



## ВСТАНОВЛЕННЯ РОЗПОДІЛУ НОРМАЛЬНИХ І ТАНГЕНТАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ У ТЕРМОПЛАСТИЧНИХ ПОЛІВІНІЛАЦЕТАТНИХ КЛЕЙОВИХ З'ЄДНАННЯХ ДЕРЕВИНИ

На підставі аналізу останніх досліджень та публікацій, обґрунтовано вибір термопластичних клеїв, зокрема полівінілацетатних, для склеювання деревини та деревних матеріалів, зважаючи на добрі адгезійні властивості та екологічну безпечність. З'ясовано, що дані щодо міцності та довговічності клейових з'єднань деревини на підставі полівінілацетатних клеїв є необхідними для розширення сфери їх застосування за належних умов експлуатації. Зміни міцності полівінілацетатних клейових з'єднань деревини дуба досліджено шляхом проведення тривалих експериментальних досліджень. Розподіл складових нормальних  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  і тангентальних  $\tau_x$ ,  $\tau_y$  напружень у поперечних перерізах полівінілацетатних клейових з'єднань деревини дуба під час дії на них навантажень подано у вигляді графічних залежностей. Встановлено, що на відстані 0,5 мм від клейового шва компоненти нормального напруження  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  є значно більшими, ніж у клейовому шві та на відстані 1 мм від клейового шва. З'ясовано, що значення тангентальних напружень є значно меншими за нормальні, а розподіл їх складових  $\tau_x$ ,  $\tau_y$  є складним і нерівномірним, як у клейовому шві, так і в приповерхневих зонах (на відстані 0,5 та 1 мм від клейового шва). Особливість розподілу складових тангентальних напружень пояснено характером дифузії клею у тканини деревини з урахуванням шорсткості поверхонь, що, водночас, зумовлює деяку нерівномірність нанесення клею. Отримані результати розподілу радіальних і тангентальних напружень у полівінілацетатних клейових з'єднаннях деревини дуба заплановано використовувати як еталонні для порівняння аналогічних результатів досліджень щодо міцності та довговічності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини.

**Ключові слова:** міцність; довговічність; клейовий шов; термічно модифікована деревина.

### Вступ / Introduction

Для склеювання деревини та деревних матеріалів можна використовувати термореактивні та термопластичні клеї. Термореактивні клеї, а саме фенолоформальдегідні, карбамідоформальдегідні, меламіно-формальдегідні, меламіно-карбамід-формальдегідні, резорцино-формальдегідні формують клейові з'єднання з підвищеною водо-, волого- та термостійкістю і є найпоширенішими клеями, які сьогодні використовуються для склеювання деревини [16, 26, 38]. Однак такі клеї є токсичними та шкідливими для здоров'я людини, здатними поглинати воду, а клейовий шов є крихким [24]. На сьогодні широкого використання набули термопластичні клеї, такі як полівінілацетатні, які мають хороші адгезійні властивості до деревини та деревинних матеріалів і є екологічно безпечними [18, 33]. Проте, за водо- і вологостійкістю клейового з'єднання, вони поступаються термореактивним клеям [19].

Клеї на підставі полівінілацетату із ступенем довговічності D3 і D4, які широко використовуються для склеювання в деревообробній та меблевій промисловостях, є дисперговані у вигляді емульсій і мають досить широке застосування через свої переваги: розчинність у воді, легкість нанесення, низька температура твердіння, задовільні властивості адгезії до деревини та матеріалів на підставі деревини, задовільна водостійкість, термостабільність, нетоксичні, негорючі, конкурентоспроможні [10, 17, 28, 32]. Основним плівкоутворювальною компонентою клею є полівінілацетат (ПВА) – аморфний лінійний або розгалужений полімер, фізико-механічні властивості якого залежать від ступеня розгалуженості полімеру: температура склування полімеру становить 28–42 °С, межа міцності – 20–50 МПа, відносне подовження – 10–20 % та температура розм'якшення – 30–50 °С. Затвердіння відбувається завдяки адсорбції розчинника матеріалами, які піддаються склеюванню, та його випаровуванню, або переходу поліме-

### Інформація про авторів:

**Кшивецький Богдан Ярославович**, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри технологій захисту навколишнього середовища і деревини та безпеки життєдіяльності. Email: bogdan.kshyvetskyi@nltu.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-0315-3702>

**Кіндзера Андріан Романович**, аспірант, кафедра технологій захисту навколишнього середовища і деревини та безпеки життєдіяльності. Email: adriankindzera@gmail.com

**Цитування за ДСТУ:** Кшивецький Б. Я., Кіндзера А. Р. Встановлення розподілу нормальних і тангентальних напружень у термопластичних полівінілацетатних клейових з'єднаннях деревини. Науковий вісник НЛТУ України. 2022, т. 32, № 6. С. 71–77.

