

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Навчально-науковий інститут деревообробних технологій і дизайну

Кафедра технологій деревинних композиційних матеріалів,
целюлози та паперу

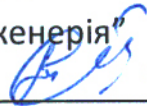
УДК 674.093.26

Пояснювальна записка

до дипломної роботи магістра на тему:

“ Вплив температури пресування на механічні властивості фанери, виготовленої з березового шпону, модифікованого лимонною кислотою, склеєної первинною плівкою ПЕНГ ”

Виконав: студент групи ТДКМ-61м спеціальності 161 “Хімічні технології та інженерія”



(підпис)

Олег ТОРИЩАК

Керівник: доц. каф. ТДКМ, к.т.н.



(підпис)

Ірина КУСНЯК

Рецензент: к.т.н., доц. каф. ТЗНС, ДБМД



(підпис)

(посада, вчене звання, науковий ступінь)

Соколовський І.А.

(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Навчально-науковий інститут деревообробних технологій і дизайну
Кафедра технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри 

д.т.н., проф. Руслан КОЗАК

“ 22 ” грудня 2025 року

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Торищаку Олегу Ігоровичу

1. Тема роботи Вплив температури пресування на механічні властивості фанери, виготовленої з березового шпону, модифікованого лимонною кислотою, склеєної первинною плівкою ПЕНГ.

керівник роботи доц. кафедри ТДКМ Кусняк Ірина Іванівна, к.т.н.,
затверджені наказом університету від “ 28 ” жовтня 2024 року № С-846

2. Термін подання студентом роботи 22.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Проаналізувати світове виробництво фанери, використання клеїв та модифікувальних речовин у виробництві фанери, вплив параметрів пресування на механічні властивості фанери, вплив концентрації та температури пресування на механічні властивості фанери.

4. Зміст пояснювальної записки (розділи, які потрібно розробити)

1. Стан питання та завдання дослідження

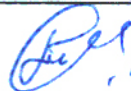
2. Методика експериментальних досліджень

3. Обробка експериментальних даних

4. Висновки

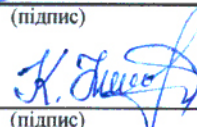
5. Дата видачі завдання 25.07.2025 р.

Студент


(підпис)

Олег ТОРИЩАК

Керівник роботи


(підпис)

Ірина КУСНЯК

Анотація

У роботі досліджено вплив температури пресування та концентрації розчину лимонної кислоти на механічні властивості фанери, виготовленої з березового шпону та склеєної термопластичною плівкою ПЕНГ. Для досягнення поставленої мети пропонується дослідити вплив концентрації розчину лимонної кислоти за різної температури пресування на механічні властивості фанери. Таке дослідження дозволить встановити оптимальні умови виробництва та сприятиме створенню екологічно безпечної фанери з підвищеними експлуатаційними властивостями, що є важливим для подальшого розвитку галузі.

В першому розділі проаналізовано сучасний стан виробництва фанери, використання клеїв і модифікувальних речовин у фанерних технологіях.

В другому розділі описано методику хімічного модифікування шпону розчинами лимонної кислоти концентрацією 5–25 % та процес виготовлення фанери за трьома температурними режимами пресування: 140, 160 і 180 °С.

В третьому розділі описуються результати межі міцності фанери на зріз, межі міцності під час статичного згинання та модуль пружності згідно стандартів EN 314-1/2 та EN 310. Встановлено оптимальну концентрацію модифікувального розчину (15 %) та оптимальний температурний режим пресування (160–180 °С), які забезпечують підвищення адгезійної взаємодії та покращення механічних характеристик фанери. Результати роботи можуть бути використані для оптимізації технологічних процесів виготовлення екологічно безпечної фанери на основі термопластичних полімерів.

Магістерська робота складається з анотації, вступу, трьох розділів основної частини, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дипломної роботи складає 63 сторінки, з них 45 сторінок основного тексту, список літератури із 72 назв.

Ключові слова: фанера, ПЕНГ, лимонна кислота, модифікування шпону, температура пресування, межа міцності фанери на зріз, межа міцності фанери під час статичного згинання, модуль пружності.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
Розділ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	7
1.1. Фанера. Світове виробництво.....	7
1.2. Аналіз використання клеїв у виробництві фанери.....	9
1.3. Аналіз використання модифікувальних речовин у виробництві фанери....	12
1.4. Вплив параметрів пресування на механічні властивості фанери.....	14
1.5. Висновки.....	18
Розділ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	19
2.1. Матеріали та реактиви.....	19
2.2. Вимірювальні прилади та обладнання.....	20
2.3. Методика модифікування поверхні шпону.....	21
2.4. Методика досліджень механічних властивостей фанери.....	24
2.4.1. Виготовлення фанери.....	24
2.4.2. Випробування і визначення механічних властивостей фанери.....	28
2.5. Статистична обробка даних результатів досліджень.....	34
Розділ 3. ОБРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ	36
3.1. Вплив концентрації модифікувального розчину на механічні властивості фанери	37
3.1.1. Межа міцності на зріз.....	37
3.1.2. Межа міцності під час статичного згинання.....	39
3.1.3. Модуль пружності під час статичного згинання.....	42
3.2. Вплив температури пресування на механічні властивості фанери.....	45
3.2.1. Межа міцності на зріз.....	45
3.2.2. Межа міцності під час статичного згинання.....	46
3.2.3. Модуль пружності під час статичного згинання.....	48
3.3. Висновки.....	49
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	51
ДОДАТКИ	60

ВСТУП

Фанера залишається одним із ключових деревинних композиційних матеріалів у меблевій, будівельній та транспортній галузях. Зростання вимог до екологічності клеїв, зниження формальдегідних викидів та підвищення експлуатаційної довговічності стимулюють пошук альтернатив традиційним термореактивним смолам. Одним із перспективних напрямів є використання термопластичних полімерів у вигляді плівок, що дає можливість усунути недоліки рідких клеїв, спростити процес нанесення та зменшити токсичне навантаження.

Проблемою залишається недостатня адгезія між гідрофільною деревиною та гідрофобними поліетиленовими плівками. Одним із шляхів підвищення міцності клейового з'єднання є хімічне модифікування поверхні шпону речовинами, здатними утворювати хімічні або реакційно-активні міжфазні зв'язки. Серед доступних і безпечних речовин значний науковий інтерес викликає лимонна кислота, яка завдяки карбоксильним групам може утворювати складноефірні зв'язки з деревиною та взаємодіяти з функціональними групами полімерів [35-42].

Важливим технологічним чинником формування адгезійного зв'язку є температура пресування, яка визначає ступінь плавлення полімеру, проникнення його в структуру деревини та швидкість перебігу хімічних реакцій, що відбуваються у модифікованому шпоні. Тому дослідження впливу температури пресування в комплексі з модифікуванням шпону є актуальним завданням для вдосконалення технологій виробництва фанери.

Об'єкт дослідження – технологічний процес виготовлення фанери.

Предмет дослідження – вплив температури пресування на механічні властивості фанери, виготовленої з березового шпону, модифікованого лимонною кислотою, склеєної плівкою ПЕНГ.

Мета роботи – встановити закономірності зміни механічних властивостей фанери залежно від концентрації розчину лимонної кислоти та

температури пресування під час склеювання термопластичною плівкою ПЕНГ.

Для досягнення поставленої мети виконано такі завдання:

1) дослідити вплив концентрації розчину лимонної кислоти на механічні властивості фанери за різних температур пресування;

2) проаналізувати вплив температури пресування на механічні властивості фанери, виготовленої зі шпону, модифікованого лимонною кислотою.

Результати роботи можуть бути використані в оптимізації технологічних режимів склеювання деревинних композиційних матеріалів без застосування формальдегідних смол.

Розділ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Фанера. Світове виробництво.

Фанера – один з перспективних видів деревинних композиційних матеріалів, що застосовується у меблевій та будівельній галузях. Близько 30–35% всієї виготовленої фанери в Україні використовується у меблевому виробництві. Фанера загального призначення середньої водостійкості марки ФК застосовується для виготовлення днищ шухляд, задніх стінок, перегородок, полиць, сидінь, спинок, а також цілої низки інших деталей меблів. При виготовленні високоякісних меблів застосовується фанера, личкована струганим шпоном. У будівництві споживається тільки 4,5–5,0 % фанери. Вона застосовується в дерев'яних спорудах каркасного, збірно-щитового, пересувного типів – для будівництва дерев'яних житлових будинків, гаражів, легких мостів, сільськогосподарських і спортивних приміщень. Також використовується для підлоги, обшиття стін і стель, виготовлення дверей і покрівлі. Деревинний композит застосовується як елементи несучих клеєних дерев'яних конструкцій, такі, як клеєні фанерні балки, легкі дерев'яні мости. Важливим є використання фанери як опалубки для бетонних робіт. У транспортному машинобудуванні використовується близько 1,5 % виготовленої фанери, яка застосовується також для личкування салонів автобусів, трамваїв, тролейбусів, для виготовлення сидінь. Тарне виробництво споживає не менше за 15 % всієї виробленої фанери. З фанери виготовляють різного вигляду ящики, піддони, контейнери тощо.

Найбільшим виробником фанери в Україні є ТзОВ “ОДЕК” Україна” з річним виробництвом у 2021 році – 115 тис. м³ [1].

Лідер виробництва фанери у світі – Азія (насамперед Китай, Індонезія, Індія, Малайзія – за окремими видами асортименту) (рис. 1.1). Найбільшим виробником серед країн Азії є Китай. У 2021 році він виробив 68,3 млн. м³ фанери.

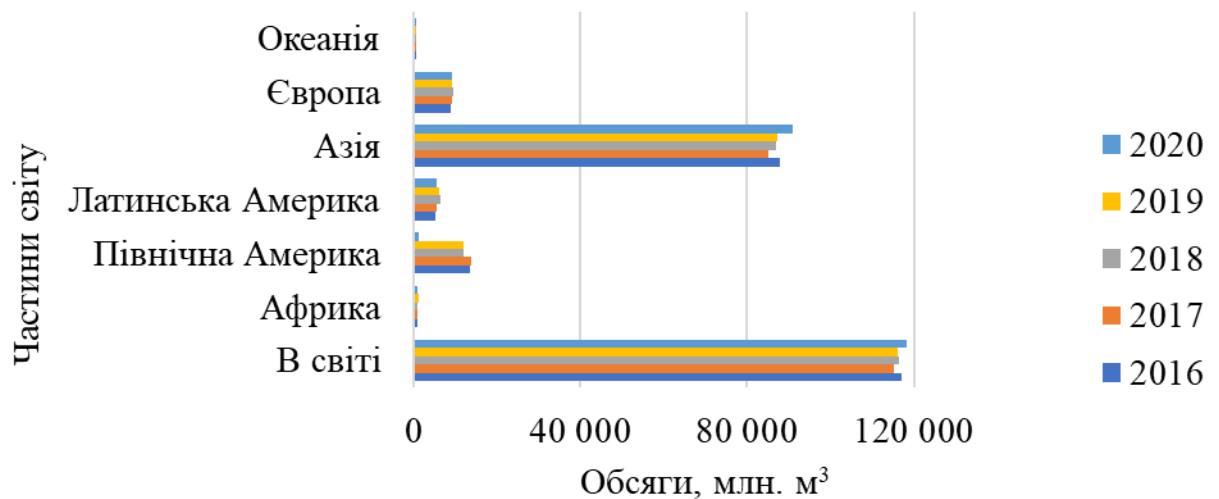


Рис. 1.1 – Обсяги виробництва фанери в світі [2]

Значна частина світового виробництва фанери зосереджена в Азії – 91,04 млн. м³ через розвиток меблевого виробництва, будівництва та доступність первинної сировини. Європа традиційно займає велику частку у виробництві деревинних композитів, зокрема фанери технічного та декоративного призначення – 9,13 млн. м³. За даними FAO, Європа виробляє значну частину ~30–35% від загального обсягу деревинних композитів. В Європі помітні коливання у виробництві композитів через ринковий попит на будівельні матеріали і постачання лісосировини.

Північна Америка (переважно США і Канада) – ще один великий регіон виробництва фанери й інших деревинних композитів – 1,14 млн. м³. Латинська Америка має помірну частку у світовому виробництві фанери – 5,35 млн. м³. Африка дає невеликий внесок у глобальне виробництво фанери за обсягами – 1,0 млн. м³. FAO показує невеликі річні величини для більшості африканських субрегіонів. Виробництво локалізоване і нерівномірне. Океанія дає помітну, але відносно малу частку світового виробництва фанери – 0,5 млн. м³.

В перспективі очікується, що попит на фанерну продукцію збільшуватиметься, як у світі, так і в Україні із-за стрімкого розвитку

будівництва [3]. Крім того, зростання технологічних досягнень також можуть розширити можливості фанери.

1.2. Аналіз використання клеїв у виробництві фанери

Упродовж останніх десятиліть у виробництві фанери активно досліджуються нові типи клеїв, здатні забезпечити підвищену міцність, водостійкість та екологічну безпечність готових виробів. Традиційні термореактивні клеї поступово доповнюються або замінюються інноваційними полімерними матеріалами, що мають значні технологічні переваги.

На світовому ринку для виробництва деревинних композитів використовують наступні клеї [4]: природні клеї (виготовлені з тваринної крові, шкіри, казеїну, крохмалю, сої, декстрину та целюлози); синтетичні клеї (термореактивні, термопластичні). Всі клеї залежно від використання поділяють на 2 групи:

- 1 група – фенолоформальдегід, резорцин, фенолрезорцин, дифенілметандізоціанат, емульсійний поліізоціанат, поліуретановий полімер, полівінілацетати (ПВА) та меламіноформальдегід. Ці клеї зазвичай використовуються у виробництві деревини, які потребують міцності в конструкції відразу після виготовлення та після впливу вологи, а саме: OSB, фанера, склесна ламінована деревина, для зрощування пиломатеріалів; у виробництві клеєного бруса; у виробництві структурного композитного пиломатеріалу;

- 2 група – включає карбамідоформальдегід, казеїн, альбумін, крохмаль та тваринні клеї. Через їх низьку стійкість до нагрівання та вологості ці клеї загалом використовуються для внутрішніх, неструктурних виробів з деревини, таких як СП, фанера, декоративне обшивання стін, СП середньої

щільності (МДФ) для меблів, шафи, внутрішні двері і архітектурне виробництво.

Фанерна промисловість до сих пір найчастіше використовує фенолформальдегідні (55-60 %) і карбамідоформальдегідні смоли (40-45 %) [5-8]. В даний час існує великий попит на екологічно чисті речовини, оскільки широко використовувані смоли містять токсичні та канцерогенні сполуки. Екологічні речовини є важливим питанням майбутнього. Тому проводяться дослідження з пошуку нових і нетоксичних смол, які не містять формальдегіду і можна застосовувати в процесі виробництва фанери без зниження міцності порівняно з фенолоформальдегідними смолами (ФФС). Потенційною альтернативою є смола на основі поліуретану на основі фурану [9, 17]. Фуранова смола була протестована з декількома різними модифікаціями (три різні кількості каталізатора) з автоматизованою системою оцінки зв'язку (ABES) за різних температур та часу витримки. Результати випробувань на зразках берези показали, що фуранова смола може досягти порівняльних властивостей міцності з ФФС. Проте фуранова смола з певною кількістю каталітичного агента потребує більш високої температури пресування, ніж чиста ФФС, щоб отримати майже таку ж міцність.

Наукові дослідження демонструють можливість ефективного склеювання шпону з різними видами клеїв та полімерів, зокрема з ізоціанатними смолами [10, 11], епоксидними смолами [12], танінами [13], лігніном [14], соєвим білком [15], пінополістиролом [16], поліуретановими клеями [18], та поліефірними смолами [19, 20].

Одним із найбільш перспективних напрямів покращення властивостей фанери є використання термопластичних полімерів у вигляді плівок (поліетилен високої та низької щільності, поліпропілен, полістирол). Такий підхід довів свою ефективність у численних дослідженнях [21-30].

