



А. Р. Кіндзера, Б. Я. Кшивецький

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ КЛЕЙОВИХ З'ЄДНАНЬ ДЕРЕВИНИ ВІЛЬХИ ІЗ ТЕРМІЧНО МОДИФІКОВАНОЮ ДЕРЕВИНОЮ ЯСЕНА

З'ясовано, що висока вартість термічно модифікованої (ТМ) деревини ясеня зумовлює потребу в створенні комбінованих деревинних конструкцій, в яких методом склеювання ТМ поверхня поєднується із деревиною менш цінних порід деревини, зокрема – вільхи. Досліджено міцність 12 серій клейових з'єднань "ТМ ясен – вільха", сформованих із застосуванням полівінілацетатних (ПВА) клеїв класу довговічності D4 – однокомпонентного (ПВА^I) та двокомпонентних (ПВА^{II} та ПВА^{III}), а також чотирьох тривалостей пресування (0,5, 2, 4 та 6 год). За тривалості пресування 0,5 год для відповідних серій зразків зафіксовано низькі значення середньої міцності (3,10 МПа – за використання клею ПВА^I, 3,59 та 4,45 МПа – за використання клеїв ПВА^{II} та ПВА^{III} відповідно), також встановлено характер руйнування – по клейовому шву в разі застосування клеїв ПВА^I та ПВА^{II}, та змішаний в разі застосування клею ПВА^{III}, що, загалом, свідчило про низьку якість з'єднань. Встановлено, що збільшення тривалості пресування до 2 та 4 год сприяло істотному підвищенню середніх значень міцності відповідних серій зразків, що супроводжувалося зміною характеру їх руйнування. Подовження пресування до 6 год забезпечило тільки незначне зростання середньої міцності серій зразків, проте максимізувало частку руйнувань по ТМ ясеня (до 93 % – для ПВА^I, 97 % – для ПВА^{II}, 100 % – для ПВА^{III}), що свідчило про високу якість зразків. На основі аналізу отриманих результатів зроблено висновок про те, що продовження пресування понад 6 год є недоцільним, оскільки обмежувальним чинником міцності клейових з'єднань "ТМ ясен – вільха" стає когезійна міцність ТМ деревини ясеня. Встановлено, що клейові з'єднання "ТМ ясен – вільха", сформовані за участі двокомпонентних клеїв ПВА^{II} та ПВА^{III} та за тривалості пресування 6 год, після третього етапу температурно-вологісних випробувань зберігали середню міцність понад 4 МПа (4,19 та 4,64 МПа, відповідно). Зазначене свідчить про ефективність застосування обраних для дослідження двокомпонентних клейових композицій для формування волого- та термостійких клейових з'єднань за участі ТМ деревини ясеня та вільхи та вказує на можливості експлуатації таких з'єднань за умов навколишнього середовища.

Ключові слова: полівінілацетатні (ПВА) клеї; тривалість пресування; характер руйнування; якість з'єднання; середня міцність; температурно-вологісні навантаження.

Вступ / Introduction

Використання термічно модифікованої (ТМ) деревини ясеня (*Fraxinus excelsior* L.), що відзначається поліпшеними експлуатаційними характеристиками [2, 5, 19], створює нові можливості для виготовлення дерев'яних конструкцій, здатних тривалий час протистояти впливу факторів навколишнього середовища. Разом із тим, висока вартість ТМ деревини стримує її широке застосування та актуалізує потребу в розробленні економічно обґрунтованих конструктивних рішень, одним із яких є формування комбінованих деревинних конструкцій шляхом склеювання ТМ ясеня з деревиною вільхи.

У промисловій практиці для склеювання термічно модифікованої деревини здебільшого застосовують клеї, первинно розроблені для немодифікованої деревини. До них належать насамперед термореактивні клеї [9, 23, 25] – фенол-формальдегідні, меламін-формальдегідні, карбамід-формальдегідні, меламін-карбамід-формальдегідні, резорцин-формальдегідні, затвердіння яких від-

бувається за підвищених температур, що реалізується за умов гарячого пресування. Хоча зазначені клеї здатні забезпечувати формування міцних з'єднань, а за модифікованого складу – формувати з'єднання з підвищеною волого- та термостійкістю, однак, мають низку екологічних обмежень, пов'язаних насамперед із підвищеною емісією вільного формальдегіду [17].

Серед термореактивних клейових систем значного поширення набули поліуретанові клеї [24], які забезпечують високу міцність та еластичність клейових з'єднань, добру адгезію до деревини зі зниженою змочуваністю, а також підвищену стійкість до дії вологи й температурних коливань. Однак, для зазначених клеїв характерні висока вартість та помірна токсичність.

Загалом, наведені обмеження термореактивних клейових систем – екологічні ризики, висока енергоємність процесів гарячого пресування, а для окремих видів клеїв – чутливість до вологісних умов або висока вартість – істотно звужують можливості їх ефективного застосування для склеювання термічно модифікованої деревини.

© Copyright 2026 by the author(s)

Кіндзера Адріан Романович, аспірант, кафедра технологій захисту навколишнього середовища і деревини та безпеки життєдіяльності. Email: adriankindzera@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-3047-0106>

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

Цитування за ДСТУ: Кіндзера А. Р., Кшивецький Б. Я. Результати експериментального дослідження міцності клейових з'єднань деревини вільхи із термічно модифікованою деревиною ясеня. Науковий вісник НЛТУ України. 2026, т. 36, № 1. С. 88–95.

Citation APA: Kindzera, A. R., & Kshyvetskyi, B. Ya. (2026). Results of experimental studies on the strength of adhesive joints of alder wood with thermal modified ash wood. *Scientific Bulletin of UNFU*, 36(1), 88–95. <https://doi.org/10.36930/40360110>

ни. Це зумовлює потребу пошуку альтернативних клейових систем, здатних забезпечити достатню міцність, вологостійкість і довговічність з'єднань за умов м'яких технологічних режимів і підвищених екологічних вимог.

Наразі широкого використання набули термопластичні клеї, такі як полівінілацетатні (ПВА) [20, 24] – дисперсії полівінілацетату на водній основі, що характеризуються високою адгезією до різних поверхонь, зокрема – поверхонь деревини та деревинних матеріалів і є екологічно безпечними.