**Citation APA:** Kshyvetskyi, B. Ya., & Kindzera, A. R. (2022). Establishing the distribution of normal and tangential stresses in thermoplastic polyvinyl acetate adhesive wooden joints. *Scientific Bulletin of UNFU*, 32(6), 71–77. <https://doi.org/10.36930/40320611>

ру за охолодження із в'язкої рідини у склоподібний стан. Полівінілацетатні клеї бувають одно- та двокомпонентними і здатні формувати лінійну або рідкосітчасту структуру клейового шва. Неструктуровані полівінілацетатні клеї – це однокомпонентні клеї, які формують лінійну структуру клейового шва, а клейове з'єднання відповідає вимогам водостійкості класу D1, D2 згідно з ДСТУ EN 204:2014. Структуровані полівінілацетатні клеї – це одно- та двокомпонентні клеї, які утворюють рідкосітчасту структуру клейового шва, а клейове з'єднання відповідає вимогам водостійкості класу D2, D4 згідно з ДСТУ EN 204:2014.

Клейові з'єднання деревини та деревних матеріалів утворюють складні системи, які під час дії природних факторів (вологи, температури, сонячного опромінення тощо) по-різному змінюють свої фізико-механічні властивості. З'єднання деревини, які склеєні структурованими полівінілацетатними клеями, застосовують як усередині, так і зовні приміщень – у природних умовах за прямої дії вологості повітря і температури навколишнього середовища. Вимоги до таких клеїв і клейових з'єднань упродовж останніх років стають дедалі суворішими. Клеї для дерев'яних конструкцій згідно з EN 1995-1-2:2004 повинні забезпечувати належну міцність та надійність вузлів для збереження цілісності з'єднання на заданий період експлуатації у змінних умовах навколишнього середовища і бути екологічно безпечними [9]. Нормальні та дотичні напруження, що виникають внаслідок дії на клейове з'єднання навантаження, мають різний розподіл у перерізі клейового зразка, а комбінація їх складових та граничні значення визначають кінцеву міцність і довговічність клейового з'єднання.

*Об'єкт дослідження* – дія навантажень на термопластичні полівінілацетатні клейові з'єднання деревини.

*Предмет дослідження* – методи і засоби визначення розподілу нормальних і тангентальних напружень та встановлення їх впливу на міцність та довговічність у термопластичних клейових з'єднаннях деревини.

*Мета роботи* – дослідження розподілу нормальних і тангентальних напружень у термопластичних полівінілацетатних клейових з'єднаннях деревини у відповідних перерізах елементів з'єднання, що стануть основою для вивчення напружень у клейових з'єднаннях термічно модифікованої деревини.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

1. Дослідити розподіл нормальних і тангентальних напружень у клейовому шві термопластичних полівінілацетатних клейових з'єднань деревини дуба у прилеглих зонах до границі "деревина-клей" за дії фізичних навантажень;
2. Виконати експериментальні дослідження щодо міцності та довговічності клейових з'єднань деревини дуба; обґрунтувати термін експлуатації термопластичних полівінілацетатних клейових з'єднань деревини дуба, зважаючи на отримані результати;
3. Проаналізувати термічно модифіковану деревину та вплив її поверхні на міцність склеювання.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Розширення сфери застосування термопластичних полівінілацетатних клейових з'єднань деревини дуба тісно пов'язане із наявністю даних щодо їх міцності та довговічності. Наприклад, автори робіт [11, 15, 25, 27] встановили низку факторів, які впливають на міцність і довговічність клейових з'єднань деревини: 1) хімічні й анато-

мічні характеристики структури деревини та її фізичні властивості (щільність; пористість; міцність; вологість); 2) стан поверхні деревини: орієнтація волокон, шорсткість; проникність щодо адгезиву; 3) характеристики клейової композиції (хімічний і кількісний склад, в'язкість, поверхневий натяг), а також механізм і стани затвердіння (повзучість і жорсткість); 4) умови процесу склеювання (тиск, температура, тривалість твердіння (час)). Ці фактори мають істотний вплив на формування міжфазового зв'язку між клеєм і породою деревини, визначають формувальну міцність клейового шва, а отже – і початкову міцність клейового з'єднання [9].

Автори роботи [5] наголошують на важливості забезпечення належної товщини клейового шва, як ще одного важливого фактору формування та забезпечення міцності і довговічності клейового з'єднання деревини. Дослідження щодо встановлення впливу товщини клейового шва на міцність клейового з'єднання деревини проводили з використанням двох типів клею ПВА (однокомпонентного Rhenocell 3W, 4B Plus, D3 та двокомпонентного Protovil VP244/2C, D4), а для оцінювання міцності з'єднання використовували метод випробування на поперечний розтяг. Встановлено, що для клейових зразків, витриманих упродовж 7 днів за температури  $20^{+2}$  °C та відносної вологості повітря  $65^{+5}$  %, збільшення товщини клейового шва однокомпонентного клею призводить до зменшення міцності з'єднання, тоді як за збільшення товщини клейової лінії двокомпонентного клею спостерігалось збільшення міцності з'єднання, навіть за умов прямого впливу води на з'єднання та підвищених температур.

Отже, для певної породи деревини та обраної клейової композиції можна отримати якісне клейове з'єднання, забезпечивши під час його формування позитивний вплив низки факторів. Зокрема, автори робіт [7, 29] встановили, що більша міцність адгезії для полівінілацетатних з'єднань деревини досягається в тангентальному напрямку, ніж у радіальному. Однак вже у сформованому з'єднанні неминучим є виникнення внутрішніх нормальних і дотичних напружень у деревині, модуль пружності якої вздовж волокон є майже в 40 разів більшим, ніж у поперек, у клейовому шві та на приповерхневих зонах (на границі "деревина-клей"). Отже, аналіз сучасного стану досліджень вказує на потребу ґрунтовного вивчення напружень у клейових з'єднаннях деревини для прогнозування їх міцності за впливу навантажень, адже руйнація з'єднань відбувається за досягнення найбільших значень *нормальних і дотичних напружень*, або їх комбінацій.