Використання термопластичних плівок як клею усуває низку технологічних труднощів, характерних для рідких термореактивних смол. Плівка є простою в нанесенні, не потребує попереднього змішування, а процеси дозування та підготовки клею значно спрощуються. Завдяки цьому зменшується кількість відходів, покращується чистота виробництва та усуваються недоліки, властиві рідким смолам.

У роботі Song et al. [28] було представлено узагальнення досліджень композитів на основі евкالیптового шпону та плівки поліетилену високої щільності (ПЕНТ). Мікроскопічний аналіз показав, що міжфазна взаємодія між деревиною та полімером формується завдяки механічному блокуванню. Отримані значення водостійкості клейових з'єднань відповідали вимогам стандартів для вологостійких матеріалів, що дозволяє розглядати такі композити як екологічно безпечну альтернативу фанері на основі формальдегідних смол.

Механізм взаємодії між шпоною та полімером досліджували за допомогою оптичної та сканувальної електронної мікроскопії [22, 24, 25, 31, 11], а також завдяки системам оцінювання автоматизованих зв'язків ABES [17, 32]. Електронна мікроскопія [33] не показала наявності хімічних зв'язків між полімерною плівкою та деревиною. Адгезія забезпечується переважно за рахунок механічного проникнення полімеру в клітинні структури деревини. ABES-система підтвердила, що на міцність з'єднання суттєво впливають вологість шпону, умови сушіння та попередня гідротермічна обробка. Поряд із адгезійними характеристиками досліджували й фізико-механічні властивості готової фанери: набрякання, водопоглинання, межу міцності на зріз, міцність на згин та модуль пружності. Встановлено, що термопластичні полімери здатні проникати в судини та клітини шпону, утворюючи структуру механічного блокування по всій клейовій лінії. Важливо, що вміст води в шпоні в межах 8–25% не спричиняє дефектів склеювання [15, 33, 34].

Термопластичний матеріал не перешкоджає виходу пари, тому не спостерігається здуття чи відшарування шпону.

Отримані результати підтверджують перспективність використання термопластичних полімерів як клеїв у виробництві фанери. Термопластична фанера може успішно застосовуватись у внутрішніх інтер'єрах, навіть у середовищах з підвищеною вологістю, та має переваги над традиційними матеріалами, виготовленими на основі карбамідо- і фенолоформальдегідних смол. Дані фізико-механічних властивостей термопластичної фанери узгоджуються з вимогами стандарту EN 314-2:1993, що підтверджує її технологічну придатність і конкурентоспроможність.

1.3. Аналіз використання модифікувальних речовин у виробництві фанери

Підвищення адгезійної взаємодії між деревиною та термопластичними полімерними плівками є важливою умовою отримання міцних і водостійких деревинних композитів. Для цього у фанерному виробництві застосовують широкий спектр модифікувальних речовин, здатних змінювати хімічну активність та полярність поверхні як деревини, так і полімеру. Серед таких речовин найчастіше використовують малеїновий ангідрид, силанові агенти, хлоровані модифікатори та органічні кислоти [32, 35-42].

Однією із найбільш ефективних модифікувальних речовин є малеїновий ангідрид, який застосовують безпосередньо або у складі полімерів, привитих до поверхні поліпропілену чи поліетилену (МАПП, ПЕ-МА) [32]. Між О-Н групами деревини та привитими групами малеїнового ангідриду відбувається реакція етерифікації, що забезпечує формування хімічного зв'язку між полярною деревиною та неполярною полімерною матрицею. Подібним чином силанові модифікатори, зокрема γ -амінопропілтриетоксисилан (АПТЕС), взаємодіють із гідроксильними

групами деревини шляхом реакції конденсації, утворюючи стабільні ковалентні зв'язки. Завдяки біфункціональній структурі ці речовини здатні одночасно поглинати гідрофільні групи деревини та вводити гідрофобні фрагменти, підвищуючи сумісність деревини з полімером [43, 44]. Покращена взаємодія між шпоною та термопластичним полімером зменшує міжфазний просвіт і перешкоджає проникненню води в композит, що підвищує міцність клейового з'єднання. Це підтверджено дослідженнями з використанням автоматизованої системи ABES [36, 37]: зразки фанери, склеєні за допомогою МАПП, продемонстрували значно вищу міцність на зріз та більшу частку руйнування деревини, ніж композити деревина–ПП, у яких руйнування відбувалося переважно в полімерній матриці.

Одночасне хлорування поліетилену та прививання до нього малеїнового ангідриду збільшує полярність полімеру, проте надмірна кількість хлору спричиняє зниження кристалічності ПЕ, що негативно позначається на міцності фанери. Тому у виробництві важливо контролювати вміст хлору, забезпечуючи оптимальний баланс між реакційною здатністю та структурною стабільністю термопластичного полімеру.

Ефективним методом є також поверхнева модифікація шпону силановими агентами, наприклад вінілтриметоксиланом (силан А-171) [36]. Дослідження FTIR та аналіз кута змочування довели наявність адсорбованих гідролізованих алкоксисиланів на поверхні деревини та утворення ковалентних зв'язків. Це значно підвищує міцність з'єднання на зріз і водостійкість фанери.

Серед екологічно безпечних і доступних модифікаторів важливе місце посідає лимонна кислота, яка здатна реагувати з гідроксильними групами деревини та розплаву термопластичного полімеру [44-49]. Карбоксильні групи кислоти утворюють складноефірні з'єднання із целюлозою та геміцелюлозами шпону й одночасно взаємодіють з ОН-групами на поверхні

полімеру. Це забезпечує зшивання функціональних груп і сприяє формуванню стабільного клейового з'єднання (рис. 1.1).

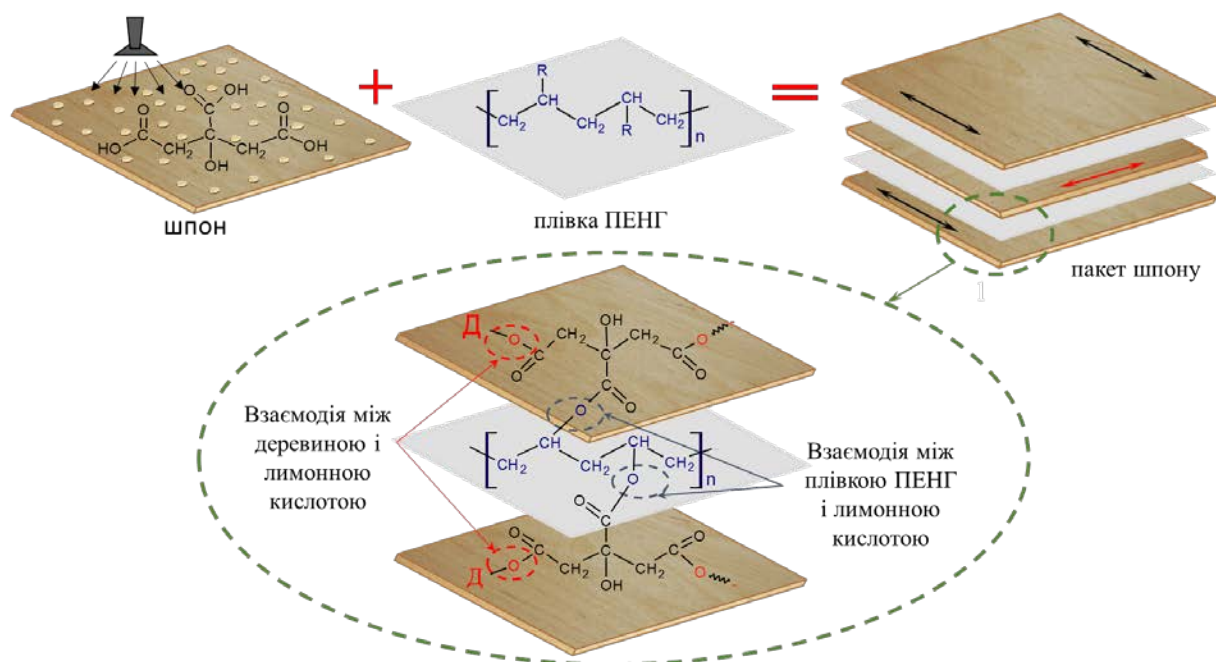


Рис. 1.1 – Можлива хімічна реакція між деревиною (шпоном), лимонною кислотою і плівкою ПЕНГ [50]

Отже, застосування модифікувальних речовин у виробництві фанери є ефективним способом покращення адгезії та сумісності між деревиною й термопластичними полімерними плівками. Хімічне модифікування поверхні матеріалів сприяє формуванню міцних, водостійких і довговічних клейових з'єднань, що є важливим напрямом удосконалення фанерного виробництва.

1.4. Вплив параметрів пресування на механічні властивості фанери

Механічні властивості фанери залежать від щільності, вологості, способу виробництва, породи деревини, виду клею, вад деревини, а також значною мірою від параметрів пресування [51, 52]. Основні механічні показники, які характеризують властивості продукції залежно від її призначення: межа міцності під час розтягування (в різних напрямках щодо волокон), межа міцності під час поздовжнього згинання, межа міцності під

час поперечного згинання, межа міцності на зріз після вимочування, модуль пружності (табл. 1.1) [53-55].

Таблиця 1.1 – Фізико-механічні показники фанери

Показники	Фанера		
	березова	соснова	бакелізована
Щільність, кг/м ³	720	720	1200
Межа міцності під час розтягування вздовж волокон зовнішніх шарів, МПа	88,9	80,8	59,0-88,0
Те саме, впоперек волокон, МПа	86,4	59,8	-
Межа міцності під час статичного згинання вздовж волокон зовнішніх шарів, МПа	61,0	49,3	88,0-117,5
Те саме, впоперек волокон, МПа	10,5	8,1	63,5-78,5

Механічні показники фанери залежать від породи деревини. Якщо прийняти механічні показники міцності фанери з берези за одиницю, то механічні показники фанери з інших порід деревини становлять: з бука – 0,92, ялини – 0,78, сосни – 0,74, тополі – 0,61. Якщо фанера виготовлена з деревини різних порід, то норма міцності для неї встановлюється за породою, що має меншу міцність при сколюванні. Основний визначальний фактор міцності фанери – міцність лушеного шпону.

Щодо режимних параметрів пресування, то температура визначає ступінь полімеризації клею та проникнення його у пори деревини [56-68]. Дослідження показують, що оптимальний температурний режим для фанери на основі фенолоформальдегідних клеїв становить 110 – 130 °С, а для карбамідоформальдегідних – 100 – 120 °С. Для фанери, склеєної на основі термопластичних полімерів температура пресування залежить від температури плавлення полімеру. Оптимальна температура плавлення полімеру не має перевищувати 200 °С, оскільки відбувається термічний розклад компонентів деревини, що веде до зменшення когезійної міцності клейового з'єднання [71]. Невідповідна температура веде до: зниження межі

міцності на згинання та модуля пружності, пористості клейового шва, внутрішніх дефектів фанери.

Тиск пресування забезпечує щільне прилягання шарів шпону та рівномірний розподіл клею. Занадто низький тиск (менше 0,8–1 МПа) викликає розшарування, тоді як надмірний (більше 1,5 МПа) – видавлювання клею та деформацію шпону. Оптимальний тиск дозволяє отримати: стабільну товщину фанери, високу міцність на зріз, покращені показники згинання та пружності.

Час пресування визначає прогрівання середини пакета шпону до відповідної температури для проникнення в'язкотекучого полімеру в структуру деревини. Занадто короткий час призводить до неповного склеювання, а надмірно тривалий – до енергетичних втрат і втрати міцності. Для фанери товщиною 6–12 мм оптимальний час становить 4–8 хв на шар під час гарячого пресування. Вплив часу на механічні властивості: збільшення міцності на зріз із збільшенням часу до оптимального значення, стабільні показники модуля пружності та міцності на згинання.

Вологість шпону впливає на теплопередачу та утворення пари у клейових швах. Для більшості видів фанери оптимальна вологість складає 8–12 %. Надмірна вологість – здуття, пористість, зниження міцності. Недостатня вологість – нерівномірне змочування клею, крихкість клейових швів. Bekhta and Sedliačik [72] для склеювання вільхового шпону використовували полімерну плівку ПЕВГ. Виготовляли тришарову фанеру за різної температури 140, 160 та 180 °С, тиску 0,8, 1,2 та 1,6 МПа та часу пресування 1, 2, 3, і 5 хв. Отримані значення міцності фанери на зріз, склеєної ПЕВГ становили від 0,74 до 2,38 МПа. За результатами досліджень оптимальними умовами для виготовлення фанери були температура 160 °С, тиск 0,8 МПа та тривалість 3 хв.

Song et al. [28, 29] склеювали пакети евкالیптового шпону ПП плівкою. Виготовляли фанеру за наступним режимом пресування: температура 165,

175, 180, 185, 195 °С; тиск 0,9; 1,1; 1,3 МПа; тривалість 40, 55, 70 с/мм. Оптимальний режим виготовлення фанери із задовільними властивостями наступний: температура 180 °С, тиск 0,9 МПа, тривалість 70 с/мм.

Chang et al. [25] виготовляли фанеру з листів тополевого шпону, склеєного плівкою ПЕВГ. Виготовляли п'ятишарову фанеру за наступним режимом пресування: температура 140, 150, 160, 170, 180 °С; тиск 0,1; 0,4; 0,7; 1,0; 1,3 МПа; тривалість 6,4 хв. Витрата плівки від 61,6 до 308 г/м². Оптимальним режимом склеювання був: температура – 160 °С; тиск – 1,0 МПа; тривалість 6,4 хв.

Кусняк І. [49] виготовляли фанеру з листів березового шпону, склеєного плівкою ПЕНГ. Виготовляли п'ятишарову фанеру за наступним режимом пресування: температура 140, 160, 180 °С; тиск 1,8 МПа; тривалість 6,5 хв. Витрата плівки 130, 150, 170, 190 г/м². Рекомендованими технологічними параметрами виготовлення фанери склеєної ПЕНГ є: температура пресування – 160 °С, витрата клею – 130 г/м², тиск пресування – 1,8 МПа, тривалість пресування – 6,5 хв.

Таблиця 1.2 – Механічні властивості фанери склеєної термопластичним плівками

Показник	Вид полімеру						Вимоги згідно EN 314-2
	ПЕВГ [21]	ПЕВГ [23]	ПЕВГ [22]	ПЕВГ [72]	ПЕНГ [49]	ПП [29]	
Межа міцності на зріз, МПа	2,32	1,46	1,15	2,38	1,56	1,41	
Межа міцності під час згинання, МПа	91,0	82,78	62,0	119,3	105,83	106,0	
Модуль пружності, МПа	10,83	7,48	6,42	9,51	10,50	13,7	

Комплексне дослідження параметрів пресування дозволяє не лише підвищити якість продукції, але й знизити енергетичні витрати та матеріальні втрати у виробництві.

1.5. Висновки

Світове виробництво фанери характеризується стабільним зростанням, зумовленим широким застосуванням матеріалу у будівництві, меблевій та транспортній галузях. У сучасних технологіях особливе значення мають клеї, які забезпечують міцність та довговічність фанери. Використання модифікувальних речовин, зокрема лимонної кислоти, підвищує адгезійні властивості клейових композицій та якість формування клейового шва.

Параметри пресування – температура, тиск, тривалість і вологість шпону – визначають структуру та механічні характеристики готового матеріалу. Їх оптимізація забезпечує підвищення міцності під час згинання, модуля пружності та міцності на зріз.

Узгоджене застосування ефективних клеїв, модифікувальних речовин та раціональних режимів пресування є ключовим чинником отримання фанери з високими експлуатаційними властивостями та конкурентоспроможністю на світовому ринку.

Об'єктом дослідження є технологічний процес виготовлення фанери.

Предметом дослідження є вплив температури пресування на механічні властивості фанери, виготовленої з березового шпону, модифікованого лимонною кислотою, склеєної первинною плівкою ПЕНГ.

Мета роботи – з'ясувати механічні властивості фанери, склеєної з хімічно модифікованого шпону первинною термопластичною плівкою ПЕНГ за різної концентрації розчину та температури пресування. Для досягнення поставленої мети було сформовано та вирішено наступні завдання:

- 1 Дослідити вплив концентрації розчину лимонної кислоти за різної температури пресування на механічні властивості фанери.
- 2 Дослідити вплив температури пресування на механічні властивості фанери.