Асортимент ПВА-клеїв постійно розширюється на світовому ринку [4], що зумовлено можливостями регулювання складу клейових композицій для підвищення когезійної міцності плівок та адгезійної міцності щодо різного роду поверхонь, а також надання їм спеціальних властивостей, зокрема – підвищеної вологостійкості, відповідно до сучасних вимог споживачів.

З огляду на зростання вимог до покращених характеристик клейових композицій та експлуатаційних характеристик клейових з'єднань, у промисловості активно розширюється виготовлення структурованих ПВА-клеїв, які є одно- або двокомпонентними клейовими композиціями, здатними формувати рідкофазову структуру клейового шва [12, 13]. Однокомпонентні структуровані ПВА-клеї містять у своєму складі невелику кількість затверджувача (близько 5 % від маси клею), що дає змогу досягати класу довговічності D4 згідно із стандартом EN 204:2014. Двокомпонентні ПВА-клеї складаються з дисперсії, основу якої становить полівінілацетат, та затверджувача (активатора), які перед застосуванням змішуються у визначеному співвідношенні для утворення реакційно-зв'язаної системи з підвищеною водостійкістю. Завдяки модифікуванню полімерної матриці та введенню реакційноздатних компонентів, для сучасних одно- та двокомпонентних ПВА-клеїв класу довговічності D4 характерна доволі висока адгезія до деревини та деревинних матеріалів, що є особливо важливим за умов зниженої змочуваності та проникності поверхні ТМ деревини ясеня, а також здатні формувати клейові шви з підвищеною когезійною міцністю, еластичністю, водо- та термостійкістю.

Наразі відсутні достовірні дані щодо міцності клейових з'єднань між ТМ деревиною ясеня та немодифікованими листяними породами, зокрема – вільхою, зі застосуванням ПВА-клеїв класу довговічності D4. Це унеможливує формування обґрунтованих висновків щодо якості таких з'єднань і зумовлює актуальність етапів подальшого дослідження.

Об'єкт дослідження – встановлення міцності клейового з'єднання деревини вільхи та термічно модифікованої деревини ясеня.

Предмет дослідження – методи і засоби визначення міцності клейових з'єднань деревини вільхи та термічно модифікованої деревини ясеня, які дадуть змогу експериментально дослідити вплив режимних параметрів і температурно-вологісних навантажень на міцність клейових з'єднань.

Мета роботи – дослідити вплив тривалості пресування та температурно-вологісних навантажень на зміну міцності клейового з'єднання деревини вільхи з термічно модифікованою деревиною ясеня, склеєних термопластичними клеями, що дасть змогу підібрати їхню компонентність та клас довговічності, які відповідають

сучасним екологічним вимогам та забезпечують належну міцність клейового з'єднання.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- проаналізувати клеї, які використовують для склеювання деревини та з'єднання на їх основі, що дасть змогу підібрати клеї для склеювання деревини вільхи із термічно модифікованою деревиною ясеня, які відповідали б сучасним екологічним вимогам та забезпечили належну міцність клейовому з'єднанню;
- описати методику з визначення міцності клейових з'єднань, сформованих з деревини вільхи та термічно модифікованої деревини ясеня, що дасть змогу провести експериментальне дослідження щодо впливу режимних параметрів і температурно-вологісних навантажень на міцність клейових з'єднань;
- провести експериментальне дослідження з визначення міцності клейових з'єднань "ТМ ясен – вільха", сформованих із використанням одно- та двокомпонентних полівінілацетатних клеїв класу довговічності D4 за різної тривалості пресування та дії температурно-вологісних навантажень;
- проаналізувати отримані результати дослідження, що дасть змогу встановити закономірності впливу режимних параметрів і температурно-вологісних навантажень на міцність клейових з'єднань "ТМ ясен – вільха".

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Результати дослідження міцності клейових з'єднань, сформованих із різних порід деревини з використанням ПВА-клеїв, достатньо широко представлено в науковій літературі. Так, у роботі [1] наведено результати дослідження впливу шести марок ПВА-клеїв класу довговічності D3 на міцність клейових з'єднань бука; отримані значення становили 11,48–13,18 МПа залежно від типу клею.

У праці [8] подано результати випробувань клейових з'єднань широкого спектра твердолистяних порід (бук, бангкірай, робінія, іпе, бубінга, іроко, меранті, макардуба, дуб, сапеле, палісандр, зебрано, венге), що відрізнялися за щільністю, значенням рН, шорсткістю та змочуваністю. Для склеювання застосовували водостійкий однокомпонентний структурований ПВА-клей Multibond SK8. Міцність з'єднань перебувала в межах 9,5–17,2 МПа.

Автори роботи [14] повідомили про міцності клейових з'єднань дуба на рівні 11,34 МПа із використанням структурованого ПВА-клею класу довговічності D4.

У наукових публікаціях також наведено результати дослідження міцності комбінованих клейових з'єднань, сформованих із поєднання деревини різних порід. Зокрема, у роботі [21] показано, що клейові з'єднання між березою (породою з вищою щільністю) та менш щільними породами (вільха чорна, вільха сіра, осика) мали більшу міцність порівняно зі з'єднаннями, виготовленими тільки з малощільних порід.

За результатами дослідження [26], міцність з'єднань бука та вільхи із використанням однокомпонентного ПВА-клею Titebond III Ultimate Wood Glue класу довговічності D4 становила відповідно 12 та 7 МПа.

Водночас, у літературних джерелах відсутні дані щодо міцності клейових з'єднань між ТМ деревиною ясеня та вільхою, сформованих із застосуванням одно- та двокомпонентних ПВА-клеїв класу довговічності D4. Очевидно, що міцність з'єднань "ТМ ясен – вільха" визначається комплексом чинників: фізико-хімічними характеристиками поверхонь обох матеріалів, властивостями ПВА-клеїв та технологічними параметрами проце-

су склеювання, серед яких одним із ключових є тривалість пресування.

Матеріали та методи дослідження. Як підкладки для склеювання використовували ламелі з деревини вільхи сірої (*Alnus incana* L.), висушені за температури 100 °C та кондиціоновані за стандартних кліматичних умов та ламелі з ТМ деревини ясеня (*Fraxinus excelsior* L.), модифікованої за температури 195 °C. Усі ламелі мали розміри 600×130×5 мм, волокна деревини були орієнтовані вздовж ламелей.

