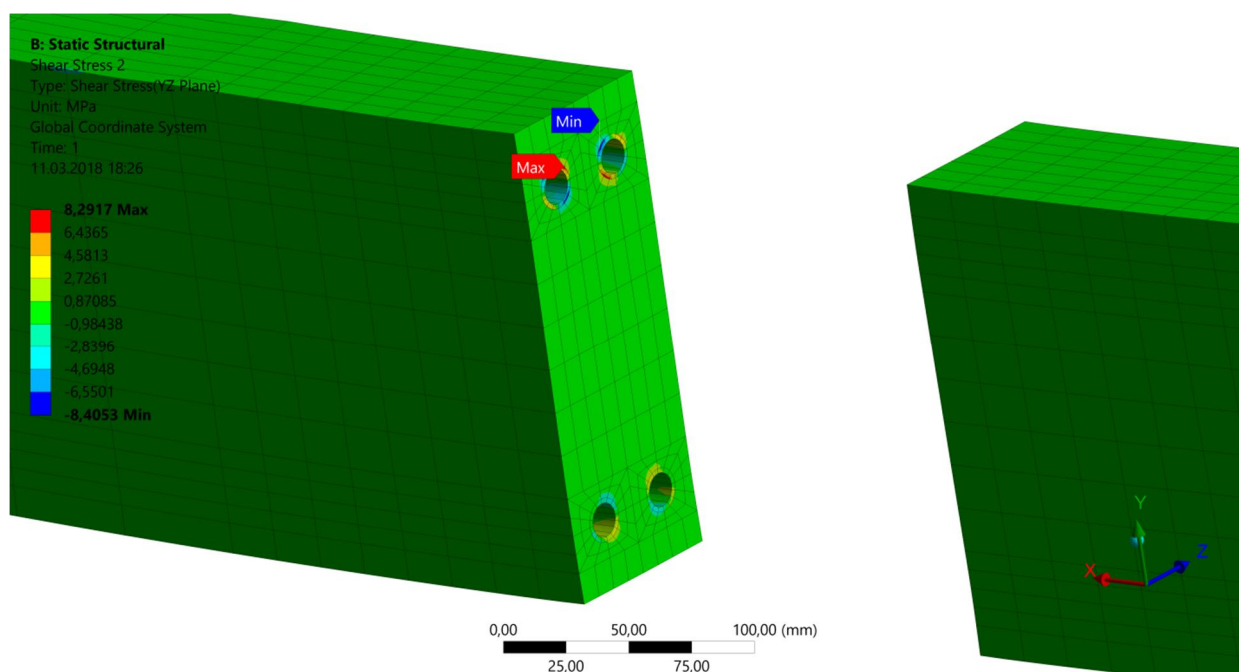


Рис. 4.7 Ізополя дотичних напружень в площині YZ.

В процесі моделювання та розрахунків балки додатково опрацьовувалося питання зміни величини деформації балок при збільшенні натягу гайок, або попереднього напруження створюваного у вузлі. Як показав аналіз декількох ітерацій з мінливою величиною напруження до величин близьких до 70% від граничної міцності деревини на стиск, то

спостерігалось незначне зниження деформацій, близько 3-4 мм. З практичного боку натяг гайок знижує величину рихлих миттєвих деформацій, але в той же час значно ускладнює монтаж такого типу вузлів з використанням моментного ключа для контролю рівня натягу. При цьому необхідно дотримуватися рівномірного поетапного натягу всіх вклеєних стержнів, що ускладнює процес монтажу вузлового з'єднання і збільшує час монтажу.

4.3 Порівняльний аналіз чисельних і експериментальних даних деформацій балок

При випробуванні 5 балок з металевою вставкою були окремо проаналізовані величини прогинів балок в трьох точках: в середині прольоту і в третинах прольоту балки, куди прикладалися зосереджені сили. Результати деформацій балок в середині прольоту на різних рівнях навантаження показаний на рис. 4.8, де видно сильний збіг кривих деформацій балок b2, b3 и b4. Руйнівне навантаження для балок спостерігалось в інтервалі від 48 кН до 55 кН. Розбіжність кривих деформацій балок в середині прольоту збільшувалася при наростанні навантаження близького до руйнуючого.

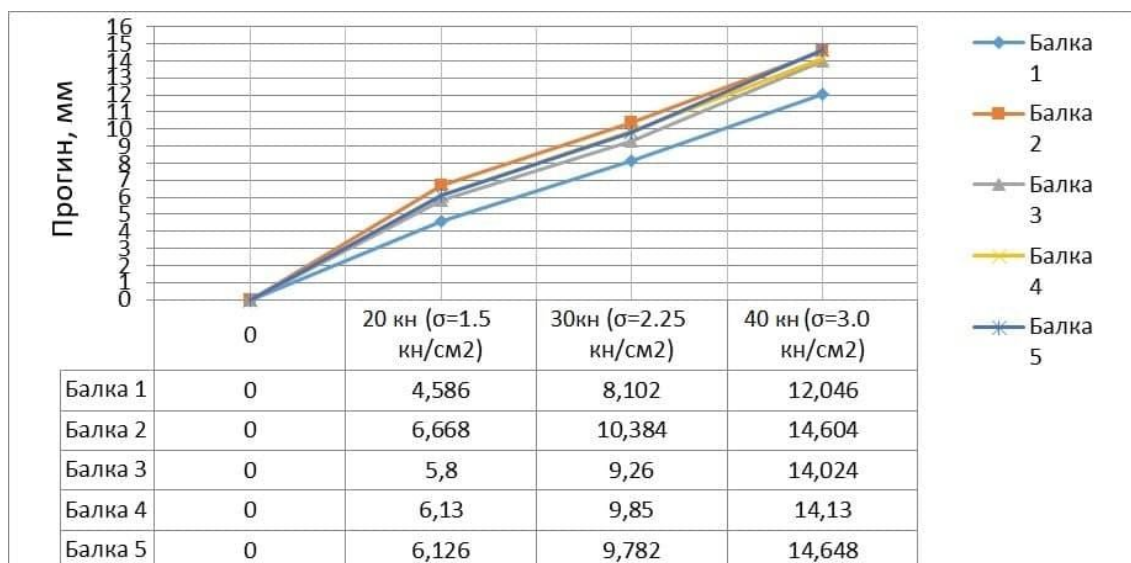
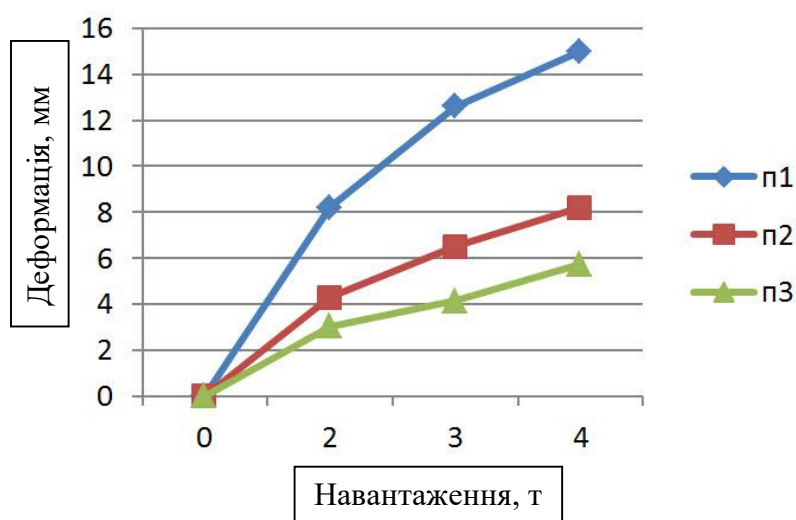
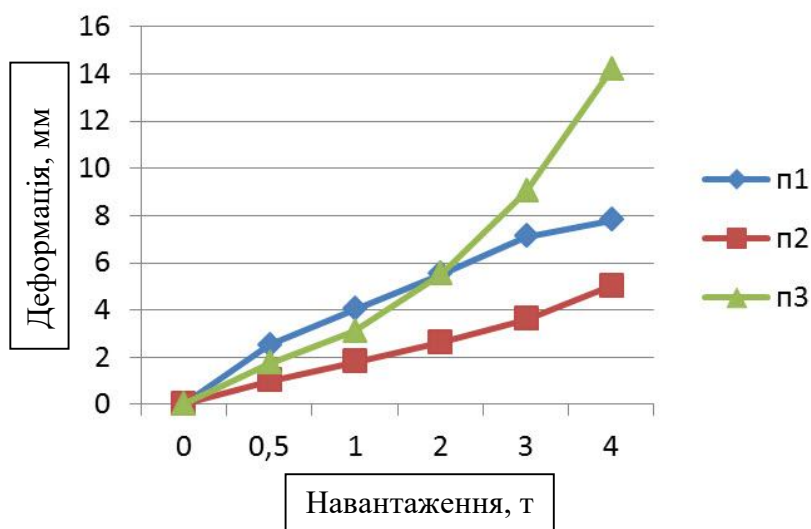


Рис. 4.8 Прогин балок в середині прольоту з металевими вставками.

Для порівняльної оцінки деформативності балки зі вставкою були виконані випробування цільних балок без вузла. Крива п1 на рис. 4.9 показує деформації в середині прольоту балки, а криві п2 і п3 деформації балки в третинах прольоту. На рис. 4.9-а) показані деформації цілісної балки з характерним значним перевищенням деформації або прогину в середині прольоту. Балка зі вставкою на початкових етапах навантаження мала деформацію в прольоті незначно вище, ніж в третинах прольоту, оскільки жорсткість балки у вузлі вище через металевих елементів з'єднання та відсутності податливості вклеєних стержнів.



а)

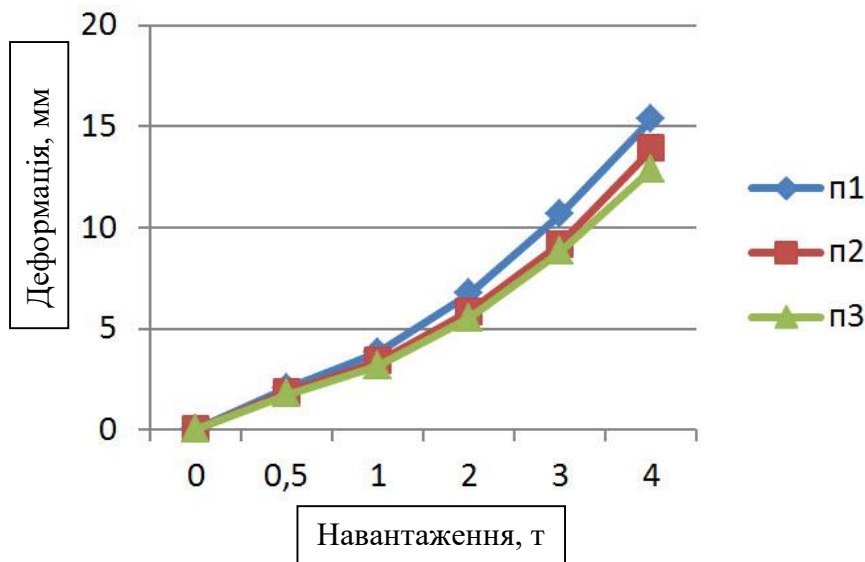


б)

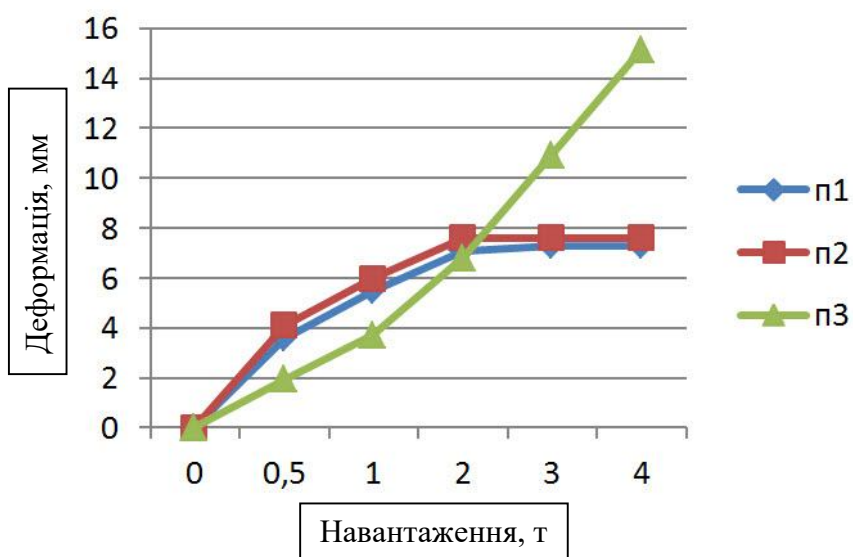
Рис. 4.9 Криві прогину цільної балки (а) і балки зі вставкою (б) в середині прольоту.