**Матеріали та методи дослідження.** Заготовки деревини дуба розмірами  $50 \times 20 \times 20$  та  $50 \times 20 \times 10$  мм згідно із стандартом. Вади у заготовках не допускалися. Перед склеюванням зразки піддавались акліматизації за температури  $20^{+2}$  °C і відносної вологості  $65^{+5}$  %. Вологість зразків під час склеювання становила  $10^{+2}$  %, шорсткість – 63 мкм. Форму та розміри склеєних зразків деревини дуба наведено на рис. 1.

Зразки були склеєні термопластичними полівінілацетатними клеями відповідно до стандарту ДСТУ EN 204:2014. Склеювання проводили методом холодного пресування за температури  $20^{+2}$  °C. Технологічні параметри режиму склеювання: витрата клею –  $160 \text{ г/м}^2$ ; тривалість відкритої витримки – 7-10 хв; питомий тиск пресування – 0,6 МПа; тривалість пресування – 40 хв.

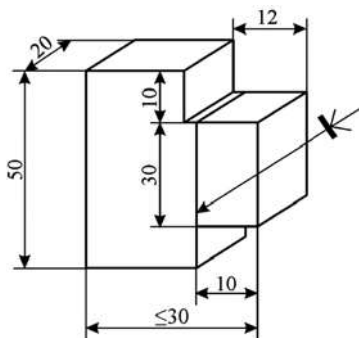


Рис. 1. Форма та розміри склеєних зразків деревини дуба / Shape and dimensions of bonded oakwood samples

Дослідження здійснювали у природних атмосферних умовах західного регіону України впродовж трьох років до повного руйнування останнього зразка. Для склеювання деревини використовували неструктурований (D2) та структурований (D4) полівінілацетатний клей. Зразки піддавали випробуванню через 78 год з моменту склеювання.

Усі зразки, використані для дослідження, були розділені на дві частини: контрольні та ті, які піддавались атмосферним випробуванням. Контрольні зразки зберігалися в приміщенні за температури  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , відносної вологості повітря  $65 \pm 5\%$  і не піддавались атмосферному впливу. Другу частину зразків випробовували у природних атмосферних умовах за перепадів температури від  $-20$  до  $+33^\circ\text{C}$  і вологості від 40 до 100 %, шляхом розміщення на стенді та виставлення на дослідному майданчику відповідно до вимог. Через кожні півроку атмосферних випробувань (6, 12, 18, 24, 30 і 36 місяців), зразки піддавали руйнуванню, шляхом їх сколювання вздовж волокон, з подальшою статистичною та математичною обробкою даних.

Випробування зразків на сколювання вздовж волокон деревини проводили за допомогою розривної машини 2166 P-5, що дає змогу фіксувати результати випробувань зі швидкістю 0,01 с, а за допомогою ЕОМ виконувати потрібні розрахунки з урахуванням площі склеювання.

## Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Результати випробувань показали, що клейові з'єднання втрачають міцність через перепади температури та вологості. Зміну міцності клейових з'єднань деревини дуба під впливом атмосферних факторів упродовж періоду випробувань наведено у вигляді експериментальних кривих (рис. 2).

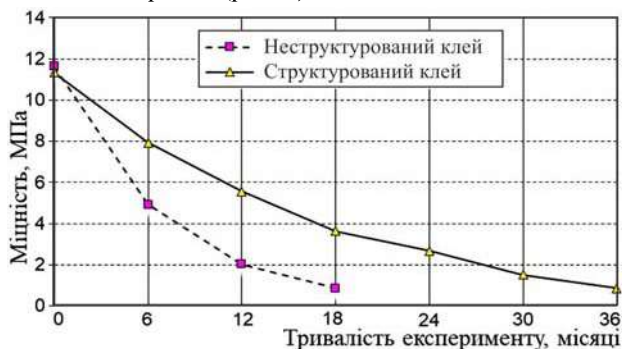


Рис. 2. Зміна міцності клейових з'єднань деревини дуба під впливом атмосферних факторів за період випробувань / Changes in the strength of the oak wood adhesive joints under the influence of atmospheric factors during the tested period

З отриманих даних можна спостерігати зниження міцності клейових з'єднань за період випробувань. Результати досліджень показали, що інтенсивніше міцність зменшується у періоди різких перепадів температури та вологості середовища. Експериментальним шляхом встановлено, що клейове з'єднання деревини дуба на підставі неструктурованого клею з класом водостійкості D2 витримує навантаження 18 місяців із залишковою міцністю 0,97 МПа, а клейове з'єднання на підставі структурованого клею з класом водостійкості D4 – навантаження 36 місяців із залишковою міцністю 0,85 МПа.

На підставі результатів експериментальних досліджень, їх статистичного оброблення та математичного моделювання отримано результати розподілу складових нормальних напружень у поперечному перерізі клейового з'єднання деревини дуба, які подано у вигляді графічних залежностей (рис. 3 і 4, відповідно). Графічні залежності показують розподіл складових нормальних напружень  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$  у клейовому шві та на границі "деревина-клей", а також на відстані 0,5 та 1,0 мм від склеєної ділянки.