Щільність деревини вільхи та ТМ деревини ясеня визначали розрахунковим методом на підставі експериментально вимірних маси та об'єму. Середні значення густини обчислювали за результатами вимірювань десяти зразків кожного виду. Середня густина деревини вільхи становила 470 кг/м³, тоді як ТМ деревини ясеня – 540 кг/м³. Вологість ТМ ясеня та вільхи визначали за допомогою вологоміра. Середні значення вологості обчислювали за результатами вимірювань десяти зразків кожного виду. Середня вологість вільхи становила 8 %, тоді як ТМ ясеня – 6 %.

Для склеювання було використано три види клеїв на основі полівінілацетату (ПВА) класу довговічності D4 відповідно до EN 204/205: однокомпонентний Puiduliim B4 (Eskaro, Україна), позначений як ПВА^I, та двокомпонентні – Jowacoll 102.26 із затверджувачем 195.35 (Jowat, Німеччина) та Jowacoll 102.50 із затверджувачем 195.60 (Jowat, Німеччина), позначені як ПВА^{II} та ПВА^{III}, відповідно. Витрата клею становила 180 г/м². Клей наносили як на ламелі вільхи, так і на ламелі ТМ ясеня. Клейові заготовки "ТМ ясен – вільха" виготовляли за чотирьох тривалостей пресування, а саме 0,5; 2; 4 та 6 год, поміщаючи їх у гідравлічний прес (питомий тиск пресування 1,2 МПа, температура пресування – 20^{±2} °C). Після 72 год кондиціонування за стандартних умов (температури 20^{±2} °C та відносної вологості 65^{±5} %), із клейових заготовок формували зразки згідно з стандартом EN 205: 2016. Загальна кількість виготовлених зразків становила 600 шт. Зразки розділяти на дві групи: зразки першої групи у кількості 300 шт. використовували для визначення їх початкової міцності, а зразки другої групи у кількості 300 шт. – для пришвидшених температурно-вологісних випробувань.

Випробування зразків на міцність за розтягування вздовж волокон проводили відповідно до вимог стан-

дарту EN 205:2016. Пришвидшені випробування зразків на температурно-вологісні навантаження проводили відповідно до трьох послідовностей кондиціонування (conditioning sequences, CS), регламентованих стандартом EN 204: 2016 для клейових з'єднань на основі ПВА-клеїв класу довговічності D4.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Результати визначення міцності зразків "ТМ ясен – вільха" та характеру їх руйнування. Для проведення етапів дослідження було виготовлено 12 серій зразків "ТМ ясен – вільха" (табл. 1) з використанням трьох клеїв і чотирьох тривалостей пресування. Серії зразків позначали як [ТМЯ/ПВА^m/вільха]^τ, де *m* = I, II, III відповідає типу клею, а *τ* = 0,5; 2; 4; 6 год – тривалості пресування.

Табл. 1. Серії випробувальних зразків [ТМЯ/ПВА^m/вільха]^τ / Series of test specimens [TMA/PVAc^m/alder]^τ

Тривалість пресування, <i>τ</i> , год	Клеї		
	ПВА ^I	ПВА ^{II}	ПВА ^{III}
0,5	[ТМЯ/вільха] ^{0,5}	[ТМЯ/вільха] ^{0,5}	[ТМЯ/вільха] ^{0,5}
2	[ТМЯ/вільха] ²	[ТМЯ/вільха] ²	[ТМЯ/вільха] ²
4	[ТМЯ/вільха] ⁴	[ТМЯ/вільха] ⁴	[ТМЯ/вільха] ⁴
6	[ТМЯ/вільха] ⁶	[ТМЯ/вільха] ⁶	[ТМЯ/вільха] ⁶

Як відомо з розділу "Матеріали та методи дослідження", зразки першої групи у кількості 300 шт. (по 25 зразків у кожній з 12 серій) використовували для визначення їх початкової міцності. Усі зразки піддавали випробуванням на універсальній випробувальній машині UIT STM OSO, за результатами яких визначали їх міцність (*σ*, МПа). Після руйнування обидві частини кожного зразка піддавали візуальній оцінці для встановлення характеру руйнування: по клейовому шву; по клейовому шву із фрагментами ТМ деревини ясеня (змішаний характер); по структурі деревини.

Максимальні (*σ_{max}*), мінімальні (*σ_{min}*) та середні (*σ_{сеп}*) значення міцності для серій зразків [ТМЯ/ПВА^I/вільха]^τ, [ТМЯ/ПВА^{II}/вільха]^τ, [ТМЯ/ПВА^{III}/вільха]^τ, виготовлених за різної тривалості пресування (*τ*, год), а також відсоткове співвідношення за характером руйнування наведено в табл. 2.

Табл. 2. Міцність зразків і характер їх руйнування / Specimen strength and their failure type

Тривалість пресування τ , год	Клейовий зразок	Міцність зразків			Характер руйнування		
		σ_{max} , МПа	σ_{min} , МПа	$\sigma_{сep}$, МПа	по клейово-му шву, %	змішаний, %	по ТМ дере-вині ясеня, %
Зразки серії [ТМЯ/ПВА ^I /вільха] ^{τ}							
0,5	[ТМЯ/ПВА ^I /вільха] ^{0.5}	4,21	2,60	3,10	100	-	-
2	[ТМЯ/ПВА ^I /вільха] ²	5,35	4,15	4,22	92	8	-
4	[ТМЯ/ПВА ^I /вільха] ⁴	6,71	4,45	5,57	-	43	57
6	[ТМЯ/ПВА ^I /вільха] ⁶	7,10	4,89	6,09	-	7	93
Зразки серії [ТМЯ/ПВА ^{II} /вільха] ^{τ}							
0,5	[ТМЯ/ПВА ^{II} /вільха] ^{0.5}	4,39	2,59	3,59	93	9	-
2	[ТМЯ/ПВА ^{II} /вільха] ²	6,32	4,43	5,14	12	88	-
4	[ТМЯ/ПВА ^{II} /вільха] ⁴	7,08	5,39	6,08	-	24	76
6	[ТМЯ/ПВА ^{II} /вільха] ⁶	7,11	5,54	6,57	-	3	97
Зразки серії [ТМЯ/ПВА ^{III} /вільха] ^{τ}							
0,5	[ТМЯ/ПВА ^{III} /вільха] ^{0.5}	4,59	3,88	4,45	6	94	-
2	[ТМЯ/ПВА ^{III} /вільха] ²	7,05	5,42	5,82	-	45	55
4	[ТМЯ/ПВА ^{III} /вільха] ⁴	7,11	6,01	6,61	-	3	97
6	[ТМЯ/ПВА ^{III} /вільха] ⁶	7,12	6,48	7,08	-	-	100