Інтенсивний приріст деформації в одній з бічних точок вимірювання ілюструє наростання деформації, що складається з таких компонентів, як обминання деревини у верхній частині поперечного перерізу балки, яка має контакт з металевою вставкою і розтягнення вклеєного стрижня. Останній компонент деформації підтверджувався складнощами при розкручуванні вузла через подовження стрижня і відповідно збільшення кроку різьблення.

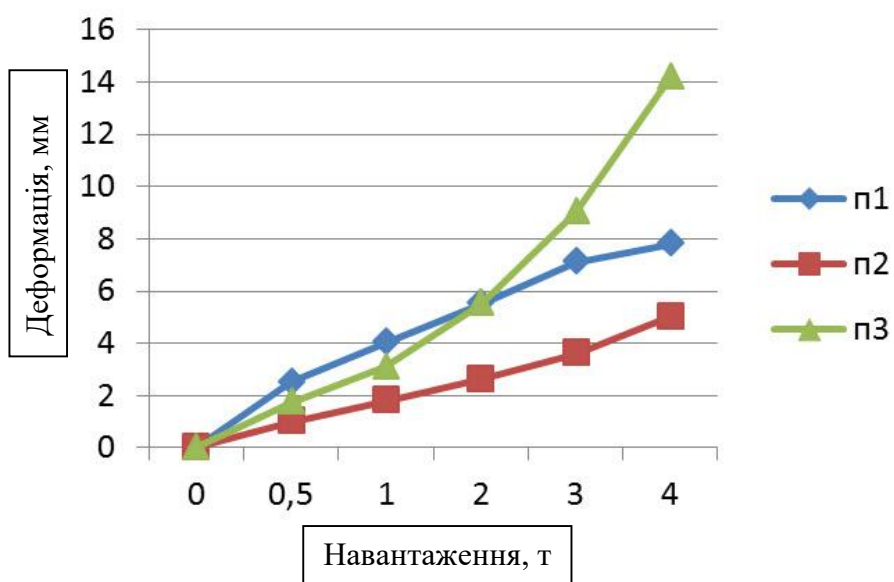
Деформації балок зі вставкою заміряли в середині прольоту (п1) і в точках навантаження балок або в третинах прольоту (п2 і п3), згідно зі схемою показаної на рис. 3.13. Слід зазначити, що різке збільшення деформацій біля однієї з бічних вимірювальних точок вказує на ступеневу розвиток повного руйнування з'єднання, що складається з миттєвою деформації, розколювання і висмикування стрижня внаслідок сколювання деревини навколо нього. Характер перерозподілу деформацій в контрольних точках для кожної з досліджуваних балок зі вставкою показаний на рис. 4.10.



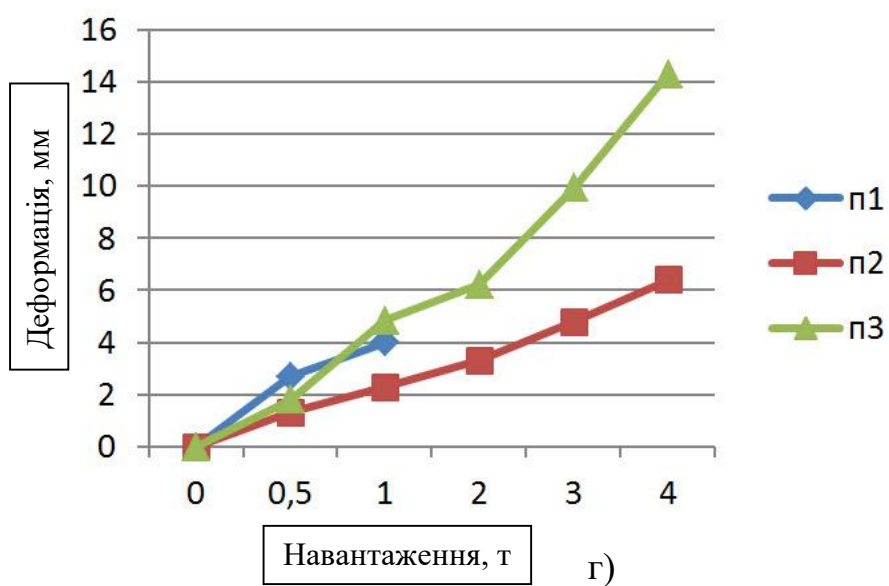
а)



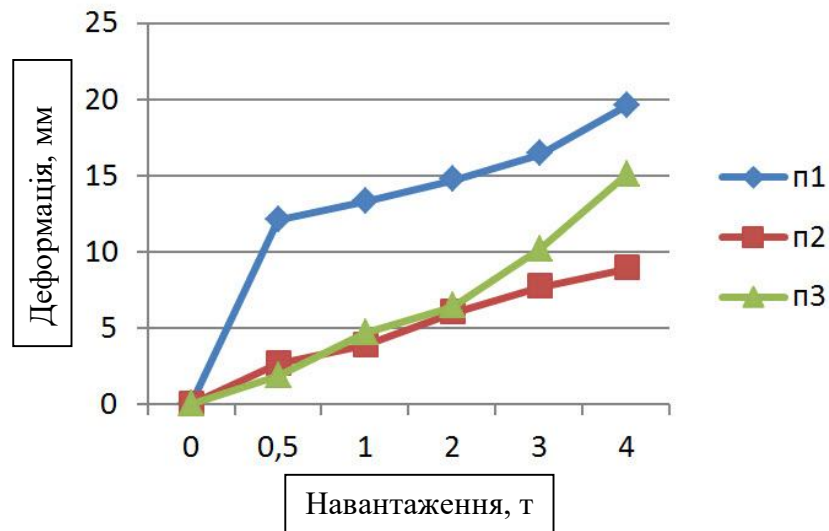
б)



в)



г)



д)

Рис. 4.10 Деформації балок зі вставкою: а) балка-1; б) балка-2; в) балка-3; г) балка-4; д) балка-5

Аналіз експериментальних даних шляхом порівняння з результатами розрахунків, одержуваних в програмному комплексі ANSYS є необхідним при оцінці збіжності даних. Як правило, для дерев'яних конструкцій різниця в 12-18% незначна, в той час як для конструкцій з інших будівельних матеріалів, наприклад, металевих, задовільною може вважатися різниця результатів, що не перевищує 10%. У дерев'яних конструкціях на перших етапах навантаження виникають деформації, пов'язані з ущільненням контактних з'єднань або кріпильних елементів. Вони не враховуються в розрахункових моделях в силу ідеалізованої геометричній моделі конструкції або вузла. У зв'язку з цим виникає розбіжність в отриманих величинах деформації конструкції або її частин, і, відповідно, різниця в величинах отриманих напружень в різних напрямках розглянутої об'ємної моделі.

Висновки:

1. Різниця між результатами, отриманими при випробуваннях натурних моделей балок, і результатами отриманими в програмному комплексі ANSYS, не перевищують 13%, що показує високу збіжність даних для дерев'яних конструкцій і підтверджує вірність обраної розрахункової моделі.
2. Порівняльний аналіз деформативності балок на вклеєних стержнях з металевим вузлом з деформаціями балки без вузла підтверджує необхідність врахування піддатливості даного напівжорсткого з'єднання.
3. Порівняння експериментально отриманих даних і результатів скінчено-елементного розрахунку дають можливість, з достатнім ступенем об'єктивності, підходити до оцінки міцності вклеєних стержнів.
4. Високий рівень затягування гайок на вклеєних стержнях в з'єднаннях не представляються необхідним для створення попереднього напруження, оскільки необхідно спеціально контролювати рівень затягування гайок і ступеневого збільшення натягу кожного із стержнів у з'єднанні. При необхідності натяг гайок може знизити підатливість вузла на 30-40% .

РОЗДІЛ 5

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ ВКЛЕЄНИХ СТЕРЖНІВ,
ВСТАНОВЛЕНИХ В LVL БРУС ВЗДОВЖ ВОЛОКОН5.1 Методика розрахунку міцності вклеєних стержнів з
урахуванням особливості структури LVL бруса

Запропонована методика розрахунку міцності вклеєних стержнів на висмикування при осьовому навантаженні вздовж волокон, що встановлюються в LVL брус з односпрямованим шпоном, включає в себе ряд передумов, у вигляді параметрів, запозичених з різних методик по розрахунку вклеєних стержнів в цільній або клеєної деревини. Необхідність розробки модифікованої методики розрахунку обумовлена, перш за все, великою різницею між отриманими експериментальними величинами міцності і різними аналітичними даними міцності з'єднання. Запропонована формула (5.1) для розрахунку стержнів в LVL брусі включає в себе не тільки основні розрахункові параметри (рис. 5.1), а й особливості, які спостерігаються при випробуваннях, такі, як овалізація сколювання деревини навколо стержня, в зв'язку з чим розглядаються значення величин міцності на сколювання конкретного типу LVL бруса при сколюванні вздовж волокон по грані і по пласті.

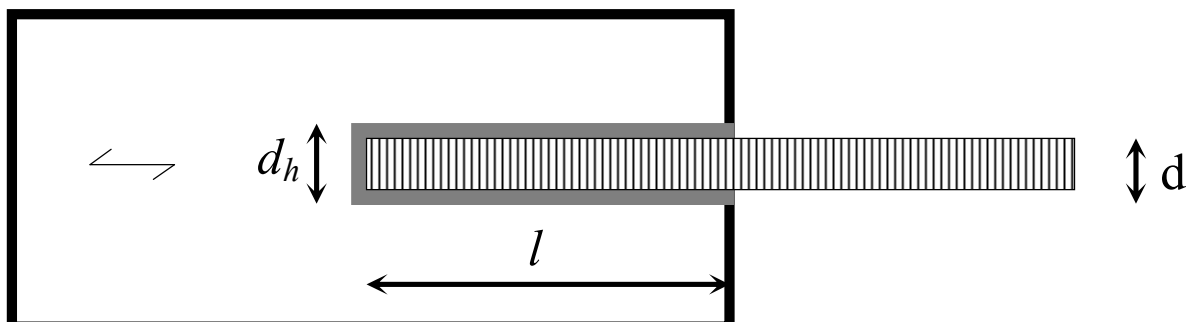


Рис. 5.1 Основні параметри розрахункової моделі

$$R_{ax,k} = \pi \cdot d_h \cdot l \cdot (f_{v,k,ed} \cdot f_{v,k,fl})^{0,5} \cdot k_c \quad (5.1)$$

де $R_{ax,k}$ – характеристична міцність вклеєного стержня при висмикуванні з LVL бруса з односпрямованим шпоном, в Н/мм²; $f_{v,k,ed}$ и $f_{v,k,fl}$ – характеристичні значення міцності LVL при сколюванні вздовж волокон по грані і по пласті, Н/мм², прийняте згідно з технічним висновком виробника; l – довжина вклеєної частини стержня в мм; d_h – діаметр отвору, в мм; k_c – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу напружень зсуву в залежності від довжини клейки стержня, який визначається за формулою (5.2).

$$k_c = 1,2 - 0,02 \cdot l/d \quad (5.2)$$

Для забезпечення міцності з'єднання на вклеєних стержнях, необхідно дотримуватися правил їх розміщення вздовж волокон в поперечному перерізі бруса, а саме мінімальні відстані, як показано на рис. 5.2. Слід зазначити, що відстань між стержнями уздовж шарів шпону більше, ніж в поперечному напрямку щодо шпону через овалізацію сколювання деревини навколо стержня, утвореної різницею міцності на сколювання вздовж волокон LVL по пласті і по грані.