Розділ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

За результатами теоретичного аналізу склеювання шпону термопластичними полімерами, покращення адгійних властивостей та впливу температури пресування на процес склеювання пакетів із модифікованого шпону, встановлено необхідність проведення додаткових експериментальних досліджень. Передбачається, що отримані експериментальні дані дадуть змогу визначити залежність механічних властивостей фанери від концентрації лимонної кислоти та температури пресування, що в подальшому може бути використано для оптимізації технологічного процесу склеювання.

2.1. Матеріали та реактиви

Для виготовлення фанери, склеєної з листів модифікованого шпону термопластичною плівкою, були використані наступні матеріали та реактиви:

- лущений березовий шпон розміром $300 \times 300 \times 1,55$ мм, вологістю $6 \pm 2\%$;
- первинна плівка ПЕНГ (ISO 14024);
- лимонна кислота – $C_6H_8O_7$;
- дистильована вода.

Поверхнєве модифікування шпону проводили розчином лимонної кислоти, фізико-хімічні властивості якої наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Фізико-хімічні властивості лимонної кислоти

№з/п	Найменування показника	Норма
1	Масова частка лимонної кислоти, %	
	не менше	99,5
	не більше	100,5
2	Масова частка води, %	
	не менше	7,5
	не більше	8,8
3	Масова частка сульфатів %	0,015
4	Масова частка оксалатів, %	0,01

Для склеювання листів березового шпону використовували первинну плівку ПЕНГ товщиною 100 мкм, фізико-механічні властивості якої наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Фізико-хімічні властивості плівок ПЕНГ [49]

№з/п	Найменування показника	Норма для плівок ПЕНГ
1	2	3
1	Товщина, мкм	15–500
2	Густина за 20 °С, г/см ³	0,919–0,929
3	Температура плавлення, °С	108–115
4	Температура початку деформації, °С	90–100
5	Морозостійкість, °С	–70
6	Робочий інтервал температур, °С	від –60 до + 80
7	Модуль пружності під час розтягування, МПа	147–294
8	Межа текучості під час розтягування, МПа	8,8–11,9
9	Водопоглинання за 24 год за 20 °С, %	0,01
10	Діелектричне проникнення за 10 ⁶ Гц, 20 °С	2,2
11	Тангенс кута діелектричних втрат за 10 ⁶ Гц, 20 °С	0,0003
12	Питомий об'ємний електричний опір за 20 °С, Ом·м	1·10 ⁻¹⁸ –1·10 ⁻¹⁹

2.2. Вимірювальні прилади та обладнання

Експериментальні дослідження проводилися з використанням наступних приладів та обладнання:

- лінійка металева;
- штангенциркуль;
- індикатор годинникового типу;
- ножиці;
- вологомір НМВ-WS1;
- вага електронна AD 2000 (точність вимірювання 0,01 г);
- лабораторний гідравлічний прес фірми "Хомко";
- прес для холодного пресування ПММ-125;
- сушильна шафа SNOL 67/350;
- круглопилковий верстат;
- ексикатор;

- фільтрувальний папір;
- стакан мірний (об'єм 200 мл);
- скляна паличка;
- розпилювач для розчину;
- персональний комп'ютер для обробки результатів досліджень.

2.3. Методика модифікування поверхні шпону

Всі експериментальні дослідження виконували в лабораторії кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу НЛТУ України проводилися.

Хімічне модифікування поверхні шпону є одним із найбільш ефективних способів підвищення адгезійних властивостей деревинних матеріалів (див. пункт 1.3), що підтверджено результатами широкого кола експериментальних і теоретичних досліджень [35-42]. Цей метод полягає у цілеспрямованому впливі хімічних реагентів на поверхневий шар шпону, внаслідок чого змінюються його структурно-хімічні характеристики: підвищується полярність та енергія поверхні, активуються гідроксильні групи, зростає змочуваність та хімічна реактивність. Такі зміни сприяють формуванню більш стабільного і міцного клеєвого з'єднання з полімерною плівкою.

Для проведення хімічного модифікування були використані водні розчини лимонної кислоти з концентраціями 5, 15 та 25 % витратою 50 г/м². Маса наважки кислоти становила 4,5 г відповідно до заданих концентрацій. Розчини готували безпосередньо перед нанесенням та наносили на поверхню шпону методом дрібнодисперсного розпилення, що забезпечувало рівномірне покриття всієї площі шпону та стабільну інтенсивність хімічного впливу (рис. 2.1). Обраний спосіб оброблення сприяв однорідності модифікування та мінімізував можливі локальні коливання у кількості реагенту.



Рис. 2.1 – Спосіб нанесення модифікувального розчину на поверхню шпону

Виготовляли тришарову фанеру. Із трьох листів шпону розчин лимонної кислоти наносили з однієї сторони двох зовнішніх листів фанери та з двох сторін на середній шар фанери. Кожен лист шпону із нанесеним на ньому модифікувальним розчином піддавали сушінню у сушильній шафі за температури $102\text{ }^{\circ}\text{C}$ до вологості $6 \pm 2\%$ (рис. 2.2).



Рис. 2.2 – Сушіння шпону у сушильній шафі SNOL 67/350

Вологість шпону постійно контролювали за допомогою вологоміра HMB-WS1 (рис. 2.3).



Рис. 2.3 – Визначення вологості луценого шпону вологоміром HMB-WS1

Контролювання вологості шпону в межах $6 \pm 2\%$ дуже важливе під час склеювання пакетів термопластичними плівками, бо підвищена вологість шпону блокує проникнення в'язкотекучого полімеру в структуру деревини, що викликатиме непроклеювання листів шпону між собою [48-50].

Після сушіння шпону замірювали його товщину індикатором годинникового типу (рис. 2.4). Це необхідно, що визначити в подальшому величину спресування фанери.



Рис. 2.4 – Момент визначення товщини шпону

2.4. Методика досліджень механічних властивостей фанери

2.4.1. Виготовлення фанери

Тришарову фанеру виготовляли з листів модифікованого березового шпону склеєного термопластичною плівкою ПЕНГ замість термореактивних клеїв. Характеристика плівки наведена в табл. 2.2. Для проведення експериментальних досліджень була використана плівка фірми ТОВ “Планета пластик” у вигляді рукава, тому перед формуванням пакетів шпону її розкрюювали на форматні листи розміром 300×300 мм (рис. 2.5).



Рис. 2.5 – Розкроювання плівки ПЕНГ

Наступним етапом було формування пакетів шпону. Для цього між листами модифікованого березового шпону укладали один лист плівки ПЕНГ. Пакет формували з дотриманням правил симетрії між суміжними листами шпону та вкладанням лівої сторони напівфабрикати в середину. Загалом сформований пакет шпону складався з трьох листів модифікованого березового шпону та двох термопластичних плівок ПЕНГ, розміри яких відповідали розмірам шпону. Схема формування пакетів шпону наведена на рис. 2.6.



Рис. 2.6 – Схема формування пакета шпону

Після формування пакети шпону піддавали пресуванню в гідравлічному пресі фірми “Хомко” гарячим способом. (рис. 2.7).



Рис. 2.7 – Склеєний лист фанери в лабораторному пресі “Хомко”

Умови склеювання пакетів шпону наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.4 – Планування експериментальних досліджень

Назва клею	Умови виробництва фанери				
	Концентрація розчину, %	Витрата розчину, г/м ²	Температура пресування, °С	Тиск пресування, МПа	Час пресування, хв
ПЕНГ	5, 15, 25	50	140, 160, 180	1,4	4,5
	-	-			

Завершальним етапом виготовлення фанери було холодне пресування фанери за кімнатної температури 20 ± 2 °С впродовж 5 хв. Дана операція необхідна умова для завершення процесу затвердіння термопластичного полімеру та зменшення короблення фанери. (рис. 2.8).

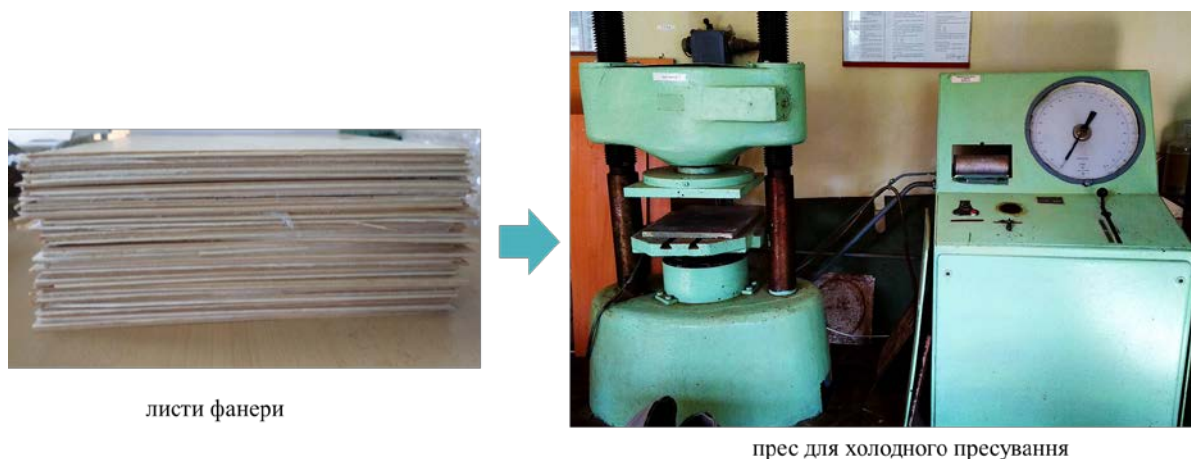


Рис. 2.8 – Холодне пресування ПММ-125

Після холодного пресування листи фанери кондиціювали 7 діб ($T=20\pm 2$ °С, $W=65\pm 5$ %).

Механічні властивості фанери, склеєної з модифікованого шпону первинною термопластичною плівкою, порівнювали з властивостями фанери склеєної з немодифікованого шпону плівкою ПЕНГ.

Після кондиціювання, з кожного листа фанери вирізали зразки для визначення наступних механічних показників [53-55] (рис. 2.9):

- міцності на зріз (EN 314-1, EN 314-2);
- міцності на згин (EN 310);
- модуля пружності (EN 310).



розкрій листів фанери



зразки фанери для випробувань

Рис. 2.9 – Підготовка зразків фанери до випробувань

2.4.2. Випробування і визначення механічних властивостей фанери

Міцність фанери на зріз

Міцність фанери на зріз характеризує опір матеріалу руйнуванню під дією дотичних напружень, які викликають взаємне зміщення шарів шпону в площині клеєвого з'єднання. Цей показник відображає ефективність адгезійної взаємодії між шарами деревини і клею. Даний показник залежить від: виду клею; параметрів пресування (тиску, температури, тривалості); вологості шпону під час склеювання й вологості готової фанери; породи деревини; шорсткості та тріщин на поверхні шпону.

Для визначення механічних показників фанери відбирали зразки без видимих вад і дефектів деревини у місцях зрізів. Кожен зразок для випробувань нарізали таким чином, щоб напрям волокон шару, що знаходиться між двома клеєвими швами, що його перевіряють, проходив поперек довжини досліджуваного зразка (рис. 2.10).

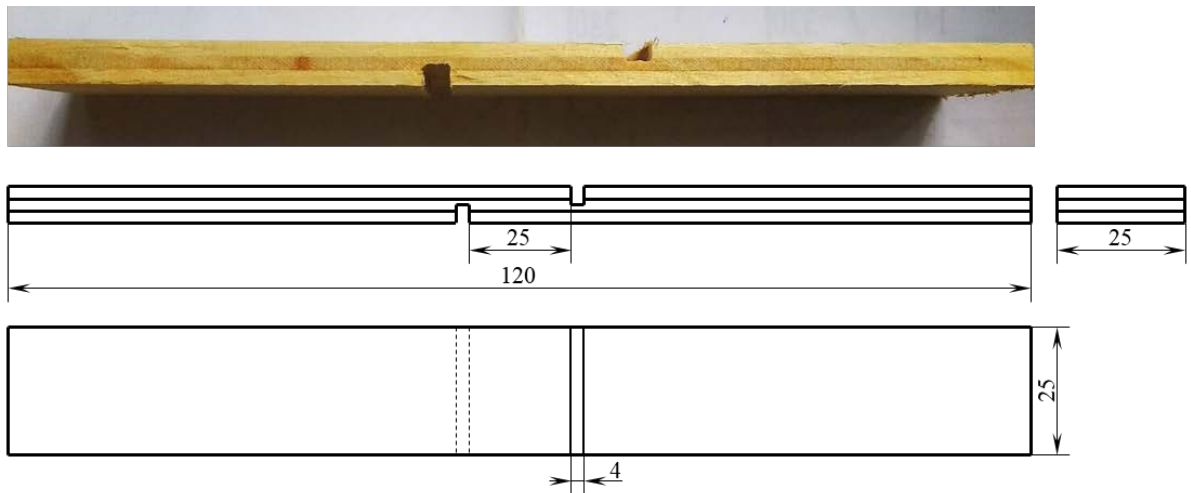


Рис. 2.10 – Зразок для випробувань міцності фанери на зріз згідно EN 314-1

Довжина та ширина площі зрізу має бути рівна $25 \pm 0,5$ мм. У кожному випадку розрізи закінчувалися всередині шару. Зразки встановлювали в затискні кулачки таким чином, щоб навантаження випробувальної машини без бічних сил передавалося через торці зразків на ділянку розрізу (2.11).

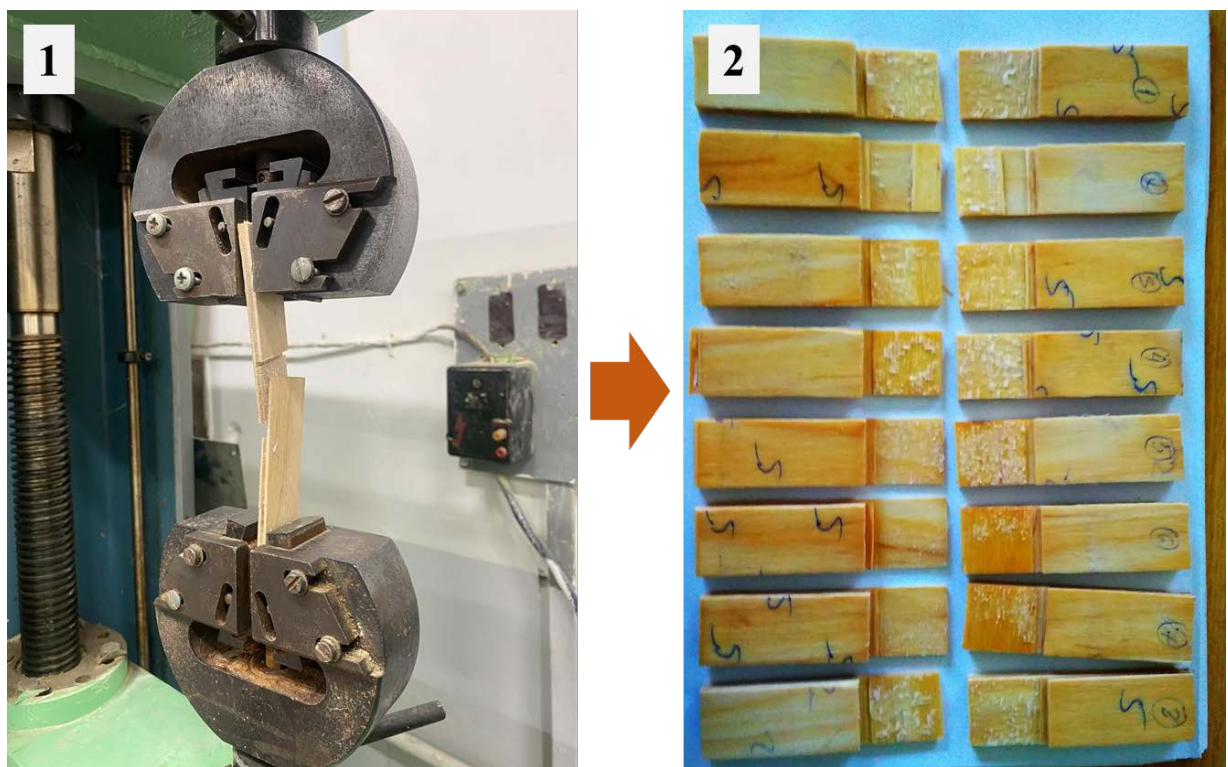


Рис. 2.11 – Визначення міцності фанери на зріз: 1 – зразок фанери в момент випробування; 2 – зразки фанери після випробування

Навантаження прикладалося з постійною швидкістю таким чином, що руйнування відбувалося через (30 ± 10) с. Руйнування виявляється на деревині або на шарах клею в місці зрізу, тобто між надрізами. Якщо руйнування відбувається за межами цієї зони або після 50 % руйнування фанери на поверхневих шарах, цей результат випробування слід виключити і випробування слід повторити з довжиною розрізу 10 мм. Необхідно також видалити ті зразки, поломка яких була викликана дефектами, що знижують міцність.