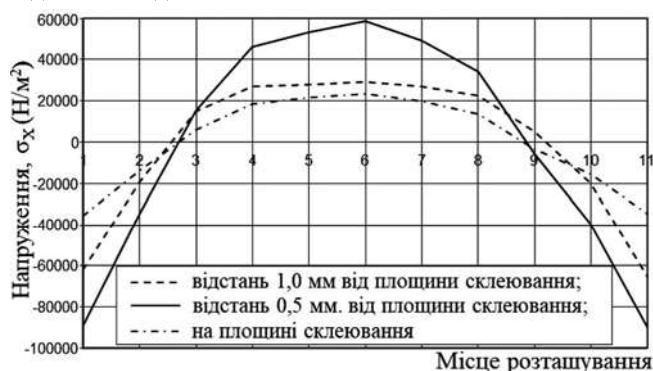


Рис. 3. Розподіл складової нормальних напружень  $\sigma_x$  / Distribution of the normal stress component  $\sigma_x$

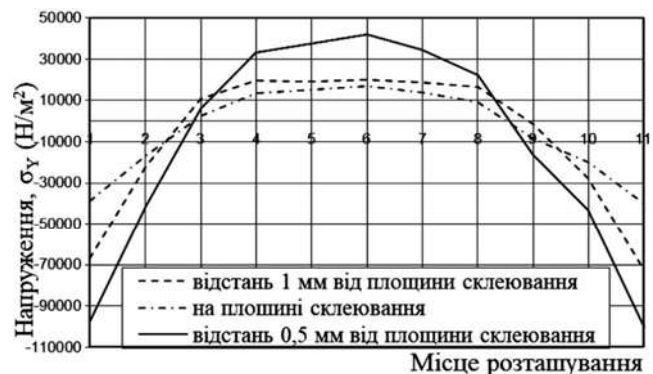


Рис. 4. Розподіл складової нормальних напружень  $\sigma_y$  / Distribution of the normal stress component  $\sigma_y$

Проаналізувавши графічні залежності (див. рис. 3 і 4), з'ясовано, що у поперечному перерізі клейового зразка відбувається зміна складових нормальних напружень  $\sigma_x$  і  $\sigma_y$  у клейовому шві, а також на відстані 0,5 та 1,0 мм від склеєної ділянки. Величини складових нормальних напружень зростають у міру наближення до центральної осі зразка і набувають максимальних значень у середній частині геометричного перерізу (руйнівний характер нормальних напружень). Нерівномірний розподіл  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$  зумовлений впливом анізотропії та механічних і теплофізичних властивостей деревини та клею (модулі Юнга та Пуассона), а також нерівномірністю проникнення клею в деревину на ділянці

склеювання. Для приповерхневих зон (на відстані 0,5 мм від клейового шва), компоненти нормального напруження  $\sigma_x$  і  $\sigma_y$  є значно більшими, ніж аналогічні компоненти у клейовому шві та на відстані 1 мм від клейового шва, що можна пояснити виникненням напружень при стиску, зумовлених різними значеннями коефіцієнтів усадки деревини та клею. Еластичність клейової плівки дає змогу розслабити напруження у клейовому шві, цим самим передаючи частину напруження деревині (компенсувати напруження у клейовому шві під час експлуатації зразка, цим самим покращити його формостійкість). Це позитивно впливає на міцність клейового з'єднання.

На рис. 5 та 6 показано компоненти дотичних (тангентальних) напружень  $\tau_x$  та  $\tau_y$  для клейових з'єднань деревини у клейовому шві, на відстані 0,5 та 1,0 мм від клейового шва, відповідно.



Рис. 5. Розподіл складової тангентальних напружень  $\tau_x$  / Distribution of the tangential stress component  $\tau_x$

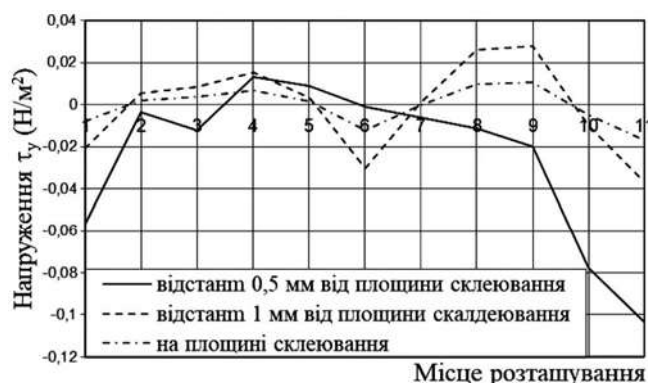


Рис. 6. Розподіл складової тангентальних напружень  $\tau_y$  / Distribution of the tangential stress component  $\tau_y$

Проаналізувавши графічні залежності щодо складових тангентальних напружень  $\tau_x$  та  $\tau_y$  (див. рис. 5 та 6), встановлено складний і нерівномірний розподіл у клейовому шві та приповерхневих зонах (на відстані 0,5 та 1 мм від клейового шва). Особливо складним і нерівномірним є розподіл тангентальних напружень  $\tau_x$  у зоні клейового шва, що зумовлено нерівномірністю розподілу клею, характером дифузії, шорсткістю поверхонь деревини. Загалом тангентальні напруження є значно меншими, але складнішими за нормальні. Складність та нерівномірність розподілу складових тангентальних напружень  $\tau_x$  та  $\tau_y$  свідчить про складний характер процесу зміни напружено-деформованого стану та його невизначеність.