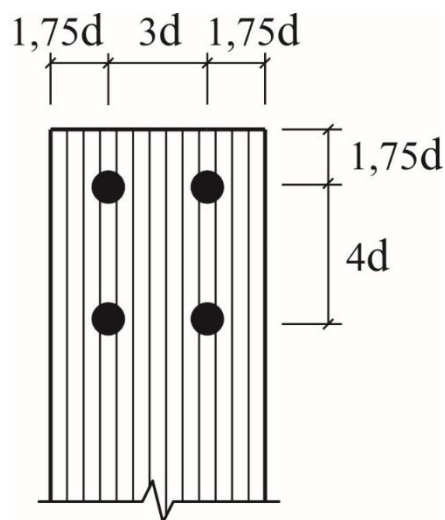


Рис. 5.2 Рекомендовані відстані між вклеєними стержнями і до граней поперечного перерізу

Зазначені мінімальні відстані між стержнями і від стержнів до граней поперечного перерізу елемента з LVL можливо використовувати за умови дотримання точності вклеювання стержнів (без перекосів отворів і самих стержнів при вклеювання).

Основними параметрами, що впливають на міцність вклеєного стержня при висмикуванні, є довжина вклейки стержня і його діаметр, які утворюють площу контактної поверхні, що визначає несучу здатність стержня. Аналіз міцності вклеєного стержня на висмикування згідно з розрахунковими методиками нормативних документів різних країн і запропонованих різними дослідниками, проаналізовано в роботі М. Stepinac [120], (рис. 5.3) показана зміна міцності при постійній величині вклейки для стержнів різного діаметра, а на рис. 5.4 показаний характер зміни міцності стрижнів одного діаметра при різній глибині вклейки.

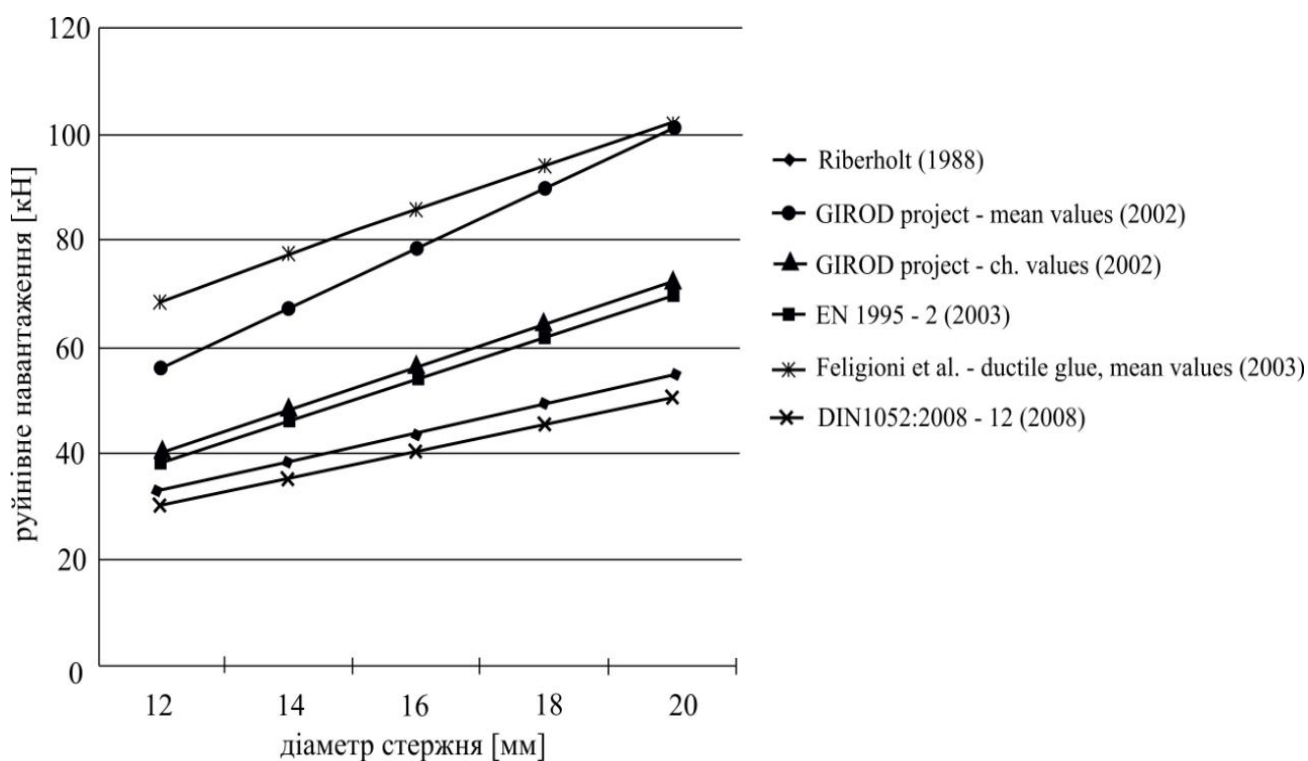


Рис. 5.3 Порівняння зміни міцності вклеєних стержнів на висмикування для стержнів різного діаметра згідно ряду методик

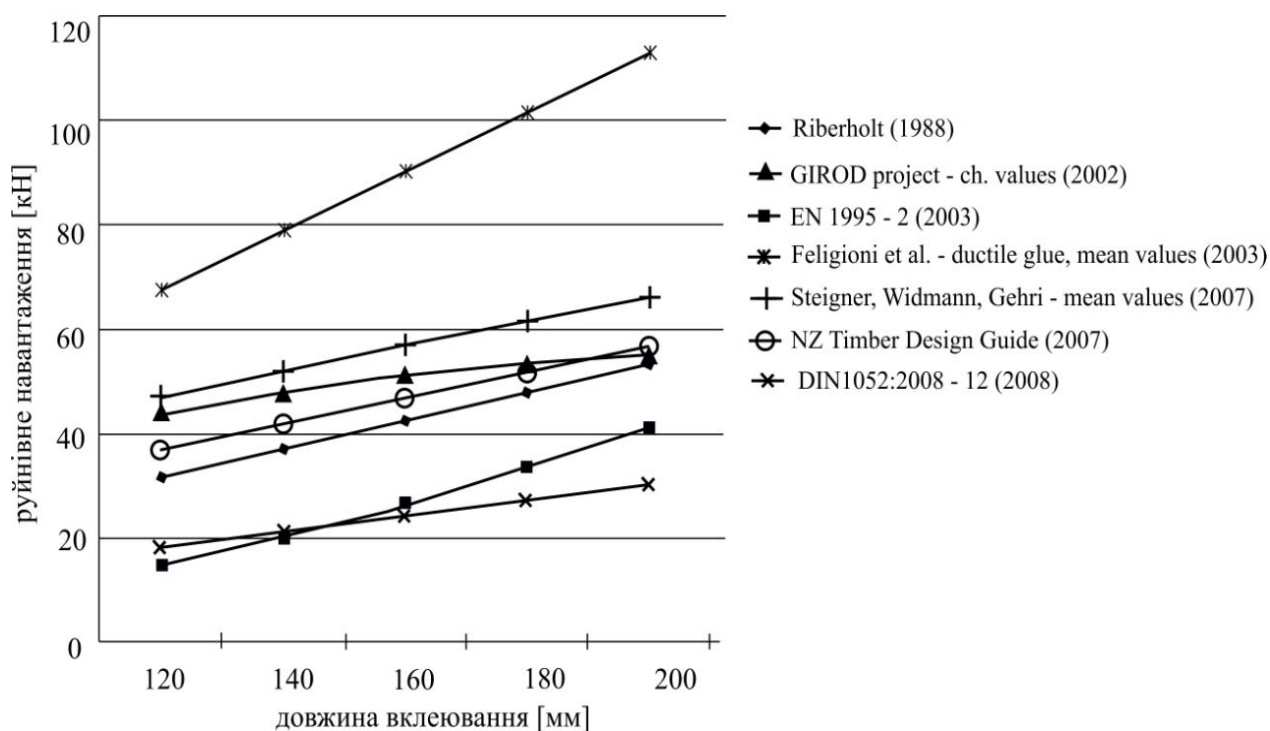


Рис. 5.4 Порівняння зміни міцності вклеєних стержнів на висмикування для стержнів різної довжини вклейки згідно ряду методик

Запропонована методика розрахунку і правила конструювання мають рекомендаційний характер і вимагають додаткових подальших досліджень для уточнення деяких даних. Для порівняння результатів випробувань вклеєних стержнів з міцністю, отриманої при розрахунку згідно німецьких норм DIN 1052, узагальненої європейською методикою і норм Росії СП 64.13330.2017 за виразами (1.10) - (1.13) побудований графік для стержнів одного діаметра, (рис. 5.5), де «tests» результати випробувань, «din» - величина очікувана за німецькими нормами, «ru» - за нормами РФ, «ru-vr» - по нормам РФ з використанням величини тимчасового опору при сколюванні LVL бруса, «en» - величина, очікувана за загальноєвропейською методикою. На рис. 5.5 показаний графік міцності кожного з десяти зразків вклеєною стержнів отриманих при випробуваннях (крива «tests») і очікувані величини, згідно різних норм, а також згідно з запропонованою методикою (5.1), лінія «proposing» для стержнів однакового діаметра.