Міцність на зріз кожного зразка для випробування (у МПа) обчислювали за формулою:

$$\sigma_{зр} = \frac{F}{l \cdot b} \cdot 100, \quad (2.1)$$

де F – сила руйнування зразка, Н;

l – довжина площі зрізу, мм;

b – ширина площі зрізу, мм.

Середнє арифметичне значення міцності на зріз треба обчислювати з точністю до $0,01$ Н/мм².

Межа міцності фанери на статичний згин

Міцність під час статичного згинання – це граничне напруження, яке фанера може витримати під дією плавно зростаючого навантаження до моменту руйнування. Показує загальну опірність матеріалу деформаціям згинанням. Залежить від: напрямку волокон у зовнішніх шарах шпону (вздовж або впоперек); кількості шарів та їхньої товщини; породи деревини; якості клеєвого з'єднання; щільності та вологості фанери; внутрішніх дефектів (сучків, тріщин, розшарувань).

Випробування зразків фанери на міцність під час статичного згинання виконували на обладнанні, що складається з двох паралельних циліндричних опор з роликowymi підшипниками ($d=15 \pm 0,5$ мм) і навантажувального циліндра ($d=30 \pm 0,5$ мм), довжина яких перевищує ширину зразка (рис. 2.12).

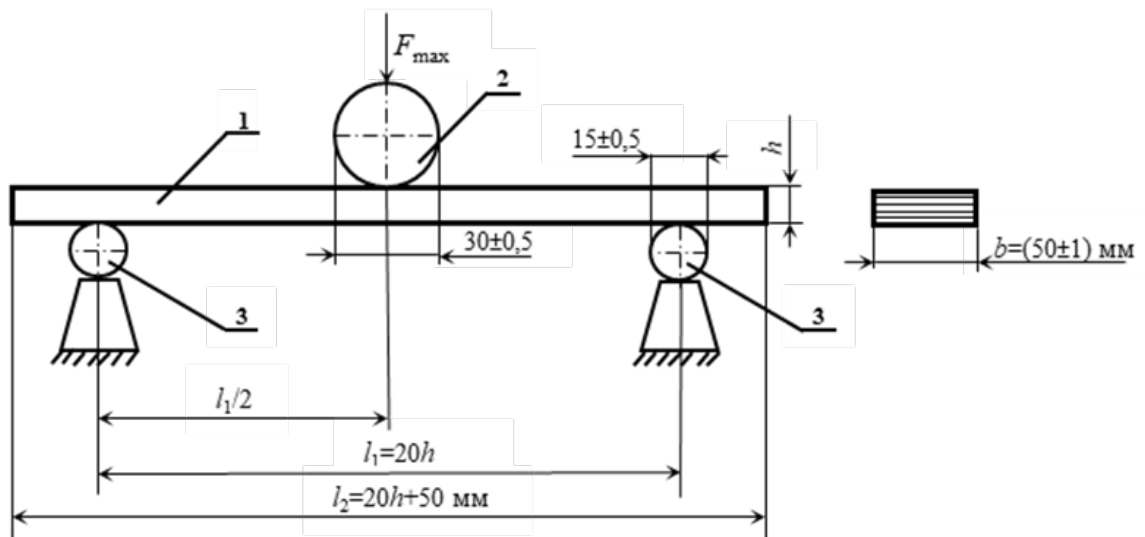


Рис. 2.12 – Схема випробування зразка фанери на згин:

1 – зразок; 2 – навантажувальний циліндр; 3 – циліндричні опори

Навантажувальний циліндр знаходиться паралельно опорам на однакових відстанях від них. Відстань між центрами опор l_1 становить $20h$, але не менше 100 мм і не більше 1000 мм. Середня (робоча) частина довжини зразка не має містити видимих вад деревини і дефектів склеювання. На кінцях зразка вади і дефекти, що відповідають встановленим нормам випробовуваної клеєної продукції, допускаються.

Перед випробуванням у кожного зразка посередині довжини вимірюється товщина h у напрямку прикладання навантаження і ширина b в напрямку, перпендикулярному прикладанню навантаження, з похибкою не більше 0,1 мм. Зразки фанери вкладають на опори випробувального пристрою по відмітках так, щоб повздовжня вісь взірця була перпендикулярна осям опор, а поперечна вісь перебувала в одній вертикальній площині з віссю циліндра згідно рис. 2.13.

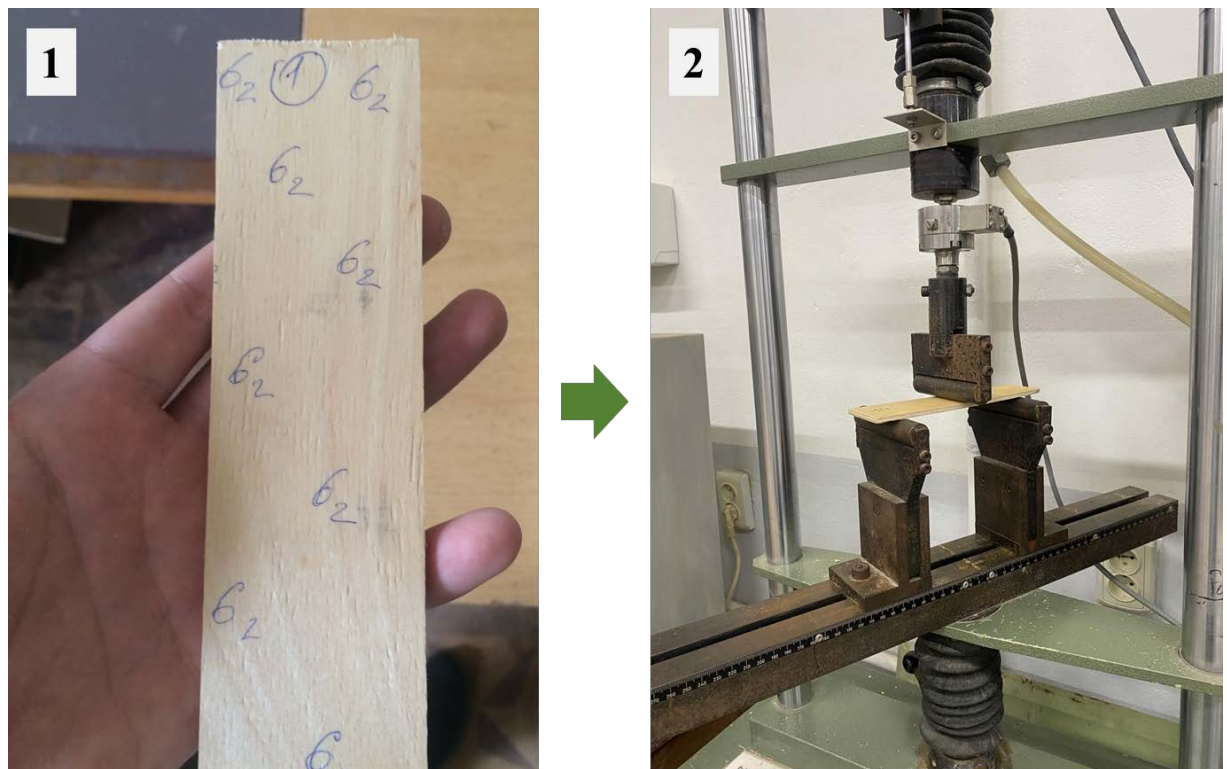


Рис. 2.13 – Визначення межі міцності на статичний згин та модуля пружності: 1 – зразок фанери для випробувань; 2 – робочий момент випробування зразка фанери

Під час визначення показника міцності здійснюється навантаження взірця з постійною швидкістю до руйнування і реєструється максимальне навантаження з точністю до 1 %. Час від початку навантаження до руйнування взірця становить (60 ± 30) с. Результати випробувань зразків, що зруйнувалися за межами робочої частини по допустимих вадах і дефектах на кінцях зразка, не враховуються.

Межу міцності під час статичного згинання σ (МПа) визначали для кожного зразка за формулою:

$$\sigma_{зг} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2}, \quad (2.2)$$

де F – максимальне навантаження, Н;

l – відстань між опорами, мм;

b – ширина зразка, мм;

h – товщина зразка, мм.

Модуль пружності фанери

Модуль пружності фанери під час статичного згинання – це характеристика жорсткості, що визначає відношення напруження до відповідної деформації в пружній області. Модуль пружності показує, наскільки сильно деформуватиметься фанера під дією навантаження: чим він більший, тим менше прогинання матеріалу. Залежить від: породи деревини та напрямку волокон у зовнішніх шарах; товщини шпону та кількості шарів; якості клеєвого з'єднання та умов пресування; вологості фанери; внутрішніх дефектів та однорідності структури.

Модуль пружності фанери визначається на тих же зразках, що й межа міцності під час статичного згинання (рис. 2.14).

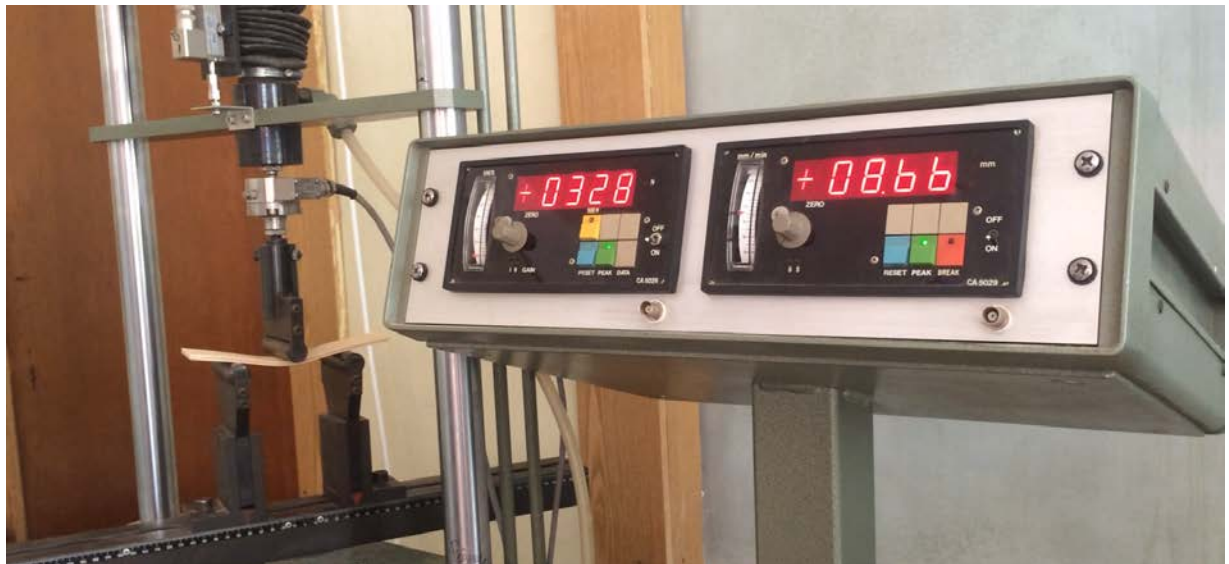


Рис. 2.14 – Визначення модуля пружності фанери

Модуль пружності фанери під час статичного згинання у МПа визначали за формулою:

$$E_m = \frac{l_1^3 \cdot (F_2 - F_1)}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot (a_2 - a_1)}, \quad (2.3)$$

де l_1 – відстань між центрами опор випробувального пристрою, мм;

b, h – відповідно ширина та товщина взірця, мм;

$(F_2 - F_1)$ – діапазон заміряного зусилля, Н;

$(a_1 - a_2)$ – прогинання зразка у діапазоні навантаження $(F_2 - F_1)$, мм.

Величина прогинання центральної частини зразка заміряється в момент досягнення зусилля $F_1 = 10\%$ та $F_2 = 40\%$ максимального навантаження.

За результат випробування приймали середнє арифметичне показників усіх зразків, отриманих з відповідного листа фанери.

2.5. Статистична обробка даних результатів досліджень

Після завершення випробувань була проведена попередня статистична обробка експериментальних даних для прискорення подальших розрахунків і запобігання помилок. Результат експериментального дослідження розглядається як статистичний набір випадкових величин. Під час статистичної обробки експериментальних даних визначено наступні основні статистичні параметри [69, 70]:

Середнє арифметичне значення

Найбільш відомим і поширеним у повсякденній практиці варіаційно-статистичним елементом є середнє арифметичне, яке розраховують за формулою:

$$\bar{y} = \frac{(y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n)}{n}, \quad (2.4)$$

де y_1, y_2, \dots, y_n – отримані результати досліджень;

n – число спостережень.

Вибіркова дисперсія та середньоквадратичне відхилення

Середнє арифметичне дає уявлення про середнє значення досліджуваної властивості, але не виражає його мінливості та межі коливань. Тому, крім нього, розраховують величини, що характеризують середню мінливість досліджуваної властивості - середньоквадратичне відхилення та дисперсію. Їх розраховують за формулами:

$$S^2 = \frac{(y_1 - \bar{y})^2 + (y_2 - \bar{y})^2 + \dots + (y_n - \bar{y})^2}{n - 1}, \quad (2.5)$$

де n – число дослідів, що дублюються в кожній серії;

y_i – значення в i -му досліді;

\bar{y} - середнє арифметичне значення.

Середньоквадратичне відхилення

$$S = \sqrt{S^2}, \quad (2.6)$$

Коефіцієнт варіації

Для оцінки змінюваності (варіації) випадкових величин використовують коефіцієнт варіації, який визначають за формулою:

$$V = \frac{S}{\bar{y}} \cdot 100 \%, \quad (2.7)$$

Даний коефіцієнт характеризує розсіювання випадкової величини відносно середнього значення вибірки, тобто є відносним розсіюванням.

Середньоквадратична похибка середнього значення

Визначивши середнє арифметичне для певної властивості, не можна впевнено стверджувати, що отриманий результат точно характеризує середню величину властивості у всіх інших випадках, що нами не досліджувалися. Тому визначають середньоквадратичну похибку середнього значення за формулою:

$$S_y = \pm \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (2.8)$$

Показник точності досліджу

Подібно до коефіцієнта варіації середня похибка може бути виражена у % до відповідного середнього арифметичного. Отримана величина називається показником точності досліджу (середнього значення) і визначається за формулою:

$$P = \pm \frac{S_y}{\bar{y}} \cdot 100, \% \quad (2.9)$$

Показник точності характеризує надійність результатів досліджень. Чим він менший, тим надійніші результати досліджень. При вивченні фізико-механічних властивостей деревини прийнято, що достатня надійність експериментів буде забезпечена тільки в тому випадку, коли показник точності не перевищує 5 %. Результати статистичної обробки дослідних даних наведені в додатках [А1-А3].

Розділ 3. ОБРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

Мета дослідження – з’ясувати механічні властивості фанери, склеєної з шпону модифікованого розчином лимонної кислоти різної концентрації, первинною термопластичною плівкою ПЕНГ за різної температури пресування.