Завдання забезпечення міцності та довговічності ще більшою мірою є актуальним для клейових з'єднань термомодифікованої деревини, адже виробі та конструкції з такої деревини, завдяки позитивним власти-

востям, широко використовуються в сучасному деревообробному та меблевому виробництві. Унаслідок термічного модифікування в деревині відбуваються незворотні фізико-хімічні перетворення, які залежать від режимних параметрів процесу (температури, тиску) та породи деревини, що сприяють покращенню низки показників: збільшення біологічної стійкості; формо- та розміростабільності; стійкості до деформацій; вологостійкості; довговічності; зниження теплопровідності та рівноважної вологості тощо [3, 8, 30]. Унаслідок термічного модифікування отримують деревину з новими характеристиками, що зумовлює розширення можливості її експлуатації за складних умов. Однак спостерігається погіршення деяких інших характеристик термодеревини, а саме: зменшення щільності і міцності, підвищення крихкості [21]. Зокрема, автор роботи [12] встановив, що термічне модифікування неоднозначно впливає на механічні властивості деревини граба. У зразків, модифікованих за температури 190 °C, межа міцності при стиску поперек волокон зменшується на 65 %, а межа міцності при стиску вздовж волокон і при статичному згині зростає на 48 %.

Для отримання заготовок і деталей потрібних розмірів, для з'єднання деталей у складальні одиниці та вузли термодеревину необхідно склеювати, використовуючи для цього термореактивні та термопластичні клеї. Як відомо, основними вимогами для клейових конструкцій є експлуатаційна надійність, яка передусім забезпечується міцністю і довговічністю. Однак, як показали результати досліджень авторів робіт [12, 14, 21, 39], клейові з'єднання термодеревини не є достатньо міцними, надійними та довговічними, що вказує на один із найістотніших недоліків термодеревини – погіршення її здатності до склеювання. Зокрема, автори роботи [14] встановили середні значення міцності клейових з'єднань термодеревини ясеня, сформованих за допомогою клею на підставі ПВА дисперсії з класом довговічності D3: 3,45 МПа – для деревини, обробленої за температури 160 °C упродовж 4-х год та 6,34 МПа – для обробленої за температури 220 °C упродовж 4-х годин. Отримані значення міцності клейових з'єднань термодеревини ясеня є меншими, порівняно із міцністю клейового з'єднання необробленої деревини, на 68,5 та 42,1 %, відповідно.

Здатність до склеювання різних порід термічно модифікованої деревини на сьогодні є малодослідженою. Однак, очевидно, що саме стан поверхні термодеревини визначає її клейову здатність. Оскільки деревина є полімерним композиційним матеріалом, то процес термічного модифікування – це низка складних фізико-хімічних перетворень її структурних компонент (геміцелюлози, целюлози і лігніну) [1, 31]. Унаслідок термічного модифікування відбуваються незворотні зміни у структурі клітинних стінок і внутрішньоклітинному просторі деревини на молекулярному рівні, зумовлені розкладанням геміцелюлози та аморфної частини целюлози на низькомолекулярні речовини, деполімеризацією частини целюлози та лігніну [39, 40]. Ступінь цих перетворень залежить, в основному, від температури процесу термічного модифікування. Термічне модифікування призводить до лігніфікації деревини – переполімеризація лігніну супроводжується його перерозподілом у клітинних стінках та за об'ємом клітин деревини. Переполімеризований лігнін надає стінкам клітин більшої щільнос-

ті, твердості, підвищує їх гідрофобність і, заповнюючи внутрішню порожнину клітин, сприяє формуванню закритопористої структури термомодифікованої деревини.

Отже, внаслідок термічного модифікування, змінюється загальна структура деревини, що зумовлює зміну її фізико-механічних характеристик, а також структура поверхні, яка буде піддаватися склеюванню.

**Обговорення результатів дослідження.** Зважаючи на наведене вище, логічним є пояснення, що зменшення здатності термодеревини утворювати міцні клейові з'єднання зумовлене термічною деструкцією деревини з формуванням закритопористої структури її поверхні, що збільшує її гідрофобність та зменшує проникність клейової композиції у її структуру [22, 37]. Зниження адгезійних властивостей поверхні термічно модифікованої деревини, відзначене авторами робіт [2, 4, 6, 23, 34], що супроводжується зменшенням інтенсивності проникнення водорозчинного клею, зокрема ПВА, у структуру деревної поверхні, негативно впливає на процес його затвердіння та формування клейового шва належної міцності і, як наслідок – на якість клейового з'єднання. Автори роботи [37] підтвердили істотне зниження міцності на зсув клейових з'єднань ламелей ялини, термічно модифікованих за температури 220 °C упродовж 4-х год, та склеєних поліуретановим та ПВА клеями: міцність клейового з'єднання зменшилась на 56,1 % у разі застосування поліуретанового клею та на 42,3 % – у разі застосування клею ПВА.