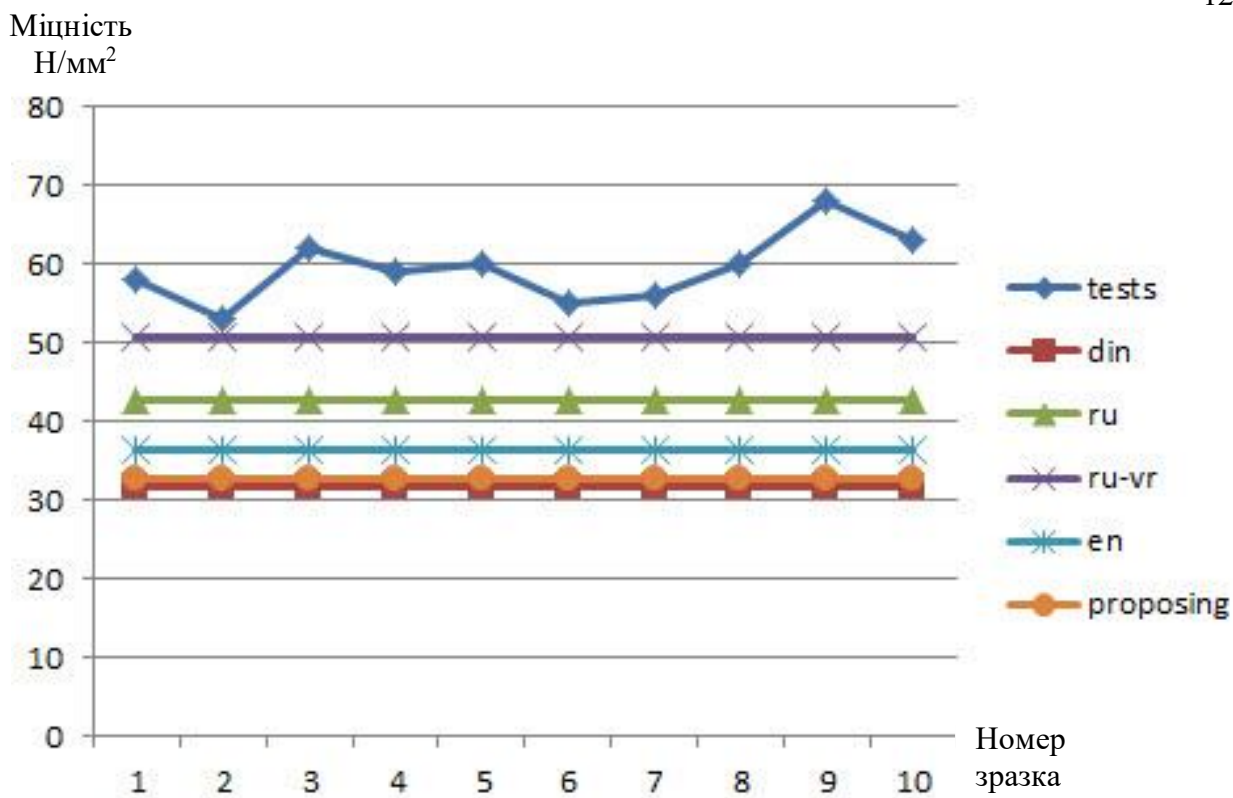


Рис. 5.3 Значення міцності вклеєних стержнів отримані при випробуваннях і очікувані величини, згідно різних норм, а також згідно з запропонованою методикою розрахунку

Найбільше розходження з експериментальними даними складають величини міцності, отримані по DIN 1052, оскільки не розглядається величина міцності деревного матеріалу на сколювання. Дещо менша різниця показують величини міцності з'єднання, отримані за узагальненою європейською методикою, так як в розрахунковій формулі використовується характеристичне значення міцності LVL бруса при сколюванні по межі рівне 4,6 Н/мм².

Результати, отримані за СП 64.13330.2017, мають ближчу збіжність з експериментальними даними, при використанні нормативного значення міцності LVL при сколюванні, прийнятого рівним 4,2 Н / мм² з цього ж стандарту в усередненому вигляді через існуючу незначну різницю в міцності на сколювання вздовж волокон по грані і по пласті. Найбільш близькі розрахункові дані до експериментально отриманих, були обчислені за методикою, пропонуваної СП 64.13330.2017, але з використанням

усередненого тимчасового опору при сколюванні (5 Н/мм^2), обчисленому відповідно до цих же норм. Розглядаючи міцність з'єднання на вклеєних стержнях при оцінці експериментальних даних з позиції міцності на сколювання, як параметра, що збіжність необхідно враховувати тривалий опір матеріалу шляхом введення нормативної або розрахункової величини міцності. Тимчасовий опір дозволяє лише оцінити міцність при статичних короткочасних лабораторних дослідженнях.

Для зниження деформативності балки з металевою вставкою на вклеєних стержнях можливе застосування двосторонньої установки гайок на стержнях, що знаходяться у верхній частині поперечного перерізу балки, або в стислій зоні. Також можливе виконання контрольованого натягу гайок що не перевищує 70% розрахункового значення міцності деревини на стиск. Створюване напруження у вузлі сприяє зниженню рихлих початкових деформацій на 32-40%. При цьому слід враховувати трудомісткість виконання затягування гайок на задану величину.

5.2 Методи підсилення з'єднань на вклеєних стержнях в LVL брусі

Для вирішення проблеми розколювання LVL в торцевій частині в роботах N. Meyer [100] та S. Harris [93] пропонують посилення торцевої частини, шляхом установки гвинтів в двох площинах перпендикулярно осі вклеєного стержня. Також можливе виконання одностороннього посилення, якщо LVL елемент має шари шпону з поперечним напрямком волокон щодо більшості шарів шпону, см. рис. 5.6.

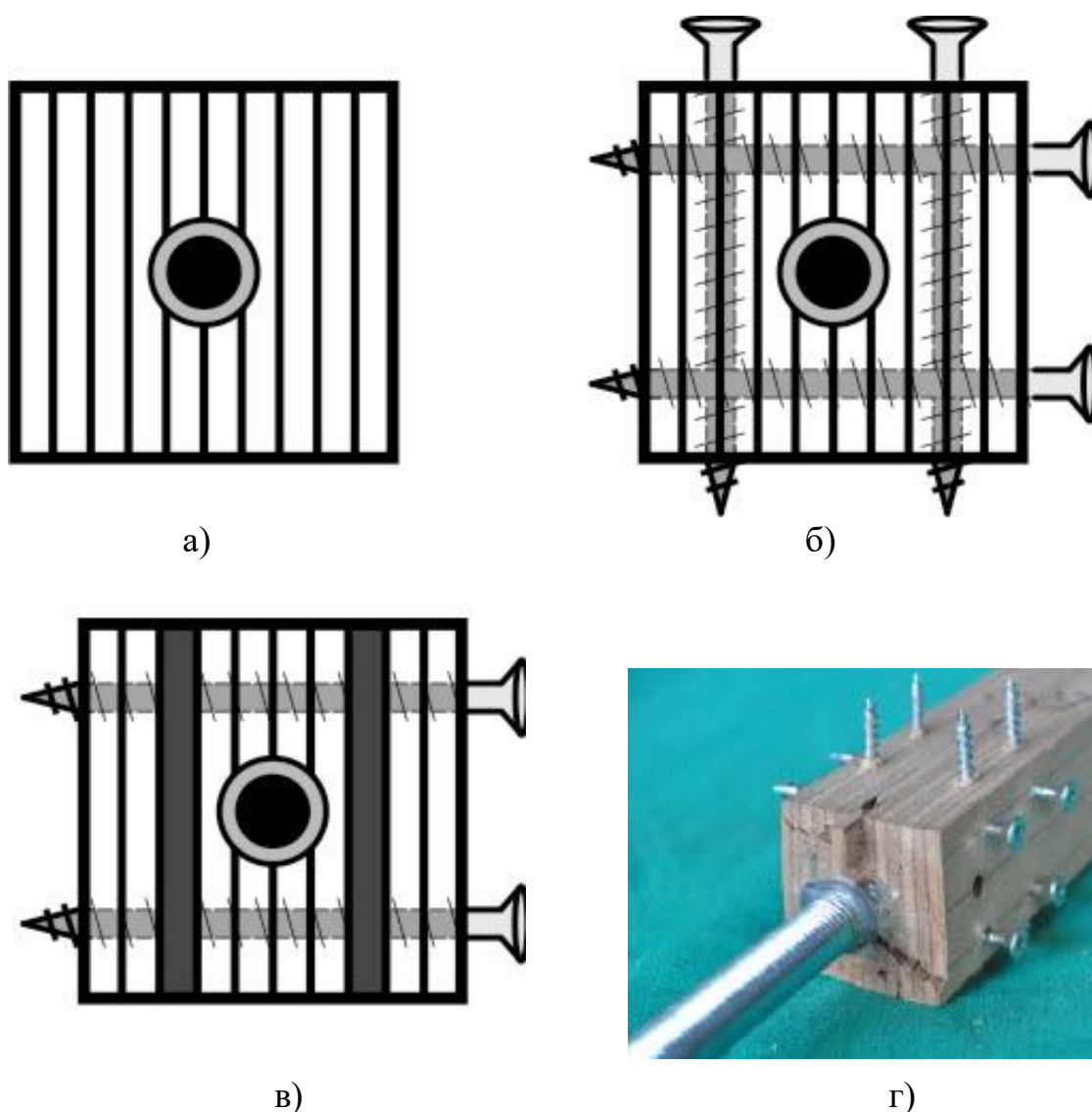


Рис. 5.6 Схема установки гвинтів при розколюванні торців з вклеєними стержнями: а) без посилення; б) посилення гвинтами; в) посилення поперечним шпоном і гвинтами; г) приклад з [100].

В результаті посилення торцевій частині гвинтами механізм руйнування зразків стає в'язким, що є позитивним ефектом для з'єднань будівельних конструкцій.

Аналіз показників руйнівного навантаження щодо виду руйнування, а саме: кількість тріщин або розколів, які спостерігаються при випробуваннях графічно показано на рис. 5.7, для зразків з одним і двома вклеєними стержнями. Міцність зразка без розколів або з малим їх числом показують більш високі показники міцності, ніж зразки, що руйнуються з множинними

розколами або тріщинами. Наочна тенденція зниження міцності зі збільшенням кількості розколів (тріщин) в зразках пояснює необхідність виконання конструктивних заходів у вигляді установки гвинтів. Механізм руйнування, що супроводжується розколюванням торців, є менш бажаним, ніж висмикування деревини навколо стержня. Встановлені гвинти збільшують показники міцності з'єднань на вклеєних стержнях і дозволяють досягти в'язкого характеру руйнування.

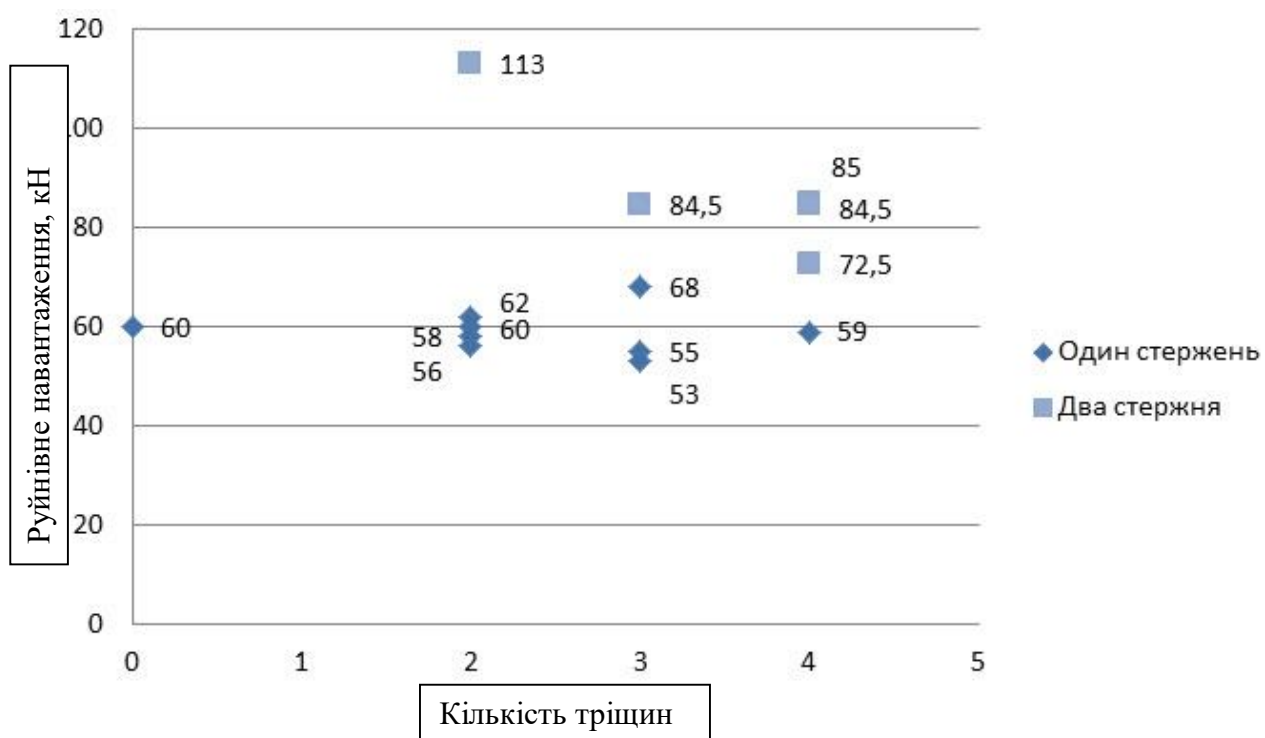


Рис. 5.7 Міцність з'єднань і кількість тріщин при руйнуванні

Превентивні конструктивні рішення у вигляді установки гвинтів, що перешкоджають розколюванню деревини в з'єднаннях і активно використовуються в Німеччині, Австрії, Швейцарії, але відображені тільки в національних нормах Австрії В 1995-1-1: 2015 і відсутні в Єврокодах-5 (EN 1995-1-1). Незважаючи на це, посилення елементів конструкцій гвинтами (шурупами) різного типу на проектній стадії в західноєвропейських країнах загальноприйнято і виконується для посилення опорних зон балок, конькових зон гнuto-клеєних і двосхилих балок, а також при посиленні різного типу підрізувань і перфорацій.