Як видно з табл. 2, для серії зразків [ТМЯ/ПВА^I/вільха]^г тривалість витримки під пресом 0,5 та 2 год була недостатньою для формування клейових з'єднань із належною міцністю (середня міцність становила 3,10 та 4,22 МПа відповідно). Руйнування, яке відбувалося по клейовому шву (100 % для витримки 0,5 год та 92 % для 2 год), свідчить про низьку адгезійну міцність у міжфазній зоні "ПВА^I – ТМ ясен", що зумовлено зниженою змочуваністю та проникністю ТМ деревини ясеня. Тривалість пресування має важливе значення для клейового з'єднання з термічно модифікованої деревини, оскільки зменшення тривалості пресування супроводжується передчасним зняттям тиску на етапі формування клейового шва, обмеженням дифузійних процесів у клейовому з'єднанні, нерівномірний розподіл клею на поверхнях тощо. Усе це призводить до отримання з'єднання низької якості.

Покращення міцнісних показників спостережено за тривалості пресування 4 год: середня міцність зразків зростає до 5,57 МПа, при цьому 57 % зразків руйнувалися по структурі ТМ деревини ясеня, а 43 % мали змішаний характер руйнування (по клейовому шву з відривом фрагментів ТМ ясеня). Такий розподіл свідчить про істотне підвищення адгезійної міцності в міжфазній зоні "ПВА^I – ТМ ясен". За тривалості пресування 6 год середня міцність досягла 6,09 МПа, а 93 % зразків руйнувалися за когезійним механізмом – по структурі ТМ ясеня. Це вказує на те, що міцність клейового шва перевищила міцність ТМ ясеня, тому якість таких з'єднань можна оцінити як задовільну для цієї комбінації матеріалів.

Для серії зразків [ТМЯ/ПВА^{II}/вільха]^г тривалості пресування 0,5 та 2 год також призводили до отримання зразків незадовільної якості, про що свідчать низькі значення міцності (3,59 та 5,14 МПа відповідно) та характер руйнування зразків (див. табл. 2). Покращені результати щодо міцності (середня міцність зразків досягла 6,08 МПа) спостережено за тривалості пресування 4 год: 76 % зразків руйнувалися по ТМ деревині ясеня, а 24 % – за змішаним характером. За тривалості пресування 6 год значення середньої міцності досягнуло 6,57 МПа та 97 % зразків зруйнувалися по ТМ деревині ясеня. Отримані результати свідчать про високу якість зразків.

Загалом, покращені результати спостережено для серії зразків [ТМЯ/ПВА^{III}/вільха]^г уже після 0,5 год пресування – середня міцність зразків становила 4,45 МПа та 94 % зразків демонстрували змішаний характер руйнування. Після 2 год середні значення міцності зразків становили 5,82 МПа та 55 % зразків руйнувалися по ТМ деревині ясеня. Тривалість пресування 4 год забезпечила сприятливі результати: середня міцність зразків підвищилась до значень 6,61 МПа, 97 % зразків зруйнувалися по ТМ деревині ясеня. За тривалості пресування 6 год усі зразки (100 %) руйнувалися по структурі ТМ деревини ясеня, досягаючи найвищого середнього значення міцності 7,08 МПа. Отримані результати для 4- та 6-годинної витримки зразків під пресом свідчать про високу якість зразків.

Як показали результати експериментального дослідження, подовження тривалості пресування понад 6 год є недоцільним, оскільки лімітувальним чинником міцності клейових з'єднань стає когезійна міцність самої ТМ деревини ясеня. Отже, гранична міцність з'єднань "ТМ ясен – вільха" визначається міцністю ТМ деревини

ясеня, яка є нижчою за міцність сформованого клейового з'єднання.

Результати пришивдшеного експериментального дослідження зразків на температурно-вологісній навантаженні. Для пришивдшених експериментальних випробувань зразків на температурно-вологісній навантаження було використано 300 зразків (по 100 зразків для кожної із серій [ТМЯ/ПВА^I/вільха]^г [ТМЯ/ПВА^{II}/вільха]^г та [ТМЯ/ПВА^{III}/вільха]^г). 25 зразків кожної серії використовували як контрольні – для визначення початкової середньої міцності $\sigma_{сер}^{контр}$, решта 75 зразків кожної серії використовували для пришивдшених випробувань (по 25 зразків для кожного етапу кондиціонування).

Середні значення початкової міцності $\sigma_{сер}^{контр}$ серій зразків, а також середні значення міцності $\sigma_{сер}$ та відсоткове співвідношення за характером руйнування після послідовних стадій випробувань на температурно-вологісній навантаження, регламентованих стандартом EN 204: 2016, наведено в табл. 3–5, відповідно.

Табл. 3. Середня міцність зразків серії [ТМЯ/ПВА^I/вільха]^г та характер руйнування після послідовних етапів випробувань на температурно-вологісній навантаження / Average strength of specimens series [TMA/PVAc^I/alder]^g and the failure type after successive stages of temperature-humidity loads

Етап випробування	Середня міцність зразків $\sigma_{сер}$, МПа	Характер руйнування		
		по клейовому шву, %	змішаний, %	по ТМ деревині ясеня, %
1-ий	6,08	-	6	94
2-ий	4,52	34	49	17
3-ій	3,84	63	37	-

Примітка: середнє значення міцності контрольних зразків $\sigma_{сер}^{контр} = 6,12$, МПа

Табл. 4. Середня міцність зразків серії [ТМЯ/ПВА^{II}/вільха]^г та характер руйнування після послідовних етапів випробувань на вологостійкість / Average strength of specimens series [TMA/PVAc^{II}/alder]^g and the failure type after successive stages of temperature-humidity loads

Етап випробування	Середня міцність зразків $\sigma_{сер}$, МПа	Характер руйнування		
		по клейовому шву, %	змішаний, %	по ТМ деревині ясеня, %
1-ий	6,58	–	4	96
2-ий	5,10	6	47	41
3-ій	4,19	9	52	39