Отже, дослідження щодо клейових з'єднань термодеревини можна спрямувати на пошук способів покращення адгезійних властивостей поверхні модифікованої деревини, яка піддаватиметься склеюванню. Можливими шляхами є збільшення пористості поверхні та підвищення змочуваності, що можливо здійснити шляхом хімічного модифікування чи термічною активацією за допомогою УФ-випромінювання, яке є здатним руйнувати лігніновмісні утворення [35]. Покращення склеювання можна досягнути також збільшенням шорсткості поверхні термічно модифікованої деревини [13, 20].

Виявлено позитивний фактор у забезпеченні міцності клейового з'єднання термомодифікованої деревини, а саме, формостабільність модифікованої деревини сприяє підвищенню міцності клейового з'єднання, оскільки зменшуються напруження, що виникають внаслідок усадки чи набухання затверділого клейового шва [36]. Отже, зважаючи на зменшення напружень у клейовому шві та практично повну відсутність внутрішніх напружень у термічно модифікованій деревині, розподіл напружень у поперечному перерізі клейового з'єднання термомодифікованої деревини характеризуватиметься своїми особливостями, тому потребує додаткового вивчення та дослідження.

Результати нашого дослідження щодо розподілу складових напружень у клейових з'єднаннях деревини дуба (див. рис. 3–6) слугуватимуть еталоном для порівняння аналогічних результатів для клейових з'єднань термомодифікованої деревини. Надалі результати розподілу напружень у клейових з'єднаннях термомодифікованої деревини можуть бути застосованими для розроблення способів компенсації напруження у клейовому шві під час експлуатації зразка, зокрема, шляхом досягнення більшої еластичності клейової плівки чи перерозподілу складових напружень внаслідок збільшення

проникності клейової композиції у структуру додатково обробленої термічно модифікованої деревини.

Отримані результати щодо зміни міцності клейових з'єднань деревини дуба під впливом атмосферних факторів із зазначенням залишкової міцності у встановлений кінцевий термін експлуатації (див. рис. 2) дадуть змогу розширити сферу застосування клейових конструкцій з деревини дуба. Зважаючи на те, що у нормативних документах практично відсутні посилання на фактор часу (довговічність) для клейових з'єднань з модифікованої деревини, що призводить до неадекватного їх оцінювання в процесі експлуатації, отримання аналогічних результатів для з'єднань з термічно модифікованої деревини має обґрунтовану практичну цінність, а результати, подані на рис. 2, будуть використаними для порівняння отриманих значень міцності та довговічності.

Отже, за результатами виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

*Наукова новизна отриманих результатів дослідження* – набули подальшого розвитку теоретичні основи розподілу нормальних і тангентальних напружень у термопластичних клейових з'єднаннях деревини.

*Практична значущість результатів дослідження* – отримані результати досліджень будуть використані у технологічному процесі під час склеювання немодифікованої і термічно модифікованої деревини термопластичними клеями.

## Висновки / Conclusions

Встановлений розподіл нормальних і тангентальних напружень у термопластичних полівінілацетатних клейових з'єднаннях деревини відповідає зазначеній меті досліджень, а отримані результати дали змогу зробити такі висновки:

1. Для вивчення розподілу нормальних і тангентальних напружень використано тривалі експериментальні дослідження зміни міцності та довговічності термопластичних полівінілацетатних клейових з'єднань деревини дуба, методи статистичного оброблення та математичного й імітаційного моделювання.
2. Експериментально встановлено, що термін експлуатації термопластичних полівінілацетатних клейових з'єднань деревини дуба із ступенем довговічності D2 становить 18 місяців із залишковою міцністю 0,97 МПа, а із ступенем довговічності D4 – 36 місяців із залишковою міцністю 0,85 МПа.
3. Отримано розподіл нормальних і тангентальних напружень та вивчено їх вплив на міцність і довговічність термопластичних полівінілацетатних клейових з'єднань деревини дуба.
4. Отримані результати досліджень та розподілу радіальних і тангентальних напружень у термопластичному полівінілацетатному клейовому з'єднанні деревини дуба будуть використані для досліджень міцності та довговічності клейових з'єднань термічно-модифікованої деревини.

## References

1. Andrashek, Y., & Shchupakivsky, R. (2012). Analysis of changes in mechanical properties of thermally modified wood maple (*Acer pseudoplatanus* L.) and spruce (*Picea abies* K.) by examining its porous structure. *Scientific Bulletin of UNFU*, 22(1), 97–100. [In Ukrainian].
2. Baar, J., Brabec, M., Slávik, R., & Čermák, P. (2020). Effect of hemp oil impregnation and thermal modification on European be-