5.3 Приоритетний напрямок подальшого розвитку вклеєних стержнів у високоміцних сучасних будівельних матеріалах на основі деревини

Шпоновий брус або LVL як і деревинні шаруваті пластики (ДШП), які набули значне застосування у військових безметальних спорудах періоду 80х років минулого століття, сьогодні з'являються у будівельній практиці європейських країн, заміщуючи алюмінієві конектори у вузлових з'єднаннях дерев'яних конструкцій. Високий тиск при виробництві листових будівельних матеріалів на основі деревини та зменшена товщина шарів деревини сприяють підвищенню показників міцності, особливо при сколюванні, що важливо для системи вклеєних стержнів як конструктивного рішення вузлів. Листові високоміцні будівельні матеріали з деревини мають наступні переваги:

- Конструктивна ортотропія різного ступеня (співвідношення повздовжніх та поперечних шарів шпону);
- Автоматизоване виробництво деталей шляхом 2Д розкрою листа матеріалу;
- Високий ступінь вологостійкості та щільності (приблизно 1200кг/м³);
- Високі показники міцності та пружні характеристики, що дозволяє компактне розташування кріпильних елементів та вклеєних стержнів у тому числі. Міцність при сколюванні вище у 2 рази ніж клеєної або цільної деревини;

Вклеєні стержні мають значну актуальність для використання з високоміцними матеріалами на основі деревини через рівномірне розподілення зусиль вздовж осі вклеєного стержня, у порівнянні з нагельними з'єднаннями які викликають крихке руйнування шляхом розколювання таких матеріалів. Також частка виробничої готовності деталей конструкцій щорічно зростає, в той час вклеєні стержні влаштовуються як правило лише у виробничих умовах.

5.4 Рекомендації щодо впровадження методики розрахунку вклеєних стержнів у національні норми з проектування дерев'яних конструкцій

Національний нормативний документ ДБН В.2.6-161:2017 не містить жодних вказівок щодо розрахунку та конструювання вузлів дерев'яних конструкцій на вклеєних стержнях. Тому нижче наведено перелік пунктів, які можуть бути використаними при імплементації або складанні відповідного параграфу відносно вклеєних стержнів:

1.1 Основні положення

(1) Використання вклеєних стержнів, слід виконувати у конструкціях, що знаходяться в умовах експлуатаційних класів 1,2 і 3.

(2) Використовувані клейові системи повинні перевірятися, щоб їх властивості міцного з'єднання сталевих стержнів та деревини були надійними на протязі всього періоду експлуатації конструкцій при змінній дії вологи та температури.

(3) Стержні повинні мати рифлену або різьблену поверхню.

(4) Міцність клейового зчеплення стержня з деревиною при сколюванні повинна бути перевірена при випробуваннях.

(5) Для класу експлуатації 2, значення коефіцієнта перетворення k_{mod} згідно з EN 1995-1-1 пункт 3.1.3 необхідно знизити на 20%.

1.2 Стержні навантажені вздовж осі стержня

1.2.1 Основні дані

(1) Несуча здатність з'єднань на вклеєних стержнях при осьовому їх навантаженні необхідно перевіряти за наступними моделями руйнувань:

- руйнування сталевих стержнів;
- руйнування по клейовому шву між деревиною і сталевим стержнем;
- руйнування деревини в області клейового шару;

- руйнування дерев'яного елемента (у тому числі блокове руйнування деревини для випадків встановлення групи стержнів);

(2) Несуча здатність повинна бути лімітованою міцністю стержня.

(3) У представлених нижче формулах зовнішній діаметр d стержня або коли міцність клею не критична, то еквівалентний діаметр d_{equ} дорівнює найменшому діаметру отвору, що становить $1,15d$.

Примітка: Для шпильок зовнішній діаметр приймається як номінальний діаметр стержня; для більшого навантаження на стержні, зовнішній діаметр приймається на 10% вище, ніж номінальний діаметр.

(4) Мінімальні відстані між вклеєними стержнями та до граней приймаються рівними:

- для стержнів встановлених вздовж волокон

а) при навантаженнях вздовж осі стержня $a_2=5 \cdot d$, $a_{2,c}=2,5 \cdot d$

б) при навантаженнях поперек осі стержня $a_2=5 \cdot d$, $a_{2,c}=2,5 \cdot d$, $a_{2,t}=4 \cdot d$

- для стержнів встановлених поперек волокон

а) при навантаженнях вздовж осі стержня $a_1=4 \cdot d$, $a_2=4 \cdot d$, $a_{1,c}=2,5 \cdot d$, $a_{2,c}=2,5 \cdot d$

б) при навантаженнях поперек осі стержня $a_1=(3+2 \cdot \cos \alpha) \cdot d$, $a_2=3 \cdot d$, $a_{1,t}=7 \cdot d$ (не менше 80 мм), $a_{1,c}=7 \cdot d \cdot \sin \alpha$ (не менше $3 \cdot d$), $a_{2,t}=3 \cdot d$, $a_{2,c}=3 \cdot d$.

(5) Мінімальну довжину анкерування або вклеювання стержня $l_{a,\min}$ слід приймати за наступним виразом:

$$l_{a,\min} = \max \begin{cases} 0,5 \cdot d^2 \\ 10 \cdot d \end{cases} \quad (5.3)$$

де

$l_{a,\min}$ мінімальна глибина вклеювання стержня у мм;

d зовнішній діаметр стержня у мм.

1.2.2 Розрахунок міцності

1.2.2.1 Руйнування стержня

$$F_{ax,Rk} = \min \begin{cases} f_{y,k} \cdot A_{ef} & (a) \\ \pi \cdot d_{equ} \cdot f_{ax,k} \cdot \frac{\tanh \omega}{\omega} & (b) \end{cases} \quad (5.4)$$

де

$f_{y,k}$ характеристичне значення міцності сталі на розтяг, у Н/мм²;
 A_{ef} ефективне значення площі поперечного перерізу стержня у мм;
 d_{equ} еквівалентний діаметр стержня у мм;
 l_a глибина вклеювання стержня у мм;
 $f_{ax} = 5,5 \text{ Н/мм}^2$

$$\omega = \frac{0,016 \cdot l_a}{\sqrt{d_{equ}}} \quad (5.5)$$

Для стиснутих вклеєних стержнів (працюють на продавлення) необхідно виконувати перевірку на стійкість при величині напружень стиску більше ніж 300Н/мм².

При комбінованому навантаженні вклеєних стержнів від зсуву і висмикування вздовж осі стержня перевірка міцності з'єднання виконується відповідно до наступного виразу:

$$\left(\frac{F_{la,d}}{R_{la,d}} \right)^2 + \left(\frac{F_{ax,d}}{R_{ax,d}} \right)^2 \leq 1 \quad (5.6)$$

1.2.2.1 Руйнування стержня

(1) Ефективна площа поперечного перерізу A_{ef} вклеєного стержня, встановленого вздовж волокон елементів конструкції, потрібно приймати менше, ніж ефективна ширина b_{ef} яка дорівнює $3d$ у кожную сторону від осі стержня;

(2) Характеристичне значення опору стержня на висмикування у групі вклеєних стержнів, встановлених вздовж волокон слід визначати за наступною формулою:

$$F_{ax,Rk} = f_{t,0,k} \cdot A_{ef} \quad (5.7)$$

де

$F_{ax,Rk}$	характеристичне значення несущої здатності стержня на висмикування;
$f_{t,0,k}$	характеристичне значення міцності деревини на розтяг вздовж волокон;
A_{ef}	ефективна площа зони руйнування деревини, яка складає величину рівну bd .

(3) Для стержнів, встановлених під кутом до нахилу волокон, необхідно слідувати правилам, викладеним у EN1995-1-1, п.8.1.4, де h_e – відстань від навантаженої грані до кінця стержня та b слід замінити на b_e .

1.3.1 Вклеєні стержні у прямокутних підрізках балок на опорах

Від дії розтягуючого зусилля $F_{t,90,d}$ у прямокутних підрізках балок на опорах виникає напруження зсуву в клейовому шві, яке вважається рівномірно розподіленим. Міцність забезпечена, якщо виконується така умова:

$$\frac{\tau_{ef,d}}{f_{k1,d}} \leq 1 \quad (5.8)$$

$$\tau_{ef,d} = \frac{F_{t,90,d}}{n \cdot d_r \cdot \pi \cdot l_{ad}} \quad (5.9)$$

де

n	кількість сталевих стержнів;
$f_{k1,d}$	розрахункове значення міцності клейового шва;
d_r	зовнішній діаметр сталевих стержнів.

Максимальне значення міцності клейового шва, яке сприймає розтягувальну силу визначається за наступним виразом:

$$\max F_{t,90,d} = f_{k1,d} \cdot \pi \cdot n \cdot d_r \cdot l_{ad} \quad (5.10)$$

1.3.2 Вклеєні стержні при підсиленнях перфорацій у балках

Міцність забезпечена, якщо виконується така умова (5.8) та (5.9).

де

l_{ad} $l_{ad}=h_{ru}+0,15 \cdot h_d$ відповідно $l_{ad}=h_{ro}+0,15 \cdot h_d$ максимальна довжина вклеювання при круглих перфораціях; $l_{ad}=h_{ru}$ соотв. $l_{ad}=h_{ro}$ максимальна довжина вклеювання при прямокутних перфораціях;

n кількість сталевих стержнів, при цьому можна встановлювати тільки один стержень в поздовжньому напрямку балки з кожного боку перфорації.

Наближений розрахунок підвищення зсувних напружень виконується за умови, що геометрія прямокутних перфорацій задовольняє умовам: $0,1 \leq a/h \leq 1$ та $0,1 \leq h_d/h \leq 0,4$. Найбільше значення максимального зсувного напруження можна визначити за наступним виразом:

$$\tau_{\max} = \kappa_{\max} \cdot \frac{1,5 \cdot V_d}{b \cdot (h - h_d)} \quad (5.11)$$

де

$$\kappa_{\max} = 1,84 \cdot \left(1 + \frac{a}{h}\right) \cdot \left(\frac{h_d}{h}\right)^{0,2} \quad (5.12)$$

1.3.3 Вклеєні стержні при підсиленнях конькової зони двоскатних та зігнутих балок

Для балок, в яких підсилення сприймає тільки додаткові поперечні напруження від кліматичних змін в класах експлуатації 1 і 2, виконується конструктивне підсилення для сили, що розтягує, яка визначається наступним чином:

$$F_{t,90,d} = \frac{\sigma_{t,90,d} \cdot b^2 \cdot a_1}{640 \cdot n} \quad (5.13)$$

Сталеві стержні повинні проходити крізь все ламелі по висоті балки, виключаючи крайні. Відстань між вклеєними стержнями повинні знаходитись у наступних інтервалах:

$$250mm \leq a_1 \leq 0,75 \cdot h_{ap} \quad (5.14)$$

При конструктивному підсиленні відстань між стержнями приймається однаковою. При сприйнятті вклеєними сталевими стержнями сили, що розтягує $F_{t,90,d}$, виконується перевірка клейового шва:

$$\frac{\tau_{ef,d}}{f_{k1,d}} \leq 1 \quad (5.15)$$

$$\tau_{ef,d} = \frac{2 \cdot F_{t,90,d}}{\pi \cdot l_{ad} \cdot d_r} \quad (5.16)$$

де

$f_{k1,d}$ розрахункове значення міцності клейового шва для $l_{ad} \leq 250$ мм, характеристичне значення. Незалежно від довжини вклеювання завжди необхідно приймати $f_{k1,k} = 4$ Н/мм²;

d_r зовнішній діаметр сталевих стержнів.