З метою досягнення поставленої мети виготовили 12 видів фанери:

- 1) з хімічно модифікованого шпону розчином лимонної кислоти концентрації 5 % за температури пресування 140 °С;
- 2) з хімічно модифікованого шпону розчином лимонної кислоти концентрації 15 % за температури пресування 140 °С;
- 3) з хімічно модифікованого шпону розчином лимонної кислоти концентрації 25 % за температури пресування 140 °С;
- 4) з хімічно модифікованого шпону розчином лимонної кислоти концентрації 5 % за температури пресування 160 °С;
- 5) з хімічно модифікованого шпону розчином лимонної кислоти концентрації 15 % за температури пресування 160 °С;
- 6) з хімічно модифікованого шпону розчином лимонної кислоти концентрації 25 % за температури пресування 160 °С;
- 7) з хімічно модифікованого шпону розчином лимонної кислоти концентрації 5 % за температури пресування 180 °С;
- 8) з хімічно модифікованого шпону розчином лимонної кислоти концентрації 15 % за температури пресування 180 °С;
- 9) з хімічно модифікованого шпону розчином лимонної кислоти концентрації 25 % за температури пресування 180 °С;
- 10) з немодифікованого шпону та плівки ПЕНГ за температури пресування 140 °С (*контрольний зразок*);
- 11) з немодифікованого шпону та плівки ПЕНГ за температури пресування 160 °С (*контрольний зразок*);

3.1. Вплив концентрації модифікувального розчину на механічні властивості фанери

3.1.1. Межа міцності фанери на зріз (EN 314-1, EN 314-2)

Вплив концентрації модифікувального розчину на показники міцності фанери на зріз за різних температур пресування наведено на рис. 3.1 – 3.4.

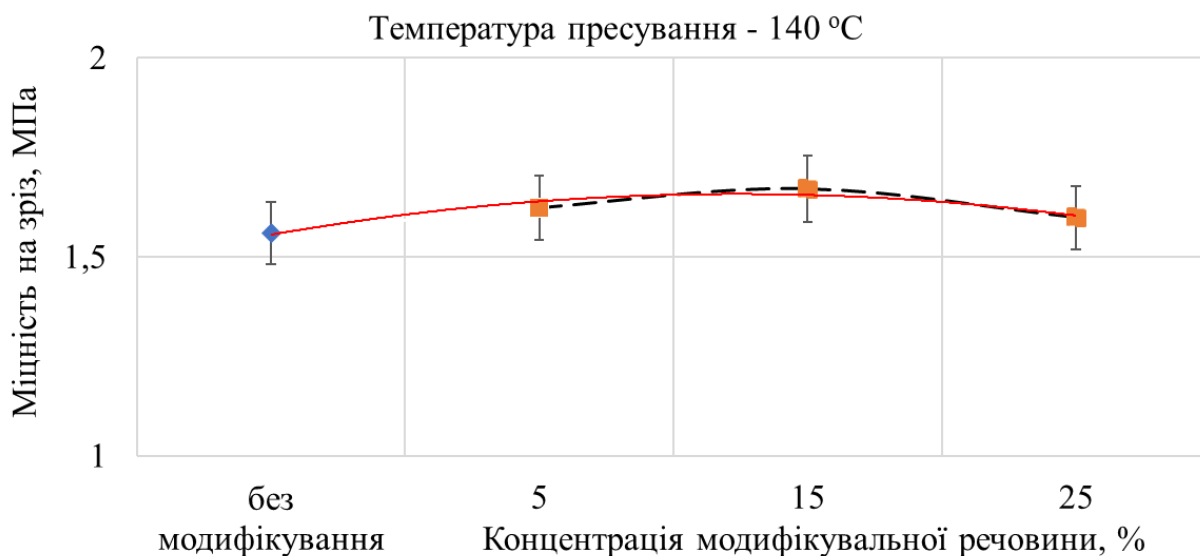


Рис. 3.1 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на міцність фанери на зріз за температури пресування 140 °C

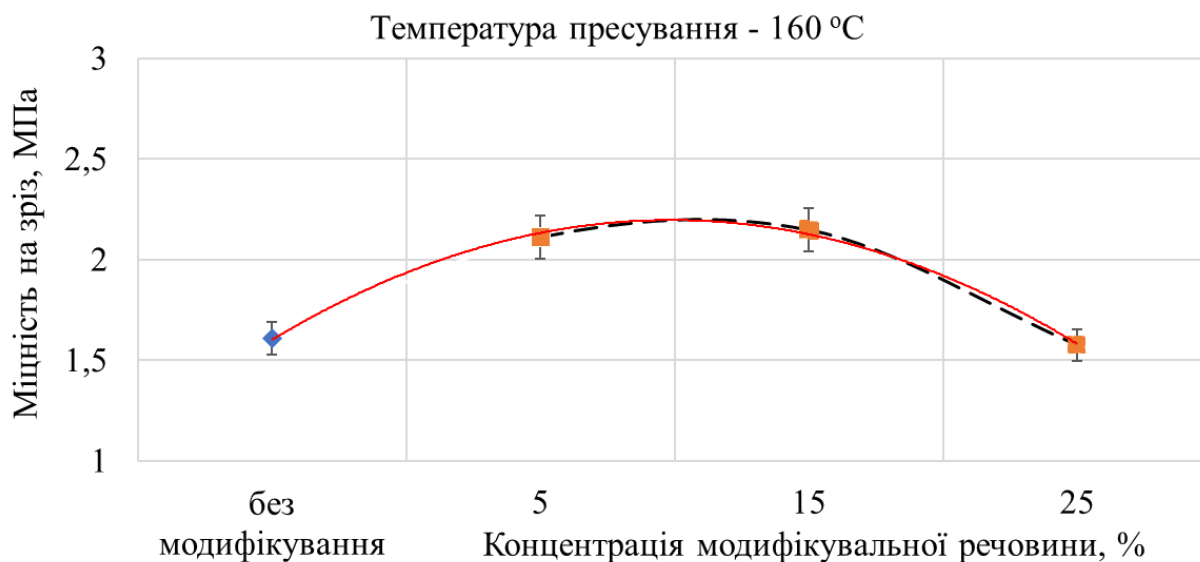


Рис. 3.2 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на міцність фанери на зріз за температури пресування 160 °C

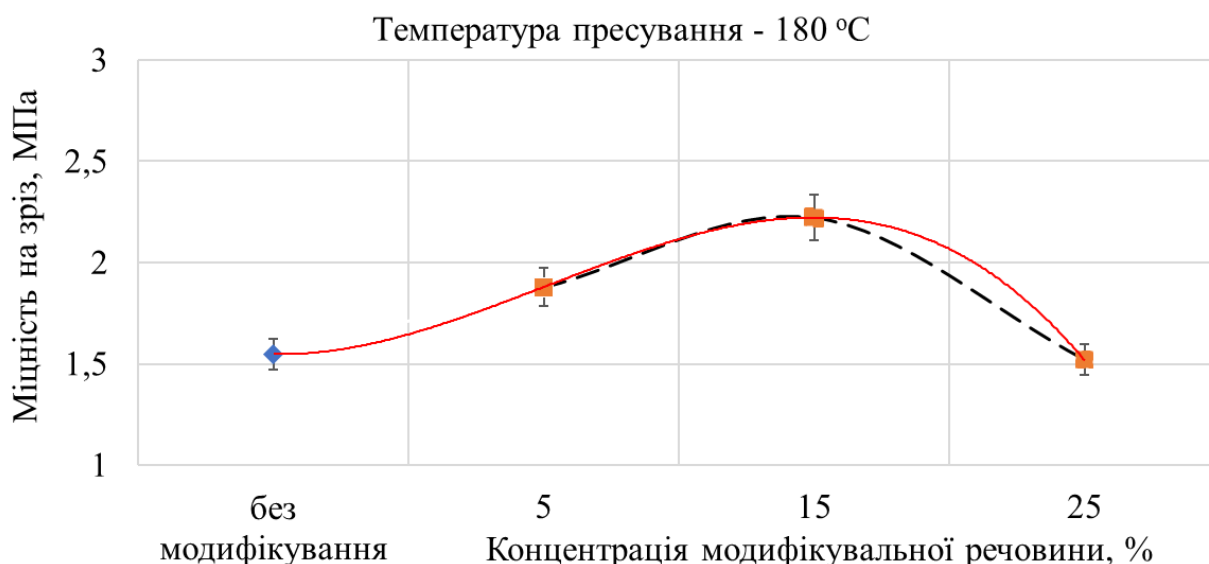


Рис. 3.3 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на міцність фанери на зріз за температури пресування 180 °С

Згідно наведених графічних залежностей концентрація значно впливає на якість склеювання. Із збільшенням концентрації від 5 до 15 % показники міцності зростають на 2 – 18 % залежно від температури пресування. Тоді як за концентрації 25 % - показники міцності зменшуються на 4 – 32 %. Найменше значення міцності було зафіксовано для зразків фанери, склеєної з модифікованого шпону розчином лимонної кислоти за концентрації 25 % та температури пресування 180 °С (1,52 МПа). Найвищі показники міцності були для зразків фанери, склеєної з модифікованого шпону розчином лимонної кислоти за концентрації 15 % та температур пресування 160 і 180 °С (2,15 і 2,22 МПа відповідно).

Припускаємо, що концентрація 5 % недостатня для того, щоб утворилась відповідна кількість карбоксильних груп під час реакції етерифікації, які в подальшому вступатимуть у взаємодію з гідроксильними групами вязкотекучого полімеру [41, 48]. Тоді як концентрація 25 %, навпаки збільшує число карбоксильних груп, що реагуватимуть з гідроксильними

групами деревини, і як результат зменшуватиметься число груп, що вступатиме в реакцію з полімером.

Згідно графіка 3.4 модифікування поверхні шпону розчином лимонної кислоти суттєво покращує показники міцності фанери, за винятком обробки шпону 25 %-ним водним розчином кислоти (1,52 МПа). Цей факт підтверджує, що під час модифікування поверхні шпону відбуваються хімічні процеси між кислотою, деревиною та плівкою, що веде до покращення міцності фанери.

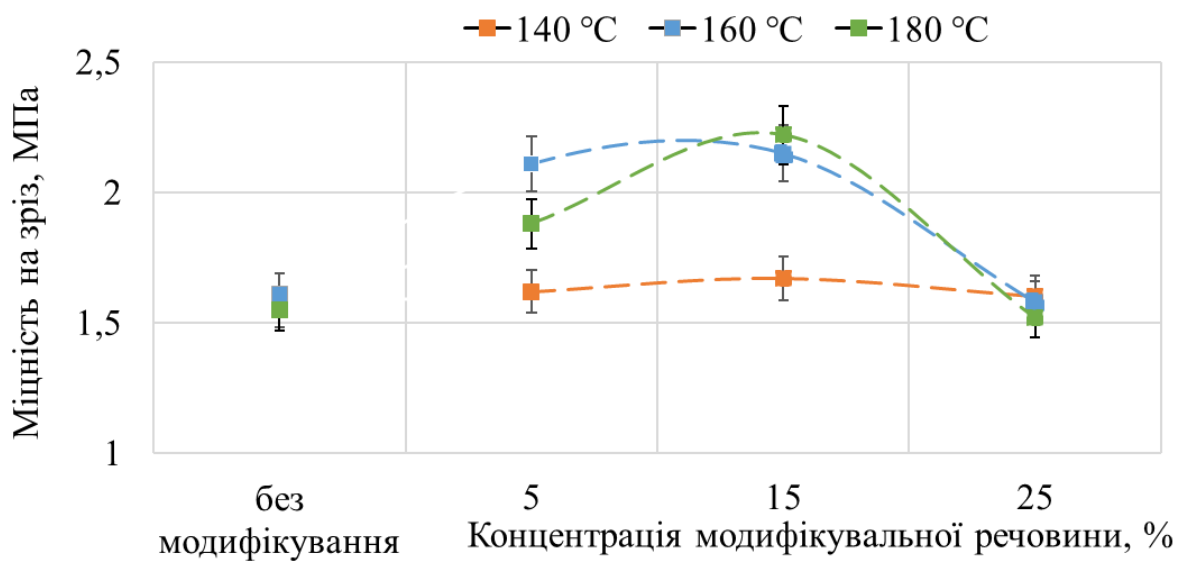


Рис. 3.4 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на міцність фанери на зріз за різних температур пресування

Незважаючи на один із низьких результатів міцності (1,52 МПа), усі показники відповідають стандарту *EN 314-2* ($>1,0$ МПа).

3.1.2. Межа міцності фанери під час статичного згинання (*EN 310*)

За результатами статистичного аналізу побудовано графічні залежності міцності фанери під час статичного згинання від концентрації модифікувальної речовини за різної температури пресування (рис. 3.5 – 3.8).

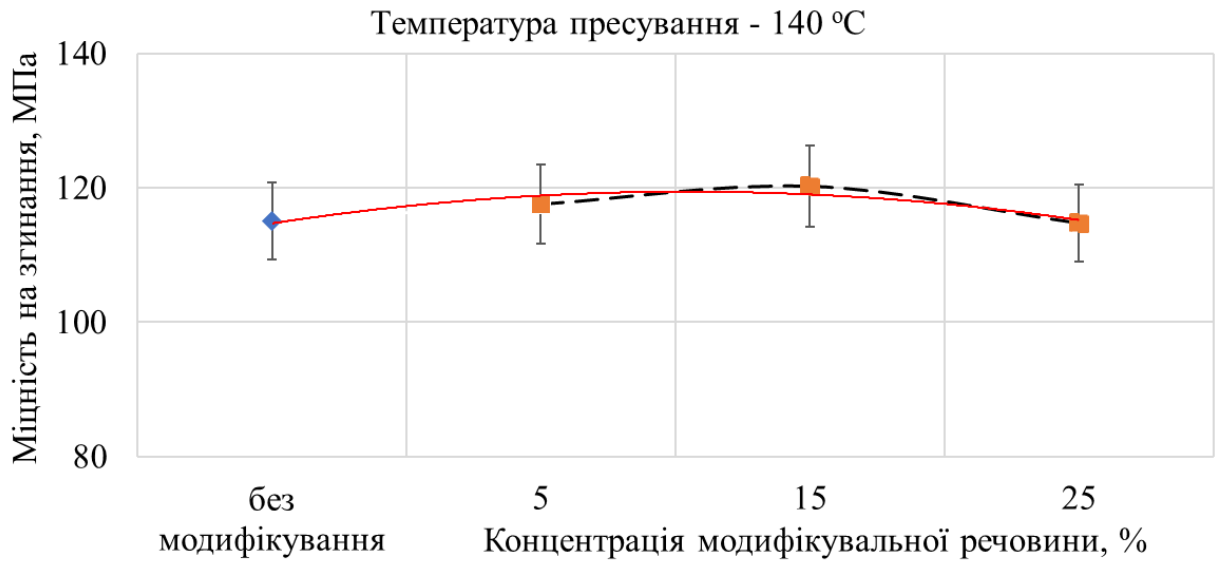


Рис. 3.5 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на міцність фанери під час статичного згинання за температури пресування 140 °С

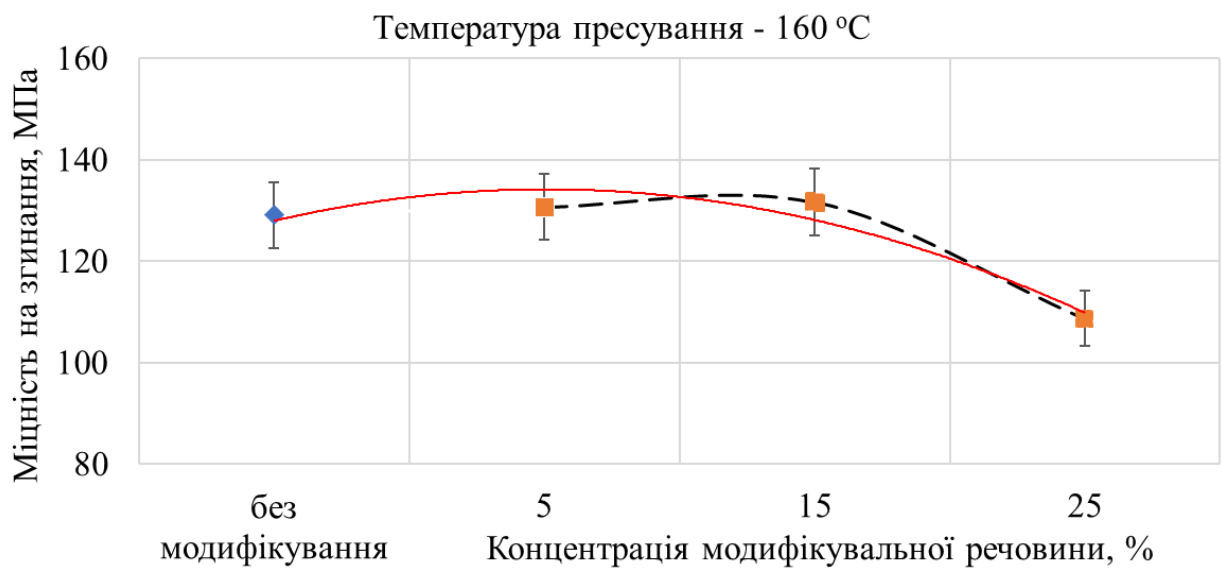


Рис. 3.6 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на міцність фанери під час статичного згинання за температури пресування 160 °С