Примітка: середнє значення міцності контрольних зразків $\sigma_{сер}^{контр} = 6,59$, МПа

Табл. 5. Середня міцність зразків серії [ТМЯ/ПВА^{III}/вільха]^г та характер руйнування після послідовних етапів випробувань на вологостійкість / Average strength of specimens series [TMA/PVAc^{III}/alder]^g and the failure type after successive stages of temperature-humidity loads

Етап випробування	Середня міцність зразків $\sigma_{сер}$, МПа	Характер руйнування		
		по клейовому шву, %	змішаний, %	по ТМ деревині ясеня, %
1-ий	7,11	-	-	100
2-ий	5,76	4	42	54
3-ій	4,64	5	48	47

Примітка: середнє значення міцності контрольних зразків $\sigma_{сер}^{контр} = 7,11$, МПа

Результати, отримані після першого етапу випробувань зразків на температурно-вологісній навантаженні, відповідають очікуванню: відхилення середніх значень міцності від міцності контрольних зразків були мінімальними для серій [ТМЯ/ПВА^I/вільха]⁶, [ТМЯ/ПВА^{II}/вільха]⁶ та повністю була збереженою міцність у серії зразків [ТМЯ/ПВА^{III}/вільха]⁶. Для всіх серій зразків переважаючим був характер руйнування по структурі ТМ ясеня. Отже, за умов першого етапу випробувань можна констатувати відсутність негативного впливу атмосферної вологості на клейовий шов та, в тому числі, на міжфазну зону "ПВА – ТМ ясен". Практично повне збереження міцності та домінування когезійного руйнування по ТМ деревині ясеня свідчать про добре сформований клейовий шов без ознак руйнування, зумовленого впливом атмосферної вологості. Значення середньої міцності для всіх серій зразків, що є меншим від регламентованого вимогами стандарту EN 204:2016 (≥ 10 МПа) обумовлене обмеженою механічною міцністю ТМ деревини ясеня.

Результати, отримані після другого етапу випробувань зразків на температурно-вологісній навантаженні. Після другого етапу випробувань спостережено помірне зниження середньої міцності для всіх серій зразків. Для серії зразків [ТМЯ/ПВА^I/вільха]⁶ середня міцність зменшилась на 26,14 %, для серії зразків [ТМЯ/ПВА^{II}/вільха]⁶ – на 22,61 % та для серії [ТМЯ/ПВА^{III}/вільха]⁶ – на 18,9 % (від міцності контрольних зразків). Загалом, зменшення міцності зразків зумовлене проникненням вологості у клейовий шов, набуханням деревини вільхи та виникненням додаткових внутрішніх напружень у зоні клейового шва. Водночас, наявність затверджувачів у клейових композиціях ПВА^{II} та ПВА^{III} забезпечила збереження вищих значень міцності зразків серій [ТМЯ/ПВА^{II}/вільха]⁶ та [ТМЯ/ПВА^{III}/вільха]⁶ порівняно зі зразками [ТМЯ/ПВА^I/вільха]⁶, виготовленими з використанням однокомпонентного клею ПВА^I.

Для серії зразків [ТМЯ/ПВА^I/вільха]⁶ 41 % зразків зруйнувався по ТМ деревині ясеня, домінуючим був змішаний тип руйнування (49 %), а решта зразків (6 %) зруйнувались по клейовому шву, що свідчить про дещо підвищену чутливість клею ПВА^I до безпосереднього та тривалого впливу води.

Натомість зразки, склеєні двокомпонентними клейовими композиціями, показали вищу стійкість клейового шва до прямої дії вологості. Для серії [ТМЯ/ПВА^{II}/вільха]⁶ 41 % зразків руйнувався по ТМ деревині ясеня; 47 % зразків руйнувалося за змішаним типом та 6 % – по клейовому шву. Для серії [ТМЯ/ПВА^{III}/вільха]⁶ 54 % зразків руйнувався по ТМ деревині ясеня; 42 % зразків руйнувалося за змішаним типом та 4 % – по клейовому шву.

Вища стійкість клейового шва до прямої дії вологості для зразків серій [ТМЯ/ПВА^{II}/вільха]⁶ та [ТМЯ/ПВА^{III}/вільха]⁶ зумовлена формуванням зшитого полімерної сітки за участі затверджувачів, що обмежує водопоглинання.

Загалом, після другого етапу кондиціонування, середні значення міцності зразків усіх трьох серій були більшими ніж 4 МПа (регламентоване вимогами стандарту EN 204:2016 значення міцності ≥ 4 МПа).

Результати, отримані після третього етапу випробувань зразків на температурно-вологісній навантаженні. Після третього, найбільш жорсткого етапу випробувань, для зразків усіх серій зафіксовано подальше зниження середньої міцності. Для серії зразків [ТМЯ/ПВА^I/вільха]⁶ середня міцність зменшилась на 37,25 %,

для серії зразків [ТМЯ/ПВА^{II}/вільха]⁶ – на 36,41 % та для серії [ТМЯ/ПВА^{III}/вільха]⁶ – на 34,7 % (від міцності контрольних зразків). Комплексний вплив підвищеної температури та вологості призводив до пластифікації клейової плівки та часткового порушення її цілісності. Окрім цього, кип'ятіння призвело до зниження механічної міцності ТМ деревини ясеня та підвищило її крихкість.

Унаслідок проходження третього етапу випробувань, для зразків серії [ТМЯ/ПВА^I/вільха]⁶ зафіксовано домінування руйнування по клейовому шву (63 %). Середнє значення міцності цієї серії зразків становило 3,84 МПа, що є дещо нижчим за мінімально допустиме значення, регламентоване вимогами EN 204:2016 для класу D4 (≥ 4 МПа). Водночас 37 % зразків продемонстрували міцність у межах 4,0–4,1 МПа, тобто відповідали нормативному критерію.

Загалом, отримані результати вказують на недостатню стійкість клейових з'єднань, сформованих із застосуванням однокомпонентного клею ПВА^I, до гідротермічного впливу, і на невідповідність до вимог стандарту за значенням середньої міцності з'єднань. Водночас, близькість результатів до нормативного значення дає змогу припустити, що вдосконалення технологічних параметрів склеювання клейових заготовок "ТМ ясен – вільха" може забезпечити досягнення повної відповідності вимогам стандарту.