Висновки:

1. Запропонована методика розрахунку міцності вклеєних стрижнів на висмикування враховує структурну неоднорідність ЛВЛ бруса і має високу збіжність з експериментальними даними.
2. Конструктивні рекомендації у вигляді мінімальних відстаней між вклеєними стрижнями в ЛВЛ брусі і від стрижня до граней поперечного перерізу бруса дозволяють уникнути розколювання деревини та зниження міцності з'єднання.
3. У з'єднаннях з металевою вставкою слід виконувати двосторонню установку гайок щодо металевої вставки, які забезпечать включення в роботу на продавлювання вклеєних стрижнів розташованих в стислій зоні зігнутих елементів.
4. Характер руйнувань зразків з утворення тріщин до висмикування стержня підтверджує необхідність виконання підсилень торців елементів

гвинтами для збільшення міцності з'єднання і досягнення в'язкого руйнування.

5. Застосування ЛВЛ бруса з поперечними шарами шпону в з'єднаннях на вклеєноі стрижнях знижує утворення тріщин і підвищує міцність з'єднання до 30-40%.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлено міцність та пружні характеристики LVL бруса з односпрямованим шпоном при стиску під різними кутами нахилу волокон та отримано значне зменшення міцності при куті 30° , коли аналогічне зниження міцності характерно для клеєної та суцільної деревини при кутах 42° - 46° .
2. Виконано експериментальні дослідження міцність LVL бруса при сколюванні по грані вздовж волокон з використанням різних типів зразків. Досліджено міцність клеєних стержнів при висмикуванні, які розташовані в LVL брусі вздовж волокон.
3. Експериментально досліджено міцність вузлового з'єднання типу «металева вставка» з використанням клеєних стержнів у балках, а також цільних балок для визначення піддатливості цього з'єднання.
4. Розроблено методику розрахунку міцності клеєних стержнів та рекомендації по конструюванню вузлових з'єднань LVL бруса на основі комплексного аналізу експериментальних даних і результатів розрахунків з використанням методу скінчених елементів у програмному комплексі ANSYS, розбіжність яких не перевищує 13%. Запропонована методика розрахунку міцності клеєних стержнів у LVL брусі, яка враховує овалізацію деревини при сколюванні навколо стержня.
5. Виконано аналіз характеру руйнування клеєних стержнів та запропоновані методи підсилення з'єднань на клеєних стержнях у LVL брусі, які перешкоджають крихкому руйнуванню і підвищують несучу здатність з'єднань, що досягається шляхом встановлення гвинтів у поперечному напрямі відносно напрямку волокон деревини.
6. Розроблено рекомендації щодо мінімальних відстаней між осями клеєних стержнів та відстаней від осі стержня до грані елемента, які працюють на висмикування вздовж волокон деревини і забезпечують максимальну несучу здатність з'єднання через уникнення блокового руйнування групи клеєних стержнів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ашкенази Е.К. Анизотропия конструкционных материалов: Справочник: / Е.К. Ашкенази, Э.В. Ганов. – М.: Машиностроение, 1980. – 247 с.
2. Ашкенази Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов: [текст] / Е.К. Ашкенази. – М.: Лесная промышленность, 1978. – 221 с.
3. Ашкенази Е.К. Прочность анизотропных древесных материалов: [текст] / Е.К. Ашкенази. – Л.: Стройиздат, 1966. – 165 с.
4. Бажанов В.Л. Пластинки и оболочки из стеклопластиков: [текст] / В.Л. Бажанов, И.И. Гольденблат, В.А. Копнов. – М.: Высшая школа, 1970. – 407 с.
5. Бидаков А.Н. Испытание новых эффективных конструктивных форм клеефанерных балок. // Проектирование, изготовление и монтаж стальных конструкций. Опыт и перспективы развития: сб. науч. трудов «Проектстальконструкція ім. В.М. Шимановського. – 2013. – Т. 11. – С. 54-61.
6. Бідаков А.М. Підвищення міцності та стійкості клеєфанерних балок шляхом влаштування Х-подібної фанерної стінки. Дисертація, Харків, 2014 р., 185 с.
7. Бидаков А.Н., Фурсов В.В. Проектирование деревянных конструкций по Еврокоду-5 и DIN 1052 с примерами расчетов. Том 1: научное издание, Харьков: Издательство «Точка», 2018. – 406 с.
8. Бидаков, Е.А. Распопов. Прочностные и упругие характеристики шпонового бруса LVL при сжатии под различными углами к наклону волокон. Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. збірник. – К., КНУБА, 2017. – Вип. 65. – С. 91-99.
9. Галушко П.Г., Ляхин В.В., Чередник Д.Л. Обеспечение эксплуатационной надежности уникальных несущих конструкций из клееной древесины // Тезисы докладов 48 науч.-техн. конф.

“Повышение эффективности строительства”. - Харьков: ХИСИ. - 1993.- С.71.

10. *Гольденблат И.И.* Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов: [текст] / *И.И. Гольденблат, В.А. Коннов.* – М.: Машиностроение, 1968. – 191 с.
11. *Гольденблат И.И.* Пластинки и оболочки из стеклопластиков: [текст] / *В.Л. Бажанов, И.И. Гольденблат, В.А. Коннов, А.Д. Поспелов, А.М. Синюков.* – М.: Высшая школа, 1970. – 407 с.
12. ДБН В.2.6-161:2017. Дерев'яні конструкції. Основні положення. Мінрегіон України, Київ, 2017, -117 с.
13. Деревянные конструкции. Многослойный клееный из шпона материал Ultralam (Ультралам). Общие технические требования. СТО 36554501-021-2010, TSNIISK (Moscow), 2009.
14. Деревянные конструкции. Нормы проектирования; СНиП II-25-80. – М.: Стройиздат, 1982. – 64 с.
15. Журков С. Н., Нарзуллаев Б. Н. Временная зависимость прочности твердых тел // Журн. техн. физики. 1953. Т. 23, № 10. С. 1677–1989.
16. Знаменский Е.М. Об учете характера и длительности действия нагрузок при нормировании расчетных сопротивлений древесины. В кн.: Несущие деревянные конструкции: Сб. научных трудов. - М.: ЦНИИСК, 1981.-С. 127-132.
17. Знаменский Е.М. Совершенствование нормирования расчетных характеристик деревянных конструкций. // Тр. ЦНИИСК. – М. – 1989 – С. 36 – 47.
18. Иванов Ю.М. Сопротивление древесины сосны сжатию под разными углами к волокнам. // Тр. ин-та леса АН СССР. Т.ШЧ.-1953. с.347-370.
19. Кириллов А.Н. // Конструкционная фанера: [текст] / А.Н. Кириллов. – М.: Лесная промышленность, 1981. – 326 с.
20. Ляхин В.В., Фурсов В.В., Галушко П.Г., Чередник Д.Л. Деревянные конструкции электротехнического назначения // Тези доповідей

регіональної наук.-практ. та методичної конф. “Дослідження будівельних елементів і конструкцій та особливості викладання будівельних дисциплін”. – Рівне: УПВГ. - 1993. - С.68.

21. Митинский А.Н. Упругие постоянные древесины как ортотропного материала: [текст] / А.Н. Митинский // Сб. трудов ЛТА. – Л.: ЛТА, 1948. – Т. 6. – С. 22-52.
22. Огибалов П.М., Суворова Ю.В. Механика слоистых полимеров. Из-во МГУ, 1965.
23. Павлов А.П. Выбор схемы упругой анизотропии древесины в инженерных сооружениях: [текст] / А.П. Павлов // Сб. трудов ЛТА. – Л.: ЛТА, 1953. – Вып. 71. – С. 10-21.
24. Павлов А.П. Плоская задача теории упругости древесины: [текст] / А.П. Павлов // Сб. трудов ЛИИЖТ. – Л.: ЛИИЖТ, 1947. - Вып. 136. – С. 19-39.
25. Пособие по проектированию деревянных конструкций. ЦНИИСК им. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1986. – 216 с.
26. Рабинович А.Л. О расчете ортотропных слоистых панелей на растяжение, сдвиг и изгиб / труды ЦАГИ. Вып. 675, 1948, 23с.
27. Серов Е. Н., Санников Ю. Д., Серов А. Е. Проектирование деревянных конструкций. Учебное пособие под редакцией Е.Н. Серова.- Москва : Изд-во АСВ , 2011 г. — 536 стр.
28. СП 64.13330.2017 Свод правил. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80, Минрегион РФ, Москва, 2017. – 97с.
29. ТКП 45-5.05-146-2009 Деревянные конструкции. Строительные нормы проектирования, Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь Минск, 2009,-63с.
30. Турковский С., А. Погорельцев А., И. Преображенская И. Клееные деревянные конструкции с узлами на вклееных стержнях в современном

строительстве (система ЦНИИСК), Из-во: ООО Риф «Стройматериалы», 308 стр, Москва, 2013.

31. Турковский С.Б., Саяпин В.В. Предпосылки расчета на прочность и жесткость соединения колонны с фундаментом на наклонно вклеенных стержнях. Разработка и совершенствование деревянных конструкций: Сб. научных трудов. - М.: ЦНИИСК, 1989.-С. 147-160.
32. Турковский С.Б., Фролов В.И., Белова А.Н. Экспериментальные исследования карнизного узла на вклеенных стержнях сборной деревянной рамы. Разработка и совершенствование деревянных конструкций: Сб. научных трудов. - М.: ЦНИИСК, 1989.-С. 129-138.
33. Флаксерман А. Н. Влияние наклона волокон на механические свойства древесины сосны. М.: ГНТИ, 1931, 48с.
34. Фурсов В.В., Бидаков А.Н., Пазловые соединения фанерных элементов строительных конструкций. // Науковий вісник будівництва: зб. наук. праць. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2014. – Вип. 76. – С. 90-93.
35. Фурсов В.В., Бидаков А.Н., Клеефанерные балки с Х-образной стенкой. // Проектирование, изготовление и монтаж стальных конструкций. Опыт и перспективы развития: сб. науч. трудов «Проектстальконструкція ім. В.М. Шимановського». – 2013. – Т. 12. – С. 88-94.
36. Фурсов В.В., Бидаков А.Н., Новые клефанерные балочные конструкции с Х-образной фанерной стенкой. // Материалы Междунар. научно-технической конференции «Инновационные строительные технологии, теория и практика», посвященной 30-летию юбилею кафедры строительных конструкций. – Оренбург: Издательство ОГУ, 2013. – С. 209-214.
37. Фурсов В.В., Ковлев Н.Н. Безметалльные изоляционные конструкции электро-физических установок// VII Украинская научно-технич. конференция: «Металлические конструкции»: «Взгляд в прошлое и будущее» К. 2004, т.2. Стр. 167-173.