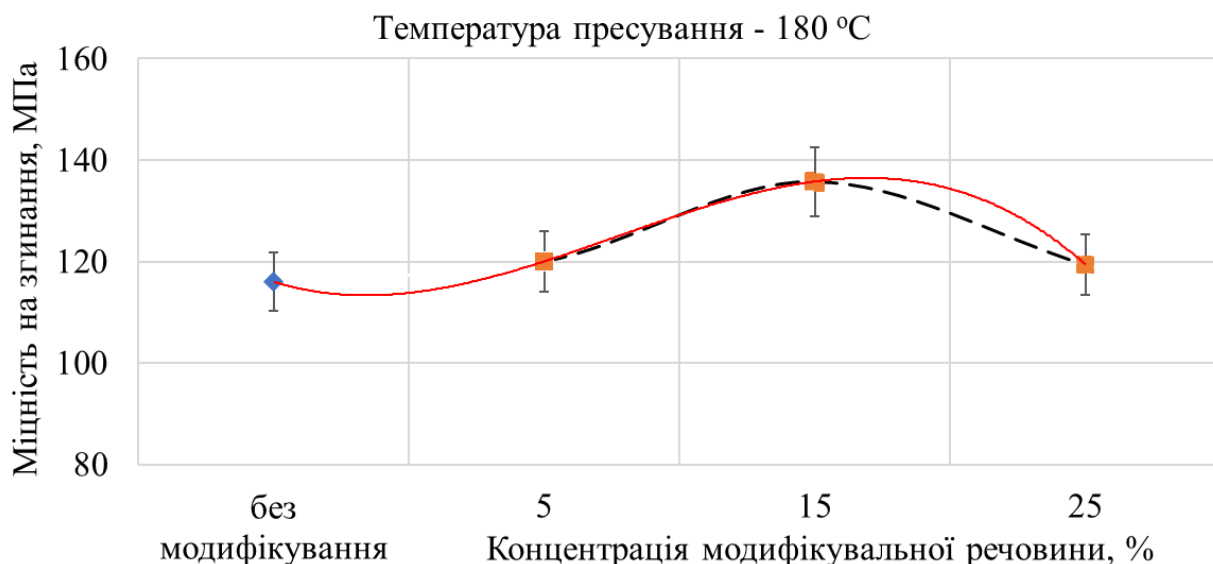


Рис. 3.7 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на міцність фанери під час статичного згинання за температури пресування 180 °С

Як бачимо з вище наведених графіків концентрація також значно впливає на показники міцності фанери під час статичного згинання, як і на міцність на зріз. Аналогічно прослідковується, що концентрація 5 та 15 % позитивно впливають на показники міцності під час статичного згинання, тоді як концентрація 25 % впливає негативно. Найвищі значення міцності є для фанери, склеєної з модифікованого шпону розчином лимонної кислоти за концентрації 15 % та температур пресування 160 і 180 °С (131,59 і 135,77 МПа відповідно). Найменше значення міцності на статичне згинання для фанери, склеєної з модифікованого шпону водним розчином кислоти за концентрації 25 % та температури пресування 180 °С (111,56 МПа). Встановлено, що усі показники міцності фанери під час статичного згинання збільшуються за концентрації модифікувального розчину від 5 до 15 % на 0,7 – 13 %, а за концентрації 25 %, навпаки зменшуються на 4,5 – 17,8 %. Такий результат є наслідком збільшення кількості функціональних груп, що вступають в реакцію естерифікації з деревиною, і як наслідок зменшують їх кількість під час взаємодії з полімером [41, 48].

Щодо порівняння міцності під час статичного згинання зразків фанери, склеєної з немодифікованого шпону та модифікованого шпону, то модифікування поверхні шпону покращує дану міцність, за винятком концентрації 25 %. Дана концентрація занадто висока, оскільки збільшує кількість утворення функціональних груп, що пришвидшують процес гідратації та сповільнюють затвердіння фанери.

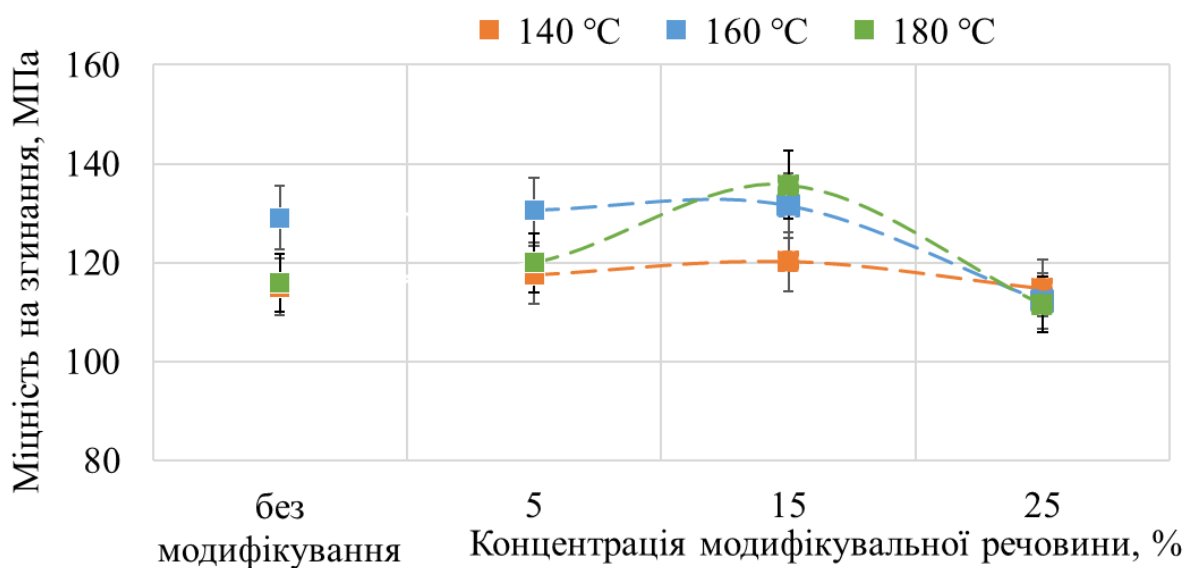


Рис. 3.8 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на міцність фанери під час статичного згинання за різних температур пресування

3.1.3. Модуль пружності фанери під час статичного згинання (EN 310)

Аналогічна тенденція залежностей спостерігається для показників модуля пружності під час статичного згинання, адже вплив досліджуваних чинників на ці показники практично однаковий (рис. 3.9 – 3.12). Показники модуля пружності збільшуються із збільшенням концентрації розчину лимонної кислоти від 5 до 15 % на 0,7 – 3,5 % та зменшуються із збільшенням концентрації до 25 % на 3 – 10 %. Найбільші значення модуля пружності спостерігаються для зразків фанери, склеєної з модифікованого шпону розчином лимонної кислоти за концентрації 15 % та температури

пресування 160 і 180 °С (11817,34 і 12085,88 МПа відповідно). Найменше значення модуля пружності за температури пресування 180 °С та концентрації розчину 25 % (10873,58 МПа).

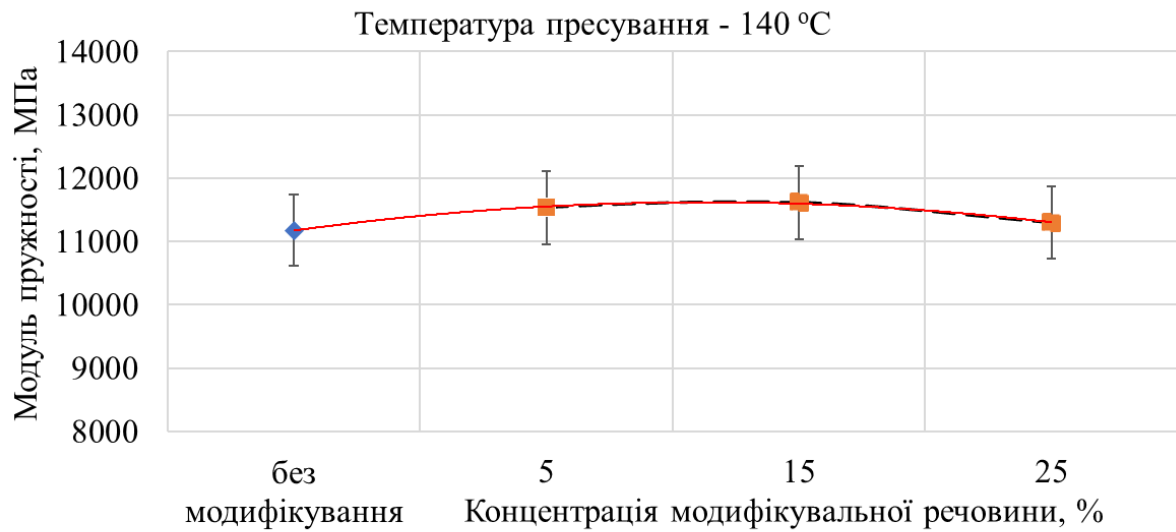


Рис. 3.9 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на модуль пружності фанери під час статичного згинання за температури пресування 140 °С

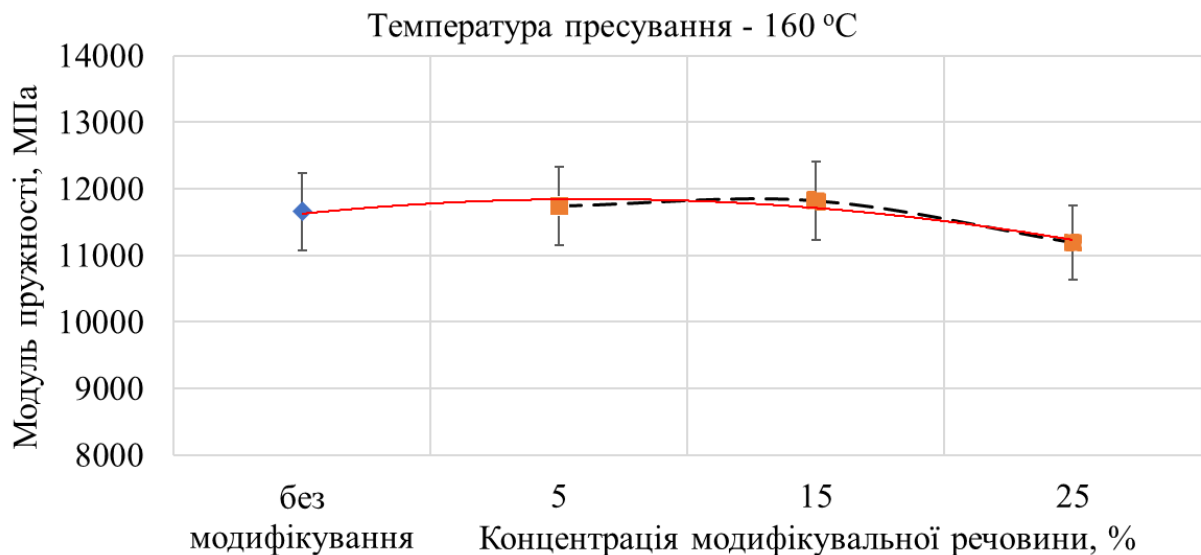


Рис. 3.10 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на модуль пружності фанери під час статичного згинання за температури пресування 160 °С

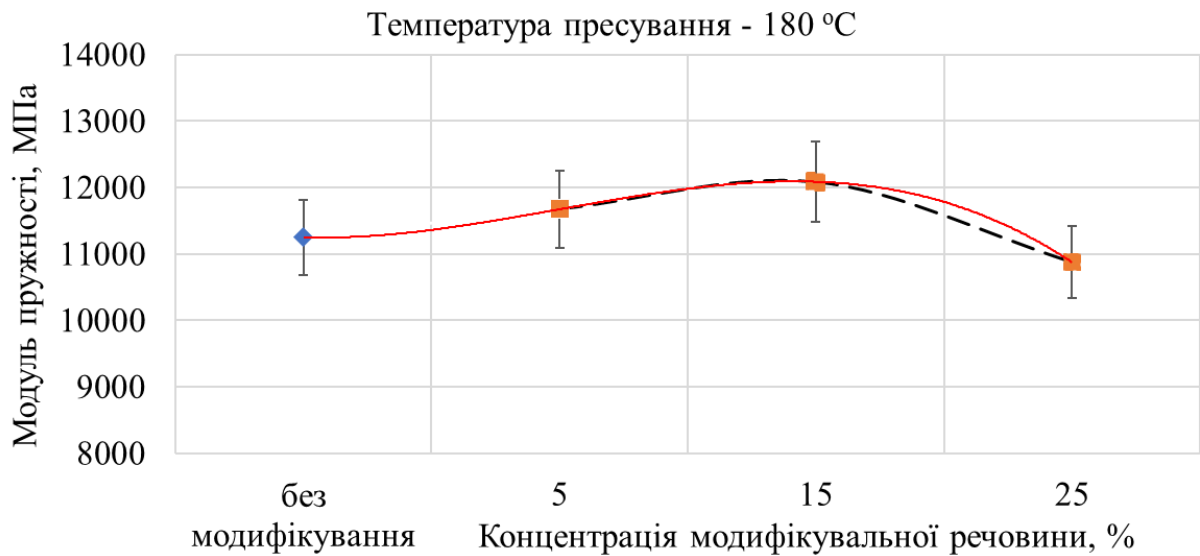


Рис. 3.11 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на модуль пружності фанери під час статичного згинання за температури пресування 180 °С

Показники модуля пружності для фанери, склеєної з немодифікованого шпону та модифікованого шпону дещо відрізняються (рис. 3.12).

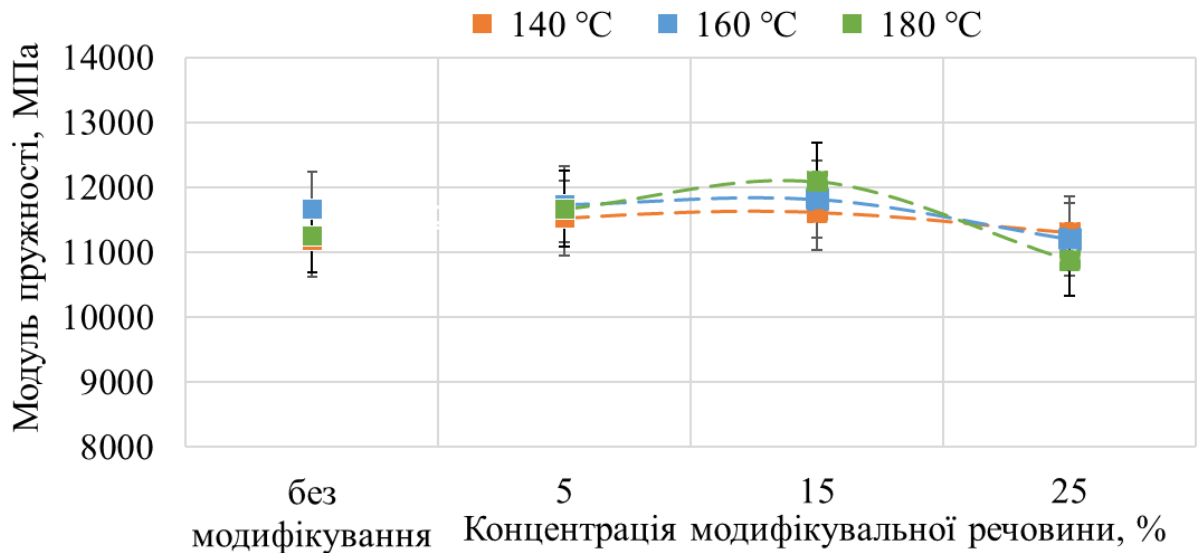


Рис. 3.12 – Вплив концентрації розчину лимонної кислоти на модуль пружності фанери під час статичного згинання за різних температур пресування

Модуль пружності для фанери, склеєної з листів модифікованого шпону розчином лимонної кислоти за концентрації 5 та 15 % збільшується порівняно фанерою, склеєної з немодифікованого шпону на 1,3 – 7,4 %. Тоді як за концентрації 25 % та температури пресування 160 і 180 °С – зменшується на 4 %.