Унаслідок цього для зразків серії [ТМЯ/ПВА^I/вільха]⁶ домінувало руйнування по клейовому шву (63 %), що свідчить про недостатню волого- та термостійкість зразків, сформованих за участі однокомпонентного клею ПВА^I.

Для серії [ТМЯ/ПВА^{II}/вільха]⁶ переважав змішаний тип руйнування (52 %), хоча значна кількість зразків (39 %) зруйнувалась по ТМ деревині ясеня та тільки 9 % зразків зруйнувалось по клейовому шву.

Найвищу стійкість на третьому етапі випробувань продемонстрували зразки серії [ТМЯ/ПВА^{III}/вільха]⁶, для яких 48 % зразків зазнали змішаного типу руйнувань та 47 % зразків зруйнувались по ТМ деревині ясеня та тільки 5 % зразків зруйнувалось по клейовому шву.

Збереження міцності на рівні понад 4 МПа зразками серій [ТМЯ/ПВА^{II}/вільха]⁶ та [ТМЯ/ПВА^{III}/вільха]⁶ після третього етапу випробувань, що відповідає вимогам стандарту EN 204:2016 для клейових з'єднань на основі ПВА-клеїв класу довговічності D4, свідчить про ефективність застосування двокомпонентних клейових композицій ПВА^{II} та ПВА^{III} для формування волого- та термостійких клейових з'єднань за участі ТМ деревини ясеня та вільхи.

Отримані результати дослідження підтверджують доцільність збільшення тривалості пресування з'єднань "ТМ ясен – вільха" з використанням двокомпонентних ПВА-клеїв для досягнення належної граничної міцності як після формування клейового з'єднання, так і дії температурно-вологісних навантажень.

Обговорення результатів дослідження. Як зазначають автори роботи [10], поєднання немодифікованої та модифікованої деревини у клейових з'єднаннях відкриває нові можливості для виготовлення різноманітних столярно-будівельних виробів, однак підвищена гідрофобність поверхні ТМ деревини створює проблеми під час її склеювання з немодифікованою деревиною.

Автори робіт [12, 16] зазначили, що існує потреба проведення дослідження міцності клейових з'єднань за

участі ТМ деревини, яка внаслідок термічного модифікування зазнала комплексних змін щодо фізико-хімічних, структурних та механічних характеристик, що безпосередньо впливають як на механізм формування клеювого шва, так і на граничну міцність з'єднань.

Результати дослідження авторів роботи [22] показали, що термічне модифікування істотно знижує міцність ПВА-клеювих з'єднань бука, тополі та ялиці. Це пояснюють зменшенням кількості полярних функціональних груп у клітинних стінках ТМ деревини, підвищенням їх жорсткості погіршенням змочуваності поверхні.

Дослідження, представлені в роботі [18], показали, що термічне модифікування жовтої тополі зменшує проникнення ПВА-клею в деревну матрицю на 29 %, що призводить до формування обмеженої зони міжфазного контактування та утворення товстішої клеювої лінії та, як наслідок, – до зменшення міцності з'єднань на зсув до значень 8,4 МПа порівняно з 13,0 МПа для з'єднань із немодифікованої тополі.

Автори роботи [7] дослідили міцності клеювих з'єднань, для формування яких використано ТМ деревину ясена (виготовлену за технологією вакуумно-кондуктивного термооброблення за температур 160 та 220 °C), а також ПВА дисперсію класу довговічності D3. Показано, що середня міцність зразків становила 3,45 та 6,34 МПа.

У наукових джерелах також наведено дані щодо міцності з'єднань, сформованих із поєднання немодифікованої та ТМ деревини. Зокрема, у роботі [24] наведено результати дослідження міцності клеювих з'єднань на основі однокомпонентного ПВА-клею Rakoll® 4330, сформованих із немодифікованої ялини (контрольні зразки), поєднання немодифікованої та ТМ ялини, а також тільки з ТМ ялини. Встановлено зниження міцності на зсув у з'єднаннях із ламелей ТМ ялини, до того ж найбільше зменшення міцності (на 42,3 % від міцності 9,3 МПа для контрольних зразків) зафіксовано для матеріалу, модифікованого за температури 220 °C. Для комбінованих з'єднань (ТМ і немодифікована ялина) міцність також була нижчою, ніж у контрольних зразках, і зменшувалася зі зростанням температури модифікування (від 9,2 МПа за 160 °C до 7,0 МПа за 220 °C). При цьому когезійний характер руйнування по ТМ деревині переважав у зразках, виготовлених із ялини, модифікованої за найвищих температур (200–220 °C).

У роботах [3, 11] наведено дані щодо міцності з'єднань між ТМ деревиною ясена та сосною, які було сформовано із застосуванням однокомпонентного ПВА-клею класу D4: значення міцності перебували в межах 6,00–8,35 МПа (середнє значення – 7,12 МПа). Встановлено, що після трьох етапів випробувань на температурно-вологісні навантаження за пришивдшеною методикою, міцність зменшилася приблизно на 50 %: після першого етапу – на 13 %, після другого – на 36 %, після третього – на 45 % відносно контрольних зразків. При цьому мінімальне значення міцності становило 3,00 МПа, максимальне – 4,88 МПа, а середнє – 3,90 МПа. У нашому випадку вибір ламелей з ясена, модифікованих за температури 195 °C, зумовлений необхідністю забезпечення раціонального балансу між адгезійною придатністю матеріалу до склеювання ПВА-клеями та його експлуатаційною стійкістю за умов змінного зовнішнього середовища.

За температури 195 °C відбувається практично повна термодеструкція геміцелюлози, аморфної складової

целюлози та переструктурування лігніну з утворенням зшитих комплексів [6, 15]. Розкладання геміцелюлози та аморфної частини целюлози призводить до зменшення кількості гідроксильних (–ОН) груп у клітинних стінках, що знижує гігроскопічність деревинної матриці. Водночас, процес модифікування за такої температури не призводить до повної їх втрати, тому на поверхні зберігається достатня кількість активних центрів, здатних брати участь у формуванні водневих зв'язків із полівінілацетатними клеями. Збільшення відносного вмісту кристалічної целюлози (з одночасним зменшенням аморфної) сприяє формуванню більш жорсткої та стабільної структури клітинних стінок. Переструктурований лігнін частково перерозподіляється в об'ємах клітин та міжклітинному просторі, що, призводить до зменшення змочуваності поверхні та її проникності, та, водночас, сприяє слабшій адгезії між клеєм і поверхнею.