38. Фурсов В.В., Абдурахимов Р.Ф. Исследование безметалльных нагельных соединений растянутых элементов башен объектов электротехнического назначения. //В сб. “Применение пластмасс в строительстве и городском хозяйстве” IV Украинской науч.-техн. конф. Харьков. ХГАГХ.-1996.-с.56-58.
39. Фурсов В.В. Работоспособность деревянных конструкций при различных нагрузках и эксплуатационных воздействиях. // Докторская диссертация. Полтава-1996.-441с.
40. Фурсов В.В., Бидаков А.Н., Распопов Е.А. Прочность вклеенных стержней на выдергивание при осевом нагружении установленных в LVL элементы с однонаправленным расположением шпона. // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського.– 2016. – Випуск 18. – С. 24-32.
41. Фурсов В.В., Абдурахимов Р.Ф. Исследование клееной древесины на местное смятие под углом к волокнам.// III Международный симпозиум “Современные строительные конструкции из металла и древесины”.- ОГАСА.-1997.-с.220-225.
42. Фурсов В.В., Бидаков А.Н., Распопов Е.А. Прочность вклеенных стержней на выдергивание при осевом нагружении установленных в LVL элементы с однонаправленным расположением шпона. // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського.– 2016. – Випуск 18. – С. 24-32.
43. Фурсов В.В., Чередник Д.Л., Абдурахимов Р.Ф. Исследование модуля объемной деформации для клееной древесины // Тезисы докладов 50 науч.-техн. конф. “Повышение эффективности строительства”. - Харьков: ХГТУСА. - 1995.-С.40.
44. Фурсов В.В., Кошмай Н.Д., Ковлев Н.Н. Исследование модуля объемной деформации клееной древесины. //Сб. научных трудов ОГАСА «Современные строительные конструкции из металла и древесины». Одесса., 2006 г., с. 240-246.

45. Фурсов В.В., Абдурахимов Р.Ф., Чередник Д.Л. Исследование объемной деформации древесины при различных условиях загрузки // Науковий вісник будівництва, №2 ХДТУБА, 1998, с. 35-39.
46. Фурсов В.В., Абдурахимов Р.Ф. Исследование клееной древесины на местное смятие под углом к волокнам. // III Международный симпозиум “Современные строительные конструкции из металла и древесины”. - ОГАСА.-1997.-с220.
47. Фурсов В.В., Абдурахимов Р.Ф. Исследование клееной древесины на смятие поперек и под углом к волокнам. // Бюллетень стр. инф. Мин. обороны Украины. №1.-1995.-с.28-31.
48. Фурсов В.В., Чередник Д.Л. Исследование масштабного фактора при испытаниях клееной древесины на сжатие // Бюллетень технической информации. - Харьков: ХП(НИ)И. -1995.- №2.- С.20-22.
49. Alam, P., M. Ansell, and D. Smedley, Effects of Reinforcement Geometry on Strength and Stiffness in Adhesively Bonded Steel-Timber Flexural Beams. Buildings, 2012: p. 231-244.
50. Ali Abdul Jabbar Karim, Johan Lessner, Mehrdad Moridnejad. *Model calibration of a wooden building block*. Degree project, Linnaeus University, Växjö 2013.
51. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-9.1-791 vom 17. Januar 2012: Verbindungen mit faserparallel in Brettschichtholz eingeklebten Stahlstäben. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin.
52. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-9.1-838 vom 21. September 2013: Furnierschichtholz aus Buche zur Ausbildung stabförmiger und flächiger Tragwerke. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin.
53. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, Z-9.1-811, Furnierschichtholz “Ultralam R”, “Ultralam RS” und “Ultralam X”, DIBT, 2015.
54. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-9.1-778 vom 31. Oktober 2012: 2K-EPKlebstoff GSA-Harz und GSA-Härter für das Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffe. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin.

55. ASTM 143-94:2000 Standard test methods for small clear specimens of timber.
56. Blas H. J., Streib J. Buchen-Furnierschichtholz, Bemessungshilfe für Entwurf und Berechnung nach Eurocode 5, Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG, 2. überarbeitete Auflage, 76 s., 2016.
57. Boccadoro L., Frangi A., Experimental analysis on the structural behaviour of timber-concrete composite slabs made of beech-laminated veneer lumber, *Journal of Performance of Constructed Facilities (ASCE)*.
58. Boccadoro L. and Frangi A., “Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken aus Buche”, *Bautechnik*, vol. 92, no. 11, pp. 783–789, 2015.
59. Boccadoro L. and Frangi A., “Experimental analysis on the structural behavior of timberconcrete composite slabs made of beech-laminated veneer lumber”, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 28, no. 6, 2014.
60. Bidakov A., “Strength Properties of CLT by Tension Perpendicular to Grain”. Short Term Scientific Mission (STSM) Report. COST Action FP1402 “Basis of Structural Timber Design” - from research to standards. (COST-STSM-FP1402-101016-080077), Germany, 2016.
61. Boström, L., Method for Determination of the Softening Behaviour of Wood and Applicability of a Nonlinear Fracture Mechanics Model. Report TVBM-1012, Division of Building Materials, Lund University, Sweden, 1992.
62. Bader, T.K., Schweigler, M., Hochreiner, G., Serrano, E., Enquist, B., Dorn, M.: Dowel deformations in multidowel LVL-connections under moment loading. *Wood Mat Sci Eng* 10(3), 216–231, 2015b.
63. Bader, T.K., Schweigler, M., Serrano, E., Dorn, M., Enquist, B., Hochreiner, G.: Integrative experimental characterization and engineering modeling of single-dowel connections in LVL. *Constr Build Mater* 107, 235–246, 2016.

64. Bader, T.K., Schweigler, M., Hochreiner, G., Enquist, B., Dorn, M., Serrano, E.: Experimental characterization of the global and local behavior of multi-dowel LVL-connections under complex loading. *Mater Struct*, pp.1–18, 2015a.
65. Boccadoro L. and Frangi A., “Experimental investigations on timber-concrete composite slabs made of beech laminated veneer lumber with notched connection”, Institute of Structural Engineering ETH Zurich, test report, 2016.
66. Blass, H. and Fellmoser, P. (2004) Design of solid wood panels with cross layers. Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering (Lahti, Finland), pp. 1001-1006.
67. Buck, D, Wang, X, Hagman, O, Gustafsson, A. *Further development of cross-laminated timber (CLT) – mechanical tests on 45° alternating layers*. Proc. World Conference on Timber Engineering, Vienna Austria, 22-25 August 2016.
68. Certificate № 184/03, Kerto-S and Kerto-Q Structural laminated veneer lumber, VTT Expert services ltd., Finland, 2004.
69. Colling F., Bericht der Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle für Holzbau (PUZ-Stelle). Forschungsbericht 2010. Architektur und Bauwesen, s. 73-74.
70. COST Action E13 Wood Adhesion and Glued Products, Working Group 2: Glued Wood Products (2002) State of the Art : Report [Электронный ресурс] / [Editors: Carl Johan Johansson, Tony Pizzi, Marc Van Leemput]. – Режим доступа: <http://users.teilar.gr/~mantanis/E13-Glued-Products.pdf> – Название с экрана. – (Дата обращения 01.12.2016).
71. Davies M. and Fragiaco M., “Long-term behavior of prestressed LVL members. I: Experimental tests”, *Journal of Structural Engineering*, vol. 137, pp. 1553–1561, 2011

72. Daudeville, L., Fracture in spruce: experiment and numerical analysis by linear and nonlinear fracture mechanics. Holz als Roh- und Werkstoff, 57 pp. 425-432, 1999.
73. Denzler J.K., Glos P. (2007): Determination of shear strength values according to EN 408. Materials and Structures 40(1):79–86.
74. DIN EN 1995-1-1/NA:2013. National Annex - Nationally determined parameters - Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Germany.
75. DIN 1052:2008-12, “Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau”.
76. Dissertation, M. Siemers. “Klassifizierung von Brettschichtholzbalken mit Hilfe der Parameteridentifikation”, Kassel, 1998.
77. EN 1995-1-1:2008 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium.
78. Enders-Comberg M., Frese M., Blaß H. J.: “Buchenfurnierschichtholz für Fachwerkträger und verstärktes Brettschichtholz”, Bautechnik, 92 (1), 2015, 9 - 17.
79. Enders-Comberg M., Frese M.: “Buchenfurnierschichtholz – Leistungsmerkmale, Anwendung und Entwicklungsmöglichkeit”, Karlsruher Tage 2014 – Holzbau : Forschung für die Praxis, 09. Oktober – 10. Oktober, 2014, 49 - 65.
80. EN 16351:2015 Timber structures - Cross laminated timber – Requirements. European Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium.
81. EN 14080, Timber structures – Glued laminated timber and glued solid timber – Requirements, European Committee for Standardization (CEN), 2013.

82. EN 14374:2004 Timber structures - Structural laminated veneer lumber – Requirements. European Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium.
83. EN 408:2010 Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. European Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium.
84. Europäische Technische Bewertung ETA-14/0354 vom 20.02.2015: Brettschichtholz aus Laubholz- Buchenfurnierschichtholz für tragende Zwecke. Österreichisches Institut für Bautechnik, Wien.
85. European Committee for Standardization CEN (2003) prEN 1995-2 Eurocode 5—design of timber structures, Part 2: Bridges. Final Project Team draft (Stage 34). Document CEN/TC 250/SC 5: N 198. CEN, Brussels.
86. European Committee for Standardization, EN 789:2004 Timber Structures – Test Methods – Determination of Mechanical Properties of Wood Based Panels, Bruxelles, Belgium.
87. European Committee for Standardization CEN, “prEN 1995-2:2003, Design of timber structures, Part 2: Bridges. Final Project Team draft, Stage 34,” Bruxelles, Belgium, 2003.
88. Frangi, A. et al. (2011). Lignum-Dokumentation Brandschutz. 3.1 Feuerwiderstandsbemessung – Bauteile und Verbindungen. Lignum Holzwirtschaft Schweiz.
89. Frese M, Blaß HJ (2008) Bending strength of spruce glulam – new models for the characteristic bending strength. CIB-W18/41-12-2, St. Andrews by the Sea, Canada.
90. GIROD- Glued in Rods for Timber Structures, SP Rapport 2002:26, Building Technology, Borås 2002.
91. Glos P., Denzler J.K., Characteristic shear strength values based on tests according to EN 1193. In: Proc. of the CIBW18 Meeting 36, Colorado, USA, Paper No. CIB-W18/36-6-1, 2003.

92. Hankinson, R.L. Investigation of crushing strength of spruce at varying angles of grain. U. S. Air Service Information Circular Vol. 3 No. 259, 1921.
93. *Harris S.*, Fire Resistance of Epoxy-grouted Steel Rod Connections in Laminated Veneer Lumber (LVL), Fire Engineering Research Report 04/7, 2004.
94. <http://www.nzwood.co.nz/learning-centre/lvl-research-building/>
95. Johansson C., "Final report : GIROD- Glued-in rods for timber structures," 2002.
96. Kreis B., Frangi A. Zweiachsig tragende Holz-Beton-Verbunddecken aus Buchenfurnierschichtholz.
97. Larsen HJ (2011) The sad story of glued-in bolts in Eurocode 5. Essay 4.3, CIB-W18, A review of meeting 1-43.
98. Meyer, N., Blaß H.J. Fachwerkträger aus Buchenfurnierschichtholz. Bautechnik, 94 (11), s. 751-759, 2017.
99. Meyer, N., Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen in Bauteilen aus Furnierschichtholz aus Buche. Doktorandenkolloquium Holzbau "Forschung und Praxis", 2016, Stuttgart, s. 13 – 20.
100. Meyer, N., Zugbeanspruchte Verbindungen in Buchenfurnierschichtholz. Karlsruher Tage 2016 - Holzbau: Forschung für die Praxis, s.1-18, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2016.
101. Möhler, K.: Grundlagen der Holz- Hochbaukonstruktionen, in Holzbau-Atlas, Institut für intern. Architekturdokumentation, München (1980).
102. *Neuhaus H.*, *Lehrbuch des Ingenieurholzbaus*. Gebundene Ausgabe, 488 p., Teubner Verlag, German, 1994.
103. Newcombe, M. P., Pampanin, S., Buchanan, A., and Palermo, A. 2008b. Seismic design of post-tensioned timber frames. 14th World Conference in Earthquake Engineering, Beijing, China, Paper No. S12-008, pp. 8.
104. Newcombe, M. P. 2008. "Seismic Design of Multistorey Post-Tensioned Timber Buildings," Masters Thesis, University of Pavia, Pavia, Italy.