3.2. Вплив температури пресування на механічні властивості фанери

3.2.1. Межа міцності фанери на зріз (EN 314-1, EN 314-2)

За результатами досліджень проведено статистичний аналіз та побудовано графічні залежності показників міцності на зріз фанери, склеєної з листів немодифікованого і модифікованого шпону розчином лимонної кислоти різної концентрації від зміни температури пресування (рис. 3.13).

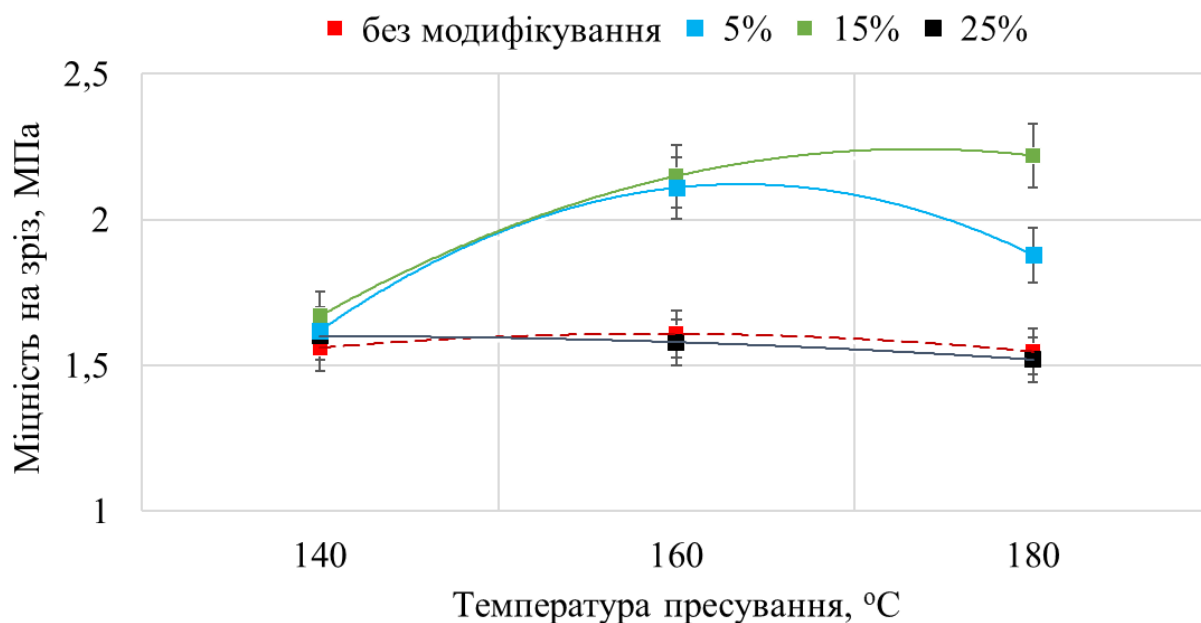


Рис. 3.13 – Вплив температури пресування на міцність фанери на зріз

Згідно з графіком 3.13 температура пресування значно впливає на показники міцності фанери на зріз. Найбільші показники міцності спостерігаються для зразків фанери, склеєної з листів модифікованого шпону розчином лимонної кислоти за концентрації 15 % та температур пресування 160 і 180 °С (2,15 і 2,22 МПа відповідно). Найменші показники міцності були

для зразків фанери, склеєної з листів модифікованого шпону розчином лимонної кислоти за концентрації 25 % та температур пресування 140, 160 і 180 °С (1,6; 1,58 і 1,52 МПа відповідно). За результатами досліджень видно, що температура пресування 140 °С недостатня для склеювання пакетів з модифікованого шпону у виробництві фанери. За такої температури полімерна плівка має недостатню в'язкість для проникнення в структуру деревини, а між гідроксильними групами лимонної кислоти та деревини не утворюється складноефірний зв'язок, що як наслідок погіршує адгезійні властивості фанери. Збільшення температури пресування від 160 до 180 °С позитивно впливає на міцність на зріз зразків фанери, склеєної з модифікованого шпону за концентрації 15 % [41]. Це свідчить про те, що із збільшенням температури пресування збільшується текучість полімеру та відбувається утворення складноефірного зв'язку між гідроксильними групами деревини і лимонної кислоти, що веде до збільшення адгезійних властивостей композиту. Подібна залежність не відбувається за концентрації 25 %, можливо через те, що надмірна кількість речовини пришвидшує процес її гідратації та сповільнює затвердіння композиту, що зменшує адгезійні властивості фанери [46].

Крім того, з графіка 3.13 видно, що збільшення температури пресування від 140 до 160 °С для фанери, склеєної з немодифікованого шпону показники міцності також зростають, а за температури 180 °С – зменшуються. Це свідчить про те, що із збільшенням температури пресування вище 160 °С відбувається більше проникнення текучого полімеру в структуру шпону, що зменшує можливість утворення безперервної лінії клейового шару між поверхнею деревини та полімером.

3.2.2. Межа міцності під час статичного згинання (EN 310)

Залежність показників міцності фанери під час статичного згинання від температури пресування представлено на рис. 3.14.

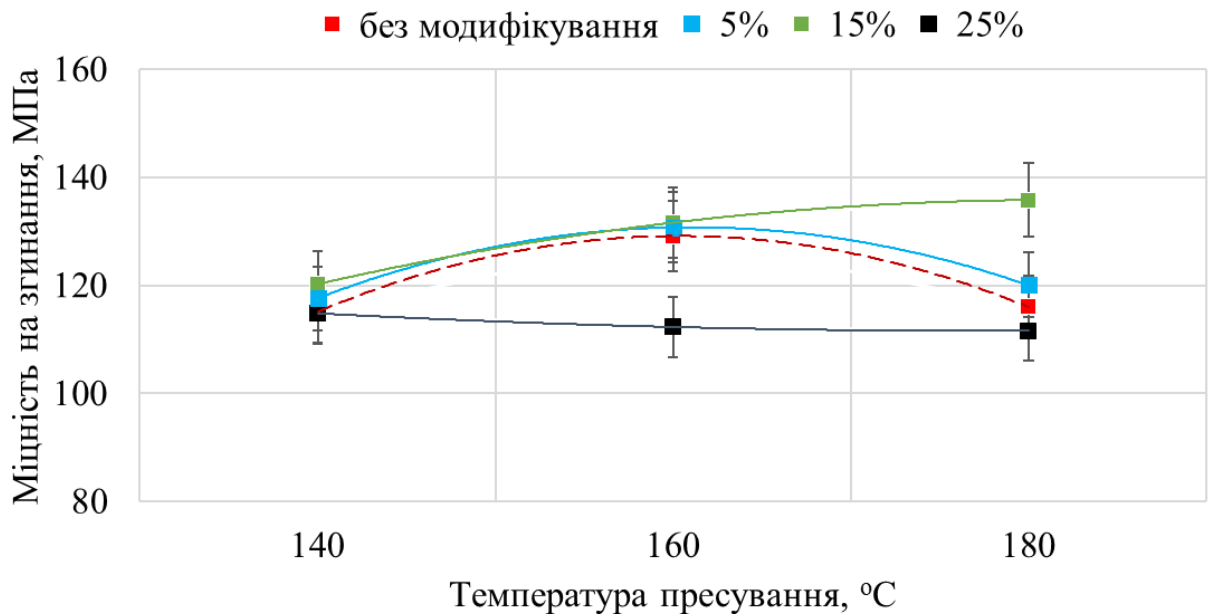


Рис. 3.14 – Вплив температури пресування на міцність фанери під час статичного згинання

Графічна залежність на рис. 3.14 демонструє, що зміна температури пресування також впливає на показники міцності фанери під час статичного згинання. За температур пресування 140, 160 і 180 °C найнижчі показники міцності для зразків фанери, склеєної з модифікованого шпону за концентрації розчину кислоти 25 % (114,79; 112,26 і 111,56 МПа відповідно). Найвищими показниками міцності під час статичного згинання були для зразків фанери, склеєної з модифікованого шпону за концентрації розчину кислоти 15 % за температур пресування 160 і 180 °C (131,59 і 135,77 МПа відповідно). Аналогічні залежності були і для показників міцності на зріз. Цей факт підтверджує, що збільшення температури пресування позитивно впливає на показники міцності фанери, адже відбувається реакція естерифікації між поверхнею деревини та розчином лимонної кислоти, що покращує адгезійні властивості фанери. З'ясовано, що концентрація розчину лимонної кислоти 25 % негативно впливає на показники міцності фанери під час статичного згинання.

3.2.3. Модуль пружності фанери під час статичного згинання (EN 310)

Варто зазначити, що експериментальні залежності модуля пружності під час статичного згинання практично подібні до залежностей межі міцності під час статичного згинання, адже вплив температури пресування та концентрації розчину лимонної кислоти на обидва вказаних показники в основному однаковий (рис. 3.15).

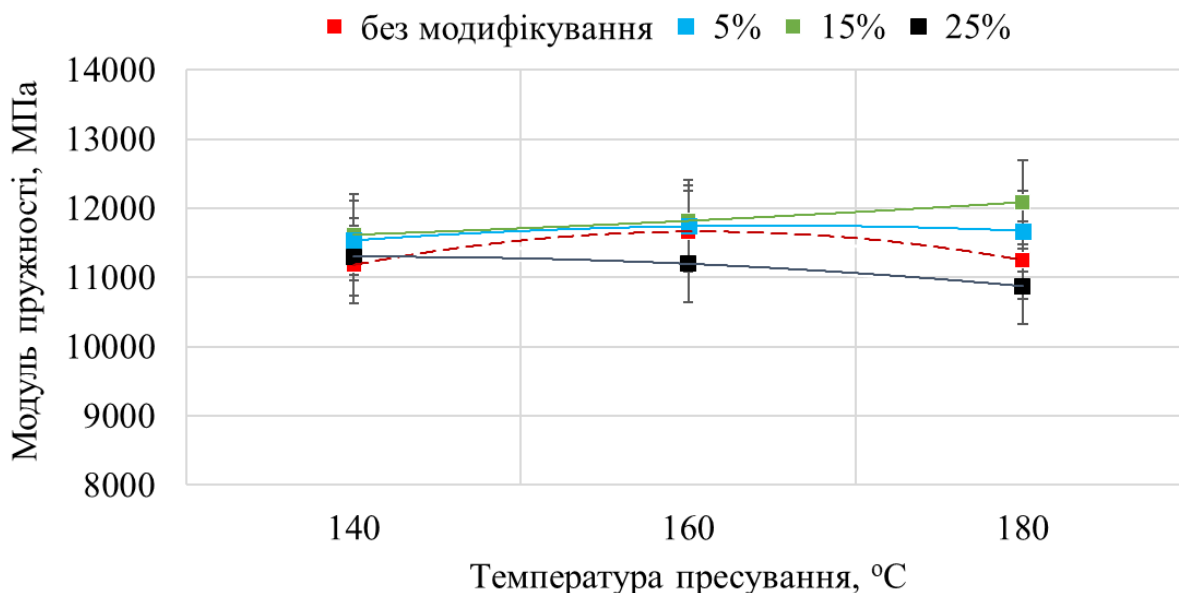


Рис. 3.15 – Вплив температури пресування на модуль пружності фанери під час статичного згинання

За температури пресування 140 °C найменші показники модуля пружності для фанери, склеєної з немодифікованого шпону (11179,83 МПа), тоді як для фанери з модифікованого шпону за всіх концентрацій показники вищі – від 11534,05 до 11298,34 МПа. Збільшення температури пресування від 160 до 180 °C позитивно впливає на показники модуля пружності фанери, склеєної з немодифікованого і модифікованого шпону за концентрації розчину лимонної кислоти 5 і 15 %. Тоді як на зразки фанери, склеєної з немодифікованого шпону та модифікованого шпону за концентрації 25 % температура пресування впливає негативно. Висока температура та концентрація 25 % пришвидшують процес хімічної взаємодії, що веде до не завершення утворення міцного клеєвого з'єднання.

3.3. ВИСНОВКИ

У роботі експериментально досліджено вплив температури пресування та концентрації розчину лимонної кислоти на механічні властивості фанери, склеєної термопластичною плівкою ПЕНГ. Концентрація модифікувального розчину впливає на хід реакцій, що проходять між поверхнею деревини і розчином лимонної кислоти та подальшу взаємодію утворених речовин з в'язкотекучим полімером. Тоді як температура пресування забезпечує достатню текучість термопластичної плівки та утворення хімічних процесів між модифікувальною речовиною, шпоном та плівкою.

За результатами теоретичних і експериментальних даних отримано наступні висновки:

1. Встановлено, що зі збільшенням концентрації розчину лимонної кислоти від 5 до 15 % показники міцності фанери на зріз зростають на 2 – 18 % залежно від температури пресування. Тоді як за концентрації 25 % - показники міцності зменшуються на 4 – 32 %. Усі показники міцності фанери під час статичного згинання збільшуються за концентрації модифікувального розчину від 5 до 15 % на 0,7 – 13 %, а за концентрації 25 %, навпаки зменшуються на 4,5 – 17,8 %. Аналогічно показники модуля пружності збільшуються із збільшенням концентрації розчину лимонної кислоти від 5 до 15 % на 0,7 – 3,5 % та зменшуються із збільшенням концентрації до 25 % на 3 – 10 %.

2. Встановлено, що хімічне модифікування шпону лимонною кислотою є ефективним способом підвищення адгезійної взаємодії між деревиною та термопластичним полімером. Оптимальна концентрація модифікувального розчину становить 15 %, за якої спостерігається зростання межі міцності на зріз, межі міцності під час статичного згинання та модуля пружності.

3. Температура пресування має визначальний вплив на формування клейового з'єднання. Найвищі механічні показники отримано за температур 160–180 °С, що забезпечує достатнє плавлення полімеру та його проникнення у структуру деревини. Надмірні температури та висока

концентрація кислоти (25 %) знижують міцність унаслідок надмірної реакційної активності та зменшення кількості функціональних груп, здатних брати участь у взаємодії з полімером.