Тому, з позиції здатності до склеювання, незважаючи на зростання гідрофобності поверхні та зменшення її проникності, зберігається достатня кількість активних –ОН груп для формування адгезійної взаємодії з полівінілацетатними композиціями. З огляду на зазначене вище, застосування ламелей з ясена, термічно модифікованих за температури 195 °C, є обґрунтованим рішенням, оскільки дає змогу поєднати адгезійну сумісність із ПВА-клеями та надійність клеювих конструкцій за експлуатації за умов зовнішнього середовища.

Обговорення результатів дослідження підтверджує доцільність проведеного нашого дослідження міцності клеювих з'єднань типу "ТМ ясен – вільха", сформованих із застосуванням одно- та двокомпонентних ПВА-клеїв класу довговічності D4, а також проведення їх випробувань за умов температурно-вологісних навантажень, оскільки відповідні дані відсутні в науковій літературі. Отримані результати можуть слугувати підґрунтям для обґрунтованого вибору ПВА-клеїв для ТМ деревини та технологічних параметрів процесу склеювання, а також впровадження конструктивних рішень із використанням комбінованих з'єднань на основі ТМ деревини ясена, призначених для експлуатації за умов дії чинників навколишнього середовища.

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

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – отримала подальший розвиток методика визначення міцності клеювого з'єднання деревини вільхи з термічно модифікованою деревиною ясена, яка, на відміну від наявних методик, враховує вплив тривалості процесу пресування, температурно-вологісні навантаження та характер їх руйнувань, що дає змогу підібрати компонентність клеїв і клас їх довговічності, які відповідали б сучасним екологічним вимогам та забезпечили б належну міцність клеювих з'єднань.

Практична значущість результатів дослідження – можна впровадити у технологічний процес склеювання листяних порід деревини та термічно модифікованої деревини ясена для підвищення тривалості пресування клеювих з'єднань, щоб забезпечити їм належну міцність як під час технологічного процесу склеювання, так і внаслідок експлуатації.

Висновки / Conclusions

Досліджено зміну міцності клейового з'єднання деревини вільхи з термічно модифікованою деревиною ясена, склеєних термопластичними клеями, залежно від тривалості пресування, температурно-вологісних навантажень та характеру їх руйнувань, що дало змогу підібрати їхню компонентність та клас довговічності, які відповідають сучасним екологічним вимогам і забезпечують належну міцність клейового з'єднання. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Встановлено, що міцність усіх клейових зразків "ТМ ясен – вільха", сформованих за участі клеїв ПВА^I, ПВА^{II} та ПВА^{III} та характер їх руйнувань істотно залежали як від рецептури клею, так і від тривалості пресування.
2. З'ясовано, що за тривалості пресування 0,5 год клейові зразки, сформовані за участі трьох клеїв (ПВА^I, ПВА^{II} та ПВА^{III}) характеризувалися: низькими значеннями середньої міцності (3,10; 3,59 та 4,45 МПа, відповідно); руйнуванням по клейовому шву (для зразків за участі клеїв ПВА^I, ПВА^{II}) та руйнуванням за змішаним типом (для зразків за участі клеїв ПВА^{III}), що свідчило про низьку якість з'єднань.
3. Досліджено, що 6-годинне пресування забезпечило підвищення середньої міцності з'єднань до значень 6,09 (ПВА^I); 6,57 (ПВА^{II}) та 7,08 МПа (ПВА^{III}), а також високу частку руйнувань по ТМ деревині ясена: 93 % (ПВА^I), 97 % (ПВА^{II}) та 100 % (ПВА^{III}), що свідчить про перевищення міцності клейового з'єднання над когезійною міцністю підкладки з ТМ деревини ясена.
4. Встановлено, що збереження міцності на рівні понад 4 МПа зразками серій [ТМЯ/ПВА^{II}/вільха]⁶ та [ТМЯ/ПВА^{III}/вільха]⁶ після трього етапу температурно-вологісних випробувань свідчить про ефективність застосування двокомпонентних клейових композицій ПВА^{II} та ПВА^{III} для формування волого- та термостійких клейових з'єднань за участі ТМ деревини ясена та вільхи.