- ech wood properties. *European Journal of Wood and Wood Products*, 1, 161–175. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01615-9>
3. Barcik, Š., Gašparik, M., & Razumov, E. (2015). Effect of temperature on the color changes of wood during thermal modification. *Cellulose Chemistry and Technology*, 49, 789–798.
4. Bekhta, P., Sedláčik, J., & Jones, D. (2018). Effect of short-term thermomechanical densification of wood veneers on the properties of birch plywood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(2), 549–562. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1233-4>
5. Bomba, J., Šedivka, P., Hýsek, Š., Fáber, J., & Oberhofnerová, E. (2018). Influence of glue line thickness on the strength of joints bonded with PVAc adhesives. *Forest Products Journal*, 68(2), 120–126. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-17-00038>
6. Budhe, S., Banea, M. D., Ghugal, S., & De Barros, S. (2020). Effects of heat treatment on the behavior of teak wood adherends bonded joints. *Applied Adhesion Science*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40563-020-00124-5>
7. Burdurlu, E., Kilic, Y., Elibol, G. C., & Kilic, M. (2006). The shear strength of Calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) bonded with polyurethane and polyvinyl acetate adhesives. *Journal of Applied Polymer Science*, 99, 3050–3061. <https://doi.org/10.1002/app.23000>
8. Cao, Y., Lu, J., Huang, R., Zhao, Y., & Wu, Y. (2011). Evaluation of decay resistance for steam-heat-treated wood. *Bioresources*, 6(4), 4696–4704.
9. Custodio, J., Broughton, J., & Cruz, H. (2011). A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 29, 173–185. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.03.002>
10. Fang, Q., Cui, H., & Du, G. (2013). Preparation and characterization of PVAc–NMA–MMT. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 26(10), 1393–1406. <https://doi.org/10.1177/089270571246164>
11. Follrich, J., Teischinger, A., Gindl, W., & Müller, U. (2007). Tensile strength of softwood butt end joints. Effect of grain angle on adhesive bond strength. *Wood Material Science & Engineering*, 2(2), 83–89. <https://doi.org/10.1080/17480270701841043>
12. Gorbachova, O. (2016). Shchodo vplyvu termichnoho modyfikuvannya na vlastyvoli derevyny hraba. *Lisove i sadovo-parkove hospodarstvo*, 9. [In Ukrainian].
13. Hass, P., Kläusler, O., Schlegel, S., & Niemz, P. (2014). Effects of mechanical and chemical surface preparation on adhesively bonded wooden joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 51, 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.02.014>
14. Ilkiv, M., Solonyk, V., Humenyuk, Zh., & Huber, Yu. (2017). The research of the strength of ash thermowood adhesive joints treated by vacuum-conductive thermal processing technology. *Scientific Bulletin of UNFU*, 27(3), 136–139. [In Ukrainian].
15. Iždinský, J., Reinprecht, L., Sedláčik, J., Kúdela, J., & Kucerová, V. (2021). Bonding of Selected Hardwoods with PVAc Adhesive. *Applied Science*, 11, 67. <https://dx.doi.org/10.3390/app11010067>
16. Jin, Y., Cheng, X., & Zheng, Z. (2010). Preparation and characterization of phenol-formaldehyde adhesives modified with enzymatic hydrolysis lignin. *Bioresource Technology*, 101, 2046–2048. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.085>
17. Kaboorani, A., & Riedl, B. (2011). Effects of adding nano-clay on performance of polyvinyl acetate (PVA) as a wood adhesive. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(8), 1031–1039. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.04.007>
18. Kaboorani, A., Riedl, B. (2011). Improving performance of Polyvinyl Acetate (PVA) as a binder for wood by combination with Melamine based adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31, 605–611. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.06.007>
19. Khan, U., May, P., Porwal, H., Nawaz, K., & Coleman, J. (2013). Improved adhesive strength and toughness of Polyvinyl Acetate glue on addition of small quantities of Graphene. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5, 1423–1428. <https://doi.org/10.1021/am302864f>
20. Knorz, M., Neuhauser, E., Torno, S., & Van De Kuilen, J. W. (2015). Influence of surface preparation methods on moisture-related performance of structural hardwood-adhesive bonds. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 57, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.10.003>
21. Kshyvetskyi, B., Datskiv, H., & Andrashek, Yo. (2019). General information about adhesives, gluing, and thermally modified wood. *Scientific Bulletin of UNFU*, 29(3), 81–84. <https://doi.org/10.15421/40290317>
22. Kučerová, V., Lagaňa, R., & Hýrošová, T. (2019). Changes in chemical and optical properties of silver fir (*Abies alba* L.) wood due to thermal treatment. *Journal of Wood Science*, 65(1), 21–31. <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1800-x>
23. Kúdela, J., Lagaňa, R., Andor, T., & Csiha, C. (2020). Variations in beech wood surface performance associated with prolonged heat treatment at 200°C. *Acta Facultatis Xylogiae Zvolen*, 62(1), 5–17. <https://doi.org/10.17423/afx.2020.62.1.01>
24. Lebkowska, M., Załęska-Radziwiłł, M., & Tabernacka, A. (2017). Adhesives based on formaldehyde – Environmental problems. *BioTechnologia*, 98, 53–65. <https://doi.org/10.5114/bta.2017.66617>
25. Li, R., Guo, X., Ekevad, M., Marklund, B., & Cao, P. (2015). Investigation of glue line shear strength of pine wood bonded with PVAc by response surface methodology. *BioResources*, 10(3), 3831–3838. <https://doi.org/10.15376/biores.10.3.3831-3838>
26. Manabendra, D., Saikia, C., & Baruah, K. (2000). Treatment of wood with thermosetting resins: Effect on dimensional stability, strength and termite resistance. *Indian Journal of Chemical Technology*, 7(6), 312–317.
27. McKinley, P., Kamke, F. A., Sinha, A., De Andrade, V., & Jakes, J. E. (2018). Analysis of adhesive penetration into wood using nano-X-ray computed tomography. *Wood and Fiber Science*, 50(1), 66–76.
28. Minelga, D., Ukvalbergienė, K., Norvydas, V., Buika, G., & Dubininkas, M. (2010). Impact of aliphatic isocyanates to PVA dispersion gluing properties. *Material Science*, 16(3), 217–220.
29. Özçifçi, A., & Yapici, F. (2008). Effects of machining method and grain orientation on the bonding strength of some wood species. *Journal of Materials Processing Technology*, 202, 353–358.
30. Pinchevska, O., Holovach, V., & Gorbachova, O. (2014). Some physical and mechanical properties of thermomodified wood. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil'skoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka*, 147, 3–9. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtsug\\_2014\\_147\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtsug_2014_147_3). [In Ukrainian].
31. Pinchevska, O., Likhanov, A., & Gorbachova, O. (2015). Zminy v khimichniy strukturi i kol'ori derevyny hraba pislya termichnoho modyfikuvannya. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil'skoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka*, 3, 186–191. [In Ukrainian].
32. Qiao, L., & Easteal, A. (2001). Aspects of the performance of PVAc adhesives in wood joints. *Pigment & Resin Technology*, 30(2), 79–87. <https://doi.org/10.1108/03699420110381599>
33. Qiao, L., Easteal, A. J., Bolt, C. J., Coveny, P. K., & Franich, R. A. (2000). Improvement of the water resistance of poly (vinyl acetate) emulsion wood adhesive. *Pigment & Resin Technology*, 29(3), 152–158. <https://doi.org/10.1108/03699420010334303>
34. Reinprecht, L., Tiño, R., & Šomšák, M. (2020). The impact of fungicides, plasma, UV-additives and weathering on the adhesion strength of acrylic and alkyd coatings to the Norway spruce wood. *Coatings*, 10(11), 1111–1126. <https://doi.org/10.3390/coatings10111111>
35. Safin, R., Shaikhutdinova, A., Khasanshin, R., Mukhametzyanov, S., & Safina, A. (2021). Increasing the strength of the glue line in the production of thermally modified wood paneling. *Coatings*, 11(2), 253–266. <https://doi.org/10.3390/coatings11020253>
36. Sernek, M., Boonstra, M., Pizzi, A., Despres, A., & Gerardin, P. (2008). Bonding performance of heat treated wood with structural adhesives. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 66, 173–180. <https://doi.org/10.1007/s00107-007-0218-0>
37. Vidholdová, Z., Ciglian, D., & Reinprecht, L. (2021). Bonding of the thermally modified Norway spruce wood with the PUR and PVAc adhesives. *Acta Facultatis Xylogiae Zvolen*, 63, 63–73. <https://doi.org/10.17423/afx.2021.63.1.06>