105. Newcombe, M. P. "Seismic Design of Post-Tensioned Timber Frame and Wall Buildings," Dissertation, University of Canterbury, New Zeland, 2011.
106. New Zealand Design Guide (2007), Timber Industry Federation, NZW14085 SC.
107. Niemz, Peter. *Holzphysik. (Skript zur Vorlesung)*. ETH, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Baustoffe IfB (2006).
108. Ottosen, N. S. and Olsson, K-G., Hardening/Softening Plastic Analysis of Adhesive Joint. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 114(1) pp. 97-116, 1988.
109. *ÖNORM B 1995-1-1:2015 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln für den Hochbau*, (German) Austria, 2015.
110. Palma, P. and A. Frangi (2016). "Fire design of timber connections – assessment of current design rules and improvement proposals". In: *International Network on Timber Engineering Research (INTER) – Proceedings of the 3rd Meeting*. (2016). International Network on Timber Engineering Research (INTER).
111. Prüfbericht 51220-901.6453.000/2, Bestimmung mechanischer und physikalischer Eigenschaften des Furnierschichtholzes ULTRALAM R bestehend aus Furnieren der Holzart Fichte, MPA Stuttgart, 2009.
112. Riberholt H (1988) Glued bolts in glulam—proposals for CIB code. Paper 1-7-2. In: *Proceedings of the 21st conference of CIB-W18*, Parksville, Canada.
113. Ristinmaa, M. and Ottosen, N. S., Large Strain Plasticity and Thermodynamics Solid Mechanics Report TFHF-3072. Solid Mechanics, Lund University, Sweden, 1996.
114. 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, 193p.

115. Serrano, E., Finger-joints for laminated beams. Experimental and numerical studies of mechanical behavior. Report TVSM-3021, Lund University, Division of Structural Mechanics 1997.
116. Serrano, E., Glued-in rods for timber structures. An experimental study of softening behavior. Submitted for publication. Materials and Structures.
117. Serrano E, Steiger R, Lavischi P (2008) Glued-in rods. In: Bonding of timber—core document of the COST Action E34. Lignovisionen Issue 18, pp 31–39.
118. SIA 265:2012 - Timber Structures. SIA Swiss Society of Engineers and Architects, Zurich, Switzerland, 100 p.
119. Statement VTT-S-05156-11, Special lay-ups of Kerto (later on renamed to Kerto-Qp) – Characteristic values, VTT Expert services ltd., Finland, 2010.
120. Stepinac M. Comparison of design rules for glued-in rods and design rule proposal for implementation in European standards [Электронный ресурс] / [Stepinac, Mislav; Hunger, Frank; Tomasi, Roberto; Serrano, Erik; Rajčić, Vlatka; van de Kuilen, Jan-Willem] // CIB-W18 (2013). – Режим доступа: http://costfp1004.holz.wzw.tum.de/fileadmin/tu/wz/costfp1004/CIB_Paper_Stepinac_et_al_-_46-07-10_copy.pdf – Название с экрана. – (Дата обращения 01.12.2016).
121. Stepinac M. Joints in beech-LVL timber frames. Report of a short term scientific mission COST Action FP1004 “Enhance mechanical properties of timber, engineered wood products and timber structures” (2014). [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://costfp1004.holz.wzw.tum.de/fileadmin/tu/wz/costfp1004/2012_05_STSM_report_Stepinac_Mislav.pdf – Название с экрана. – (Дата обращения 01.12.2016).
122. Stepinac M., Rajčić V., Hunger F., J. W. G. van de Kuilen. Glued-in rods in beech laminated veneer lumber. European Journal of Wood and Wood Products, Volume 74, Issue 3, pp 463–466.

123. Steiger R. et al., “Strengthening of timber structures with glued-in rods,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 97, pp. 90–105, Oct. 2015.
124. Steiger R, Gehri E, Widmann R (2007) Pull-out strength of axially loaded steel rods bonded in glulam parallel to the grain. *Mater Struct J* 40(1):69–78.
125. Steiger R.: “In Brettschichtholz eingeklebte Gewindestangen – Stand des Wissens zu einer leistungsfähigen Verbindungstechnik”, 18. Internationales Holzbau-Forum, Tagungsband, 2012.
126. Stüssi, F. (1946) "Holzfestigkeit bei Beanspruchung schräg zur Faser". *Schweizerische Bauzeitung*, Vol 64, Issue 128/20, pp. 251-252.
127. Stüssi, F. (1949) "Holzfestigkeit schräg zur Faser". *Schweizerische Bauzeitung*, Vol 67, Issue 6, p 90.
128. Tlustochowicz G, Serrano E, Steiger R (2011) State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods. *Material and Structures* 44:997-1020.
129. Turkovsky SB (1989) Designing of wood glued structures joint on glued-in bars. Paper 22-7-13. In: *Proceedings of the 22nd conference of CIB-W18*, Berlin, German Democratic Republic.
130. Van Beerschoten W., Palermo A., Carradine D., and Pampanin S., “*Design procedure for long-span post-tensioned timber frames under gravity loading*,” in *Proceedings of the 12th World Conference on Timber Engineering (WCTE '12)*, vol. 1, pp. 354–361, July 2012.
131. Van Beerschoten W., Palermo A., Carradine D., Sarti F., and Buchanan A., "Experimental Investigation on the Stiffness of Beam-Column Connections in Post-Tensioned Timber Frames," *Structural Engineering World Conference*, Como, Italy, 2011.
132. Wanninger F. “Post-tensioned timber frame structures”. Dissertation, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, 2015.
133. Wernersson, H., Fracture characterization of wood adhesive joints. Report TVSM-1006, Lund University, Division of Structural Mechanics 1994.

134. Zarnani P., Quenneville P., *Group tear-out in small-dowel-type timber connections: brittle and mixed failure modes of multinail joints*, J. Struct. Eng. 141 (2) (2014).
135. Z-9.1-837 “Brettschichtholz aus Buchen-Furnierschichtholz”, Pollmeier Furnierwerkstoffe GmbH, Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), 2013, valid until 02.12.2018.
136. Zertifikat der Leistungsbeständigkeit № 0672-CPR-0415, MPA Stuttgart, 2015.

ДОДАТОК А
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ



Міністерство з питань житлово-
комунального господарства
України

Ministry of Regional Development,
Construction Housing
and Communal Services of Ukraine

Державний науково-дослідний
та проектно-вишукувальний
інститут
«НДІПРОЕКТРЕКОНСТРУКЦІЯ»

State Research, Planning
and Surveying Institute

«NDIPROEKTREKONSTRUKTSIA»

РІВНЕНСЬКА ФІЛІЯ

RIVNE BRANCH

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

Матеріали дисертаційної роботи дисертації Распопова Є.А. «Вузлові з'єднання несучих елементів з ЛВЛ» були використані при проектуванні та розрахунку конструкцій будівлі даху при будівництві дитячого садка в с. Оржів Рівненського району на вул. Центральній, 16, який був виконаний з ЛВЛ бруса.

Впровадження запропонованого та дослідженого вузлового з'єднання ЛВЛ бруса на клеєних стержнях, підтвердженого експериментальними дослідженнями, дозволило знизити висоту поперечного перерізу дерев'яних елементів каркасу з ЛВЛ на 32% у порівнянні з висотою клеєної деревини, та виконати конструювання вузлів на клеєних стержнях і їх розрахунок з урахуванням незначної податливості напівжорстких з'єднань. У діючих нормах проектування дерев'яних конструкцій відсутні вказівки не тільки щодо проектування вузлів на клеєних стержнях, але також відсутні вказівки відносно особливостей проектування вузлів елементів з ЛВЛ бруса. Оскільки міцність та жорсткість ЛВЛ бруса до 40% перевищує міцність клеєної деревини, то запропоновані рішення конструкції вузлів та методики їх розрахунку дали змогу додатково зекономити 18% матеріалу у порівнянні з методикою розрахунку, яка використовується для клеєних стержнів у клеєній деревині.

Теоретичні відомості, які викладено у дисертації Распопова Є.А., успішно впроваджені і планується у подальшому використовувати їх в проектній практиці організації.

Директор РФ «НДІпроектреконструкція»

О.М. Кудря

р/р 2600800037663 Філія АТ «Укресімбанк» в м. Рівне, МФО 333539, Инд. под. № 046531926554,

св-во №200048160, код 13993876

вул. І. Вишеньського, 4а, м. Рівне, 33027,
Україна,



4a, Vishenskogo str., Rivne, 33027, Ukraine

тел. +38 (0362) 28 76 87. факс + 38 (0362) 287678

tel +38 (0362) 28 76 87, tel/ fax + 38 (0362) 28 76 78

e-mail: ndirekonstr_rivne@ukr.net

e-mail: ndirekonstr_rivne@ukr.net

ЕООД «КАПСТОРИ БГ»

KAPSTORY BG, Ltd

ЕИК/ПИК 204672307,
БЪЛГАРИЯ

гр. Несебър 82306 Област Бургас, Община Несебър
Ул. «Димитър Занешев», №17, ет.2.

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

Досліджені Распоповим Є.А. вузлові з'єднання ЛВЛ бруса на вклеєних стержнях та міцність ЛВЛ при стиску під різними кутами, які є часткою його дисертаційної роботи «Вузлові з'єднання несучих елементів з ЛВЛ» були використані при проектування конструкцій купольних будинків які будує компанія ЕООД «КАПСТОРИ БГ». Впровадження запропонованого вузлового з'єднання елементів з ЛВЛ бруса дало змогу збільшити прольоти будівель що проектується компанією, використовуючи стики на вклеєних стержнях для з'єднання відправних марок ферм. Також запропонована методика розрахунку міцності вклеєних стержнів та запропоновані правила конструювання впроваджені для підсилення перенавантажених частин елементів конструкцій, у тому числі опорні зони балок довжиною 12-15 м.

Розробки та технічні напрацювання викладені у дисертаційній роботі Распопова Є.А. успішно використовуються у проектах компанії різної складності та надалі будуть поширюватись через високу ефективність запропонованих рішень, враховуючи що ЛВЛ брус є основним будівельним матеріалом компанії.

Директор компанії

ЕООД «КАПСТОРИ БГ»



Т.І. Плисюк

ДОДАТОК Б

ПІДТВЕРЖДЕННЯ ПРО ВИКОРИСТАННЯ ЛІЦЕЗІЙНОГО
РОЗРАХУНКОВОГО КОМПЛЕКСУ ANSYS



61166, Україна, м. Харків, пр. Науки, 9
Телефон +38 (057) 717-57-05
Факс +38 (057) 719-47-30
E-mail water@uhp.kharkov.ua
http www.uhp.kharkov.ua



9 Nauky Avenue, Kharkiv, 61166 Ukraine
Telephone +38 (057) 717-57-05
Fax +38 (057) 719-47-30
E-mail water@uhp.kharkov.ua
http www.uhp.kharkov.ua

Проректору з наукової роботи
Харківського національного
університету міського господарства
ім. О.М. Бекетова
професору М.К. Сухонос

30.11.2018 №Р-654
На №05-444 від 30.11.18

Шановна Марія Костянтинівна!

ПрАТ «Укргідропроект» не заперечує проти використання здобувачем Вашого університету Распоповим Євгеном Анатолійовичем наявного у нас програмного комплексу «ANSYS» (ліцензія 01008608) для проведення ним перевірочних чисельних розрахунків по дисертаційній роботі.

Заступник генерального директора,
д.т.н., професор

О.І. Вайнберг.