References

1. Barboutis, I., & Kamperidou, V. (2021). Shear strength of beech wood joints bonded with commercially produced PVAc D3 adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 105, article ID 102774. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102774>
2. Candelier, K., Hannouz, S., Thévenon, M-F., Guibal, D., Gérardin, P., Pétrissans, M., & Collet, R. (2017). Resistance of thermally modified ash (*Fraxinus excelsior* L.) wood under steam pressure against rot fungi, soil-inhabiting micro-organisms and termites. *European Journal of Wood and Wood Products*, 75, 249–262. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1126-y>
3. Datskiv, H., & Kshyvetsky, B. (2023). Results of experimental studies on the strength of adhesive-bonded joints of thermally modified ash wood. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 14(1), 27–38. <https://doi.org/10.31548/forest/1.2023.27>
4. Gadhave, R., & Dhawale, P. (2022). State of research and trends in the development of polyvinyl acetate-based wood adhesive. *Open Journal of Polymer Chemistry*, 12, 13–42. <https://doi.org/10.4236/ojpcchem.2022.121002>
5. Govorčin, S., Sinković, T., & Hrčka, R. (2009). Some Physical and Mechanical Properties of Recent and Heat Treated Ash-*Fraxinus excelsior* L. *Šumarski list*, 133, 185–191. URL: <https://hrcak.srce.hr/36402>
6. Hill, C., Altgen, M., & Rautkari L. (2021). Thermal modification of wood – A review: Chemical changes and hygroscopicity. *Journal of Materials Science*, 56, 6581–6614. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05722-z>
7. Ilkiv, M. M., Solonynka, V. R., Humenyuk, Zh. Ya., & Huber, Yu. M. (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. <https://doi.org/10.15421/40270330>
8. Iždinský, J., Reinprecht, L., Sedliacik, J., Kúdela, J., & Kucerová, V. (2021). Bonding of Selected Hardwoods with PVAc Adhesive. *Applied Science*, 11(1), article ID 67. <https://doi.org/10.3390/app11010067>
9. 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>
10. Kindzera, A., Kshyvetsky, B., Spirochkin, A., Lakyda, Yu., & Zavialov, D. (2025). Influence of environmental factors on the surface condition of thermally modified ash wood in polyvinyl acetate adhesive joints. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 16(3), 26–39. <https://doi.org/10.31548/forest/3.2025.26>
11. Kshyvetsky, B. Y., & Datskiv, H. M. (2023). Strength of adhesive joints of thermally modified ash wood glued with polyvinyl acetate – based adhesives. *Drewno. Prace naukowe. Doniesienia. Komunikaty*, 66(211), 5–8. <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.426.03>
12. Kshyvetsky, B. Ya., Datskiv, H. M., & Andrashek, Yo. V. (2019). General information about adhesives, gluing, and thermally modified wood. *Scientific Bulletin of UNFU*, 29(3), 81–84. <https://doi.org/10.15421/40290317>
13. Kshyvetsky, B., Kindzera, D., Sokolovskyi, I., Storozhuk, V., Mayevska, O., Somar, H., & Kindzera, A. (2024). Features of the formation of cohesive and adhesive strength by non-structured and structured polyvinyl acetate films during wood gluing. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 3, 89–97. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2024-154-3-89-97>
14. Kshyvetsky, B., Kindzera, D., Sokolovsky, Ya., Somar, H., & Sokolovskyi, I. (2023). Prediction of the strength of oakwood adhesive joints bonded with thermoplastic polyvinyl acetate adhesives. *Chemistry & Chemical Technology*, 17(1), 110–117. <https://doi.org/10.23939/chcht17.01.110>
15. Kubovský, I., Kačíková, D., Kačík, F. (2020). Structural changes of oak wood main components caused by thermal modification. *Polymers*, 12, article ID 485. <https://doi.org/10.3390/polym12020485>
16. 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>
17. Łebkowska, 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>
18. Masoumi, A., Balma, F. X. Z., & Bond, B. H. (2023). Adhesive bonding performance of thermally modified yellow poplar. *Bioresources*, 18(4), 8151–8162. <https://doi.org/10.15376/biores.18.4.8151-8162>
19. Pinchevska, O., Horbachova, O., Bardarov, N., Zavialov, D., Davydov, V., & Oliynyk, R. (2025). Properties of heat-treated ash wood. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 16(2), 25–41. <https://doi.org/10.31548/forest/2.2025.25>
20. Qiao, L., & Eastal, 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>
21. Rohumaa, A., Kallakas, H., Mäetalu, M., Savest, N., & Kers, J. (2021). The effect of surface properties on bond strength of birch, black alder, grey alder and aspen veneers. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 110, article ID 102945. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102945>
22. Taghiyari, H. R., Esmailpour, A., Adamopoulos, S., Zereshki, K., & Hosseinpourpia, R. (2020). Shear strength of heat-treated solid wood bonded with polyvinyl-acetate reinforced by nanowollastonite. *Wood research*, 65(2), 183–194. <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/65.2.183194>
23. Tout, R. (2000). A review of adhesives for furniture. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 20(4), 269–72. [https://doi.org/10.1016/S0143-7496\(00\)00002-6](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(00)00002-6)

24. Vidholdová, Z., Ciglian, D., & Reinprecht, L. (2021). Bonding of the thermally modified Norway spruce wood with the PUR and PVAc adhesives. *Acta Facultatis Xylologiae Zvolen*, 63, 63–73. <https://doi.org/10.17423/afx.2021.63.1.06>
25. 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>
26. Żmuda, E., Wronka, A., Kowaluk, G., & Radomski, A. (2024). Effect of Styrene Polymerization on the Bondability of Beech and Alder Wood with Different Adhesives. *Materials*, 17, article ID 6212. <https://doi.org/10.3390/ma17246212>

A. R. Kindzera, B. Ya. Kshyvetskyy

Ukrainian National Forestry University, Lviv, Ukraine

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES ON THE STRENGTH OF ADHESIVE JOINTS OF ALDER WOOD WITH THERMAL MODIFIED ASH WOOD

The application of thermally modified (TM) ash wood (*Fraxinus excelsior* L.), which features improved performance characteristics opens new prospects for the production of wooden structures capable of withstanding prolonged exposure to environmental factors. However, the high cost of TM wood, and thus of the structures manufactured from it necessitates the search for ways to reduce the cost of final products. One promising approach is to combine TM ash wood with lower-value alder wood through gluing, which also enables more efficient use of resources. This study investigates the strength of adhesive joints formed between TM ash wood and alder wood using one- and two-component D4 polyvinyl acetate (PVAc) adhesives under varying pressing durations. The effects of pressing duration on adhesive joint strength and failure behavior were studied using PVAc^I (one-component), PVAc^{II}, and PVAc^{III} (two-component) adhesives. At the shortest pressing time (0.5 h), low strengths were observed across all specimens (3.10–4.45 MPa), accompanied by failure along the adhesive seam for PVAc^I and PVAc^{II} as well as mixed failure (along the adhesive seam with fragments of fractured TM ash wood) for PVAc^{III}, indicate poor joint quality. Increasing the pressing duration to 2 h increased the average strength values of all specimens (4.22–5.82 MPa) and changed the failure type. At 4 h, all specimens showed further strength increases, with failure predominantly within the TM ash wood. Prolonging pressing to 6 h provided only a slight increase in strength, but maximized the proportion of cohesive failures (up to 93 % for PVAI, 97 % for PVAII, 100 % for PVAIII), which indicates the high quality of specimens. However, extending pressing beyond 6 h is inefficient, as the limiting factor becomes the cohesive strength of the TM ash wood. The retention of strength at a level exceeding 4 MPa by the specimens of the [TMA/PVAI^I/alder]⁶ and [TMA/PVA^{III}/alder]⁶ series after the third stage of temperature-humidity exposure testing indicates the effectiveness of the two-component adhesive systems PVA^{II} and PVA^{III} for forming moisture- and heat-resistant bonded joints involving TM ash wood and alder.

Keywords: polyvinyl acetate (PVAc) adhesives; pressing duration; failure type; bond quality; average strength; temperature-humidity loads.