38. Wei, Q., Shujun, L., & Fengying, X. (2016). Preparation and Characterization of a phenol-formaldehyde resin adhesive obtained from bio-ethanol production residue. *Polymers & Polymer Composites*, 24(2), 99–105. <https://doi.org/10.1177/096739111602400>
39. Xing, D., & Li, J. (2014). Effects of heat treatment on thermal decomposition and combustion performance of larch spp. wood. *Bioresources*, 9(3), 4274–4287.
40. Yalçın, M., & Ibrahim, H. (2015). Changes in the chemical structure and decay resistance of heat-treated narrow-leaved ash wood. *Maderas, Cienc. Technology*, 17(2), 435–446. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000040>

**B. Ya. Kshyvetskyi, A. R. Kindzera**

*Ukrainian National Forestry University, Lviv, Ukraine*

## **ESTABLISHING THE DISTRIBUTION OF NORMAL AND TANGENTIAL STRESSES IN THERMOPLASTIC POLYVINYL ACETATE ADHESIVE WOODEN JOINTS**

The expansion of the application scope of thermoplastic polyvinyl acetate adhesive joints of wood is closely related to the availability of information on their strength and durability. Strength changes of thermoplastic polyvinyl acetate adhesive joints of oak wood were investigated by conducting long-term experimental studies. The results of experimental studies were statistically processed, and the service life of adhesive joints based on structured and non-structured adhesives with water resistance classes D2 and D4 was substantiated. By using the mathematical simulation, the distribution of normal stresses  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ , and tangential  $\tau_x$ ,  $\tau_y$  in thermoplastic polyvinyl acetate adhesive joints of oak wood was investigated. It was established, that normal and tangential stresses arising from the action of the load on the adhesive joint have a different distribution in the cross-section of the adhesive sample, and the combination of their components and limit values determine the ultimate strength and durability of the adhesive joint. It was established that the values of the normal stress components  $\sigma_x$  and  $\sigma_y$  increase as they approach the central axis of the sample and reach their maximum values in the middle part of the geometric section. For near-surface zones (at a distance of 0.5 mm from the adhesive seam), the normal stress components  $\sigma_x$  and  $\sigma_y$  are significantly larger than the similar components in the adhesive seam and at a distance of 1 mm from the adhesive seam. The tangential stresses are much smaller than normal, however, the distribution of the tangential stress components  $\tau_x$ ,  $\tau_y$  is complex and uneven in the adhesive seam and the near-surface zones (at a distance of 0.5 and 1 mm from the adhesive seam), which is due to the uneven distribution of the adhesive, nature of diffusion, the roughness of wood surfaces. Experimental data and mathematical simulation of radial and tangential stress distribution in thermoplastic polyvinyl acetate adhesive joints of oak wood are indicative and necessary for adhesive joint of thermally modified wood strength and durability research.

**Keywords:** strength; durability; adhesive seam; thermally modified wood.