Порівняння з контрольними зразками показало, що модифікування лимонною кислотою підвищує міцність фанери та стабільність формування клейового шва. Усі зразки відповідають мінімальним вимогам EN 314-2. Отримані результати демонструють перспективність використання термопластичних плівок у поєднанні з екологічними модифікувальними речовинами для виготовлення фанери з покращеними експлуатаційними властивостями.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Виробництво окремих видів промислової продукції (2021 р.). Державна служба статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення 12.09.2025).
2. Yearbook of Forest Products 2022. FAO. 2020. URL: fao.org/3/cc3475m/cc3475m.pdf (Last accessed: 12.09.2025).
3. Plywood Market Outlook (2023 to 2033). Published Market Research Reports. URL: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/plywood-market> (Last accessed: 20.09.2025).
4. Adhesives awareness guide. American wood council. URL: <https://www.woodaware.info/pdf/adhesives.pdf>. (Last accessed: 8.10.2025).
5. Sorensen, R., & Ky, L. Dry film gluing in plywood manufacture. The American Society of Mechanical Engineers, 1933, 37-48.
6. Бехта П.А., Кусняк І.І. Термопластичні полімери у виробництві фанерної продукції: переваги, можливості та перспективи застосування. Наукові праці Лісівничої академії наук України. Львів, 2018. Вип. 16. С. 131–140. DOI: <https://doi.org/10.15421/411815>.
7. Ding, W., Li, W., Gao, Q., Han, C., Zhang, S., and Li, J. The effects of sealing treatment and wood species on formaldehyde emission of plywood. *BioResources*. 2013, Vol. 8 (2), 2568-2582. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.8.2.2568-2582>.
8. Ye K.L., Xiong M.Z. Current situation and prospect for production and foreign trade. *China Wood Ind.* 2006. Vol. 20 (2), 26–29.
9. Matsi, M., Rohumaa, A., Piirlaid, M., Hughes, M., & Meier, P. Assessing the potential of furan polymer-based resin development in bonded veneer processing factors on adhesive bond strength. Proceedings of the 6th meeting of the Nordic-Baltic Network In Wood Material Science And Engineering (WSE). 2010. Tallinn: Estonia.

10. Tohmura, S. I., Li, G. Y., & Qin, T. F. Preparation and characterization of wood polyalcohol-based isocyanate adhesives. *Journal of Applied Polymer Science*, 2005, 98, 791-795.
11. Umemura, K., Takahashi, A., & Kawal S. Durability of isocyanate resin adhesives for wood. II. Effect of the addition of several polyols on the thermal properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 1999, 74, 7-14.
12. Kishi, H., Fujita, A., Miyazaki, H., Matsuda, S., & Murakami, A. Synthesis of wood-based epoxy resins and their mechanical and adhesive properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, 102, 85-92.
13. Sowunmi, S., Ebewe, R.O., Conner, A.H., & River, B.H. Fortified mangrove tannin- based plywood adhesive. *Journal of Applied Polymer Science*, 1996, 62, 577-584.
14. Mittal, M., & Sharma, C.B. Studies on lignin-based adhesives for plywood panels. *Polymer International*, 1992, 29 (1), 7-8.
15. Liu, Y.J., & Li, K. Development and characterization of adhesives from soy protein for bonding wood. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2007, 27 (1), 59-67.
16. Hu, Y., Nakao, T., Nakai, T., Gu, J., & Wang, F. Vibrational properties of wood plastic plywood. *Journal of Wood Science*, 2005, 51 (1), 13-17. <https://doi.org/10.1007/s10086-003-0624-9>.
17. Piirlaid, M., Rohumaa, A., Matsi, M., Hughes, M., & Meier, P. Effect of birch veneer processing factors on adhesive bond strength development. *Proceedings of the 6th meeting of the Nordic-Baltic Network In Wood Material Science And Engineering (WSE)*. 2010. Tallinn, Estonia, 193 p.
18. Beaud, F., Niemz, P., & Pizzi, A. Structure-property relationships in one-component polyurethane adhesives for wood: Sensitivity to low moisture content. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, 101, 4181-4192. <https://doi.org/10.1002/app.24334>

19. Hagdan, S., Tannert, T., & Smith, G. Wettability and impact performance of wood veneer/polyester composites. *BioResources*, 2015, 10 (3), 5633-5654. <https://doi.org/10.15376/biores.10.3.5633-5654>.
20. Haghdan, S., & Smith, G.D. Fracture mechanisms of wood/polyester laminates under quasi-static compression and shear loading. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 74, 114-122. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.04.006>
21. Lustosa, ECB, Del Menezzi, CHS, de Melo, R.R. Production and properties of a new wood laminated veneer/high-density polyethylene composite board. *Materials Research*, 2015, 18 (5), 994-99. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.010615>.
22. Fang, L., Chang, L., Guo, W., Chen, Y., & Wang, Z. Manufacture of environmentally friendly plywood bonded with plastic film. *Forest Products Journal*, 2012, 63 (7/8), 283-288. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-12-00062>.
23. Fang, L., Chang, L., Guo, W., Ren, Y., & Wang, Z. Preparation and characterization of wood-plastic plywood bonded with high density polyethylene film. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2013, 71, 739-746. <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0733-0>.
24. Han, K-S., & Lee, H-H. Adhesion characteristics and anatomic scanning of plywood bonded by high density polyethylene. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 1997, 25 (3), 16-23 (in Korea).
25. Chang, L., Guo, W., & Tang, Q. Assessing the tensile shear strength and interfacial bonding mechanism of poplar plywood with high-density polyethylene films as adhesive. *BioResources*, 2017, 12 (1), 571-585. <https://doi.org/10.15376/biores.12.1.571-585>.
26. Liiri, M. Properties of a new thermoplastic plywood product. Master's thesis. Espoo, 2013, 110 p.
27. Zike, S., & Kalnins, K. Enhanced impact absorption properties of plywood. *Civil Engineering' 11 3rd International Scientific Conference Proceedings*, Vol. 3, Jelgava, Latvia University of Agriculture, 2011, 125- 130.

28. Song, W., Wenbang, W., Congrong, R., & Shuangbao, Z. Developing and evaluating composites based on plantation eucalyptus rotary-cut veneer and high-density polyethylene film as novel building materials. *BioResources*, 2016, 11 (2), 3318-3331.
29. Song, W., Wenbang, W., Xuefei, L., & Shuangbao, Z. Utilization of polypropylene film as an adhesive to prepare formaldehyde-free, weather-resistant plywood-like composites: Process optimization, performance evaluation, and interface modification. *BioResources*, 2017, 12 (1), 228-254.
30. Sorensen, R., & Ky, L. Dry film gluing in plywood manufacture. *The American Society of Mechanical Engineers*, 1933, 37-48.
31. Smith, M.J., Dai, H., & Ramani, K. Wood thermoplastic adhesive interface—method of characterization and results. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2002, 22 (3), 197-204. [https://doi.org/10.1016/S0143-7496\(01\)00055-0](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(01)00055-0).
32. Segerholm, B.K., Walinder, M.P., & Holmberg, D. Adhesion studies of scots pine-polypropylene bond using ABES. *Proceedings of the 6th meeting of the Nordic-Baltic Network in Wood Material Science and Engineering (WSE)*. 2010, Tallinn, Estonia, 142-146.
33. Goto, T., Saiki, H., & Onishi, H. Studies on wood gluing. XIII: Gluability and scanning electron microscopic study of wood-polypropylene bonding. *Wood Sci. Technol*, 1982, 16, 293-303. <https://doi.org/10.1007/BF00353157>.
34. Kajaks, J., Reihmane, S., Grinbergs, U., & Kalninš, K. Use of innovative environmentally friendly adhesives for wood veneer bonding. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 2012, 61 (3), 207-211. <https://doi.org/10.3176/proc.2012.3.10>.
35. Vick C.B. Adhesive bonding of wood materials. Chapter 9. *Wood handbook - wood as an engineering material*. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1999. P. 9-1–9-24.

36. Tang L., Zhao-gang Z., Jiao Q., Ji-ruo Z., Ying F. The preparation and application of a new formaldehyde-free adhesive for plywood. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 2011. Vol. 31, No 6. P. 507–512.
37. Fang L., Chang L., Guo W., Chen Y., Wang Z. Influence of silane surface modification of veneer on interfacial adhesion of wood-plastic plywood. *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 288. P. 682–689.
38. Matuana L.M., Balatinecz J.J., Park C.B. Effect of surface properties on the adhesion between PVC and wood veneer laminates. *Polymer Engineering and Science*. 1998. Vol. 38, No 5. P. 765–773. DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.10242>.
39. Sun S., Zhao Z., Umemura K. Further exploration of sucrose-citric acid adhesive: Synthesis and application on plywood. *Polymers*. 2019. Vol. 11, No 1875. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11111875>.
40. Chunyin L.I., Hong L.E.I., Zhigang W.U., Xuedong X.I., Guanben D.U., Pizzi A. A fully bio-based adhesive from glucose and citric acid for plywood with high-performance. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2022. Vol. 14, No 20. P. 23859–23867. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.2c02859>.
41. Del Menezzi C., Amirou S., Pizzi A., Xi X., Delmotte L. Reactions with wood carbohydrates and lignin of citric acid as a bond promoter of wood veneer panels. *Polymers*. 2018. Vol. 10, No 833. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym10080833>.
42. Yang H.S., Wolcott M.P., Kim H.S., Kim S., Kim H.J. Effect of different compatibilizing agents on the mechanical properties of lignocellulosic material filled polyethylene bio-composites. *Composite Structures*. 2007. Vol. 79, No 3. P. 369 – 375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.02.016>.
43. Cui J., Huang H., Han S., He Y., Jiang G. Influence of glass fiber implantation on the mechanical properties of poplar laminated veneer lumber. *Journal of Forestry Engineering (Lin Ye Gong Cheng Xue Bao)*. 2016. Vol. 1, No 5. P. 40 – 44. DOI: <https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.2016.05.008>.

44. Чернецький О.М., Кусняк І.І., Бехта Н.С. Вплив модифікування шпону на водостійкість фанери. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: *Матеріали XIII Міжнар. наук.-практ. конф., 25 – 26 травня 2023 р. Чернігів: Національний університет “Чернігівська політехніка”*. 2023. Т1. С. 254-255.
45. Чернецький О.М., Кусняк І.І., Бехта Н.С., Копанський М.М. Вплив модифікування шпону на міцність склеювання фанери. *Ways of Science Development in Modern Crisis Conditions: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Internet Conference, June 8-9, 2023. Dnipro*. С. 427–429.
46. Bekhta P., Sedliačik J., Kusniak I., Gryc V., Pipíška T., Ráhel’ J., Lepcio P., Pavliňák D., Tymyk D., Chernetskyi O. Enhancing the properties of thermoplastic-bonded plywood by treating the birch veneers with citric acid. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2024. Vol. 134, No 103781. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103781>.
47. Бехта П.А., Кусняк І.І., Чернецький О.М., Бехта Н.С., Козак Р.О., Бринь О.І., Копанський М.М. Вплив модифікування шпону на властивості фанери, склеєної термопластичною плівкою ПЕНГ. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*. Львів, 2023. Вип. 25. С. 167-177. DOI: <https://doi.org/10.15421/412314>.
48. Bekhta P., Kusniak I., Chernetskyi O., Sedliačik J., Gryc V., Pipíška T., Ráhel’ J., Tymyk D., Lepcio P., Pavliňák D. Effects of Surface Treatment of Birch Veneers by Citric Acid on the Properties of Thermoplastic-Bonded Plywood. *6th International Conference on Wood Composites Modification and Machining*. Warsaw University of Life Sciences. September 06-08, 2023 Kiry, Poland, 9 p.
49. Кусняк І.І. Розроблення режимів склеювання шпону з використанням термопластичних полімерів: Дис...канд. техн. наук: 05.23.06. Л., 2020. 172 с.

50. Чернецький О.М. Закономірності впливу породи деревини і товщини термопластичної плівки на властивості фанери: Дисертація доктора філософії: 05.23.06. Л., 2024. 187 с.
51. Бехта П.А. Технологія деревинних композиційних матеріалів: навч. посіб. Київ: ІЗМН, 1997. 236 с.
52. Бехта П.А. Виробництво фанери: Підручник. Київ: Основа, 2003. 320 с.
53. EN 314-1: 2004. Plywood–Bonding Quality–Part 1: Test Methods. [Published 2006-01-16]. Official publishing house. Brussels: European Committee for Standardization, 2004. 24 p.
54. EN 314-2: 1993. Plywood–Bonding Quality–Part 2: Requirements. [Published 1993-15-04]. Official publishing house. Brussels: European Committee for Standardization, 1993. 12 p.
55. EN 310: 1993. Wood-Based Panels–Determination of Modulus of Elasticity in Bending and of Bending Strength. [Published 1993-15-04]. Official publishing house. Brussels: European Committee for Standardization, 1993. 14 p.
56. Caulfield D., Clemons C., Rowell R.M. Wood thermoplastic composites. Chapter 6. Sustainable development in the forest products industry: eds Roger M Rowell Fernando Caldeira Judith K. Rowell -Porto Edições Universidade Fernando Pessoa. 2010. P. 141–161.
57. El-Bashir S.M. Thermal and mechanical properties of plywood sheets based on polystyrene/silica nanocomposites and palm tree fibers. Polym. Bull. 2013. Vol. 70. P. 2035–2045 DOI: <https://doi.org/10.1007/s00289-013-0962-8>.
58. Gardner D.J., & Han Y. Towards structural wood plastic composites: technical innovations. Proceedings of the 6th meeting of the Nordic-Baltic network in wood material science and engineering (WSE). Tallinn, Estonia, 2010. P. 7–22.
59. Grubbström G, Oksman K. Silane-crosslinking efficiency in wood polyethylene composites: Study of different polyethylenes. Proceedings of 10th International Conference on Wood and Biofiber Plastic Composites, Madison, WI, USA, 2009. P. 1–24.

60. Grubbström G., & Oksman K. Influence of wood flour moisture content on the degree of silane crosslinking and its relationship to structure-property relations of wood-thermoplastic composites. *Composites Science and Technology*. 2009. Vol. 69. P. 1045–1050. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.01.021>.
61. Grubbström G., Holmgren A., Oksman K. Silane-crosslinking of recycled low-density polyethylene/wood composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010. Vol. 41, №5. P. 678–683. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.01.018>.
62. Wang Y. Morphological characterization of wood plastic composite (WPC) with advanced imaging tools: Developing methodologies for reliable phase and internal damage characterization. Master's thesis (20 July 2007, Oregon). Oregon, 2007. 163 p. 146.
63. Dunky M. Adhesives in the Wood Industry. In: *Handbook of Adhesive Technology: 2nd edition, revised and expanded / edited by A.Pizzi & K.L.Mittal*. Marcel Dekker, Inc. New York – Basel. 2003.
64. Pizzi A., Mittal K. L. *Handbook of adhesive technology: 2 edition, revised and expanded*. New York: U.S.A., 2003. 999 p.
65. Чернецький О.М., Кусняк І.І. Вплив породи деревини на механічні властивості фанери склеєної термопластичною плівкою. *Papers of participants of the III International Multidisciplinary Scientific and Theoretical Conference «Theory and practice of modern science», held on April 1, 2022*. Vol. 1. Kraków, Republic of Poland. С. 74-76.
66. Чернецький О.М., Кусняк І.І., Бехта Н.С. Вплив товщини первинної термопластичної плівки поліетилену низької густини на механічні властивості березової фанери. *The II International Scientific and Practical Conference “Global changes in the development of science and education”*, October 24 – 26, 2022. Belgium, Brussels. С. 99-101.
67. Чернецький О.М., Кусняк І.І., Бринь О.І., Салабай І.І., Бехта Н.С. Вплив породи деревини на міцність фанери, склеєної вторинною термопластичною

плівкою поліетилену низької густини. Лісівництво, деревообробка та озеленення: стан, досягнення і перспективи. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції з проблем вищої освіти і науки в системі МОН України (ДБТУ, 22–23 листопада 2022 р.). Харків, 2022. С. 57-58.

68. Бехта П. А., Козак Р. О., Кусняк І. І. Математичне моделювання процесу прогрівання пакета шпону, склеєного термопластичною плівкою. *Науковий вісник НЛТУ України*. Львів, 2020. Т. 30. Вип. 3. С. 93–98. <https://doi.org/10.36930/40300316>.
69. Пилипчук М.І., Григор'єв А.С., Шостак В.В. Основи наукових досліджень: підручник. Київ: Знання. 2007. 270 с.
70. Важинський С.Е., Щербак Т.І. Методика та організація наукових досліджень: навч. посіб. Суми: Вид-во СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2016. 260 с.
71. Гупало О.П., Тушницький О.П. Хімія деревини: підручник, 2-ге видання, випралене і доповнене. Київ: Знання, 2008. 276 с.
72. Bekhta P., Sedliačik J. Environmentally-Friendly High-Density Polyethylene-Bonded Plywood Panels. *Polymers (Basel)*, 2019, Vol. 11, №7:1166. P. 1–21. DOI: <https://doi: 10.3390/polym11071166>.