

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 термічного ущільнення на властивості  
шпону різних способів одержання**

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

  
\_\_\_\_\_ Манзуля М.П.  
(підпис)

**Керівник:** доцент каф. ТДКМ, к.т.н.

  
\_\_\_\_\_ Салабай Р.Г.  
(підпис)

**Рецензент:** *проф. каф. ТМВД, проф. д.т.н.*  
(посада, вчене звання, науковий ступінь)

  
\_\_\_\_\_ Тайга С.В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Львів – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Навчально-науковий інститут деревообробних технологій і дизайну  
Кафедра технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу  
Освітній рівень магістр  
Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія  
Освітня програма Технології деревинних композиційних матеріалів і модифікування  
деревини

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри 

д.т.н., проф. Козак Р.О.

“ 22 ” грудня 2025 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Манзулі Миколи Петровичу

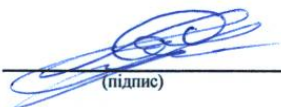
1. Тема роботи Вплив термічного ущільнення на властивості шпону різних способів одержання,  
керівник роботи доц. каф. ТДКМ Салабай Роман Григорович, к.т.н., доцент,  
затверджені наказом університету від “ 28 ” жовтня 2024 року № С-846
2. Термін подання студентом роботи 22.12.2025 р.
3. Вихідні дані до роботи Проаналізувати теоретичні основи одержання шпону різними способами і характеристику та властивості шпону, дослідити вплив параметрів термічного ущільнення шпону на його властивості.
4. Зміст пояснювальної записки (розділи, які потрібно розробити)
  1. Стан питання та завдання дослідження
  2. Методика експериментальних досліджень
  3. Обробка експериментальних даних
  4. Висновки та рекомендації
5. Дата видачі завдання 25.07.2025 р.

Студент

  
(підпис)

Манзуля М.П.

Керівник роботи

  
(підпис)

Салабай Р.Г.

## АНОТАЦІЯ

Дипломна робота магістра виконана на актуальну для виробництва тему “Вплив термічного ущільнення на властивості шпону різних способів одержання”. У роботі проаналізовано теоретичні основи одержання шпону різними способами і характеристику та властивості шпону, а також вплив параметрів термічного ущільнення на властивості деревини і процеси, які відбуваються під час ущільнення і термічного оброблення деревини й досліджено вплив параметрів термічного ущільнення шпону (температури і тривалості ущільнення) на його властивості.

Дипломна робота складається з трьох розділів:

1. Стан питання та завдання досліджень;
2. Методика експериментальних досліджень;
3. Обробка експериментальних даних.

У першому розділі проаналізовано: теоретичні основи одержання шпону різними способами; характеристику та властивості шпону; вплив параметрів термічного ущільнення на властивості деревини; процеси, які відбуваються під час ущільнення і термічного оброблення деревини.

У другому розділі описано матеріали, використані в експериментальних дослідженнях, експериментальне обладнання та вимірювальна апаратура, методику підготовки дослідних зразків, наведено вибір змінних факторів і планування експериментів та описано методики визначення фізико-механічних властивостей шпону та спресування дослідних зразків.

У третьому розділі наведено отримані експериментальні дані досліджень, щодо впливу параметрів термічного ущільнення (температури і тривалості ущільнення) на властивості дубового шпону різних способів одержання: величину спресування, щільність і межу міцності на розтяг вздовж волокон струганого і пиляного дубового шпону, і зроблено обґрунтування результатів.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	9
1.1. Теоретичні основи одержання шпону різними способами.....	9
1.2. Характеристика та властивості шпону .....	13
1.3. Аналіз впливу параметрів термічного ущільнення на властивості деревини .....	17
1.4. Процеси, які відбуваються під час ущільнення і термічного оброблення деревини .....	21
1.5. Мета та завдання дослідження .....	24
2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	26
2.1. Матеріали, які використані для експериментальних досліджень.....	26
2.2. Обладнання і вимірювальна апаратура використана в дослідженні ..	28
2.3. Методика підготовки матеріалів для дослідження.....	32
2.4. Методика дослідження та планування експериментів.....	33
2.4.1. Вибір змінних факторів та планування експериментів.....	33
2.4.2. Методика визначення фізичних властивостей шпону .....	33
2.4.3. Методика визначення механічних властивостей шпону .....	34
2.5. Статистична обробка результатів досліджень .....	36
3. ОБРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ.....	39
3.1. Дослідження впливу термічного ущільнення на величину спресування шпону .....	39
3.2. Дослідження впливу термічного ущільнення на щільність шпону.....	43
3.3. Дослідження впливу термічного ущільнення пиляного, струганого шпону на межу міцності на розтяг вздовж волокон.....	46
ВИСНОВКИ.....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	52
ДОДАТКИ.....	54

## ВСТУП

Деревина є одним із найдавніших і водночас найсучасніших конструкційних та декоративних матеріалів, що поєднує природну красу, екологічність і високі експлуатаційні властивості. Протягом століть людина удосконалювала способи її оброблення, створюючи нові види матеріалів із покращеними характеристиками, які відповідають вимогам сучасного виробництва. Серед таких матеріалів особливе місце займає шпон — тонкий шар деревини, що використовується для облицювання, виготовлення фанери, декоративних панелей, меблів і художніх виробів. Саме шпон дає змогу ефективно використовувати цінні породи деревини, зберігаючи при цьому їхню естетичну виразність і природну текстуру.

У сучасних умовах розвитку деревообробної промисловості в Україні та світі зростає потреба у вдосконаленні технологій оброблення деревини, спрямованих на підвищення її міцності, стабільності, стійкості до зовнішніх впливів та економії сировини. Одним із перспективних напрямів є термічне ущільнення деревини — процес, у якому поєднуються дія температури, тиску та вологи для модифікації структури матеріалу без використання хімічних реагентів. Внаслідок цього відбувається зменшення пористості, підвищення густини, покращення механічних характеристик і зменшення гігроскопічності деревини.

Для виробництва високоякісного шпону, який використовується у меблевій, будівельній та декоративній галузях, важливо не лише обирати відповідну породу деревини, а й правильно підібрати спосіб одержання шпону — стругання або пиляння. Кожен із них формує особливу структуру поверхні, товщину, текстуру і напрям волокон, що істотно впливає на поведінку матеріалу під час термічної обробки. Зокрема, струганий шпон відзначається більш рівною поверхнею та збереженням природного малюнку деревини, тоді як пиляний шпон має дещо шорсткішу поверхню, більшу товщину та іншу

орієнтацію волокон, що впливає на його фізико-механічні характеристики після ущільнення.

Проблема покращення властивостей шпону за допомогою термічної модифікації набуває все більшої актуальності в Україні. Вітчизняна деревообробна галузь має значний потенціал розвитку завдяки наявності якісної сировинної бази, особливо дуба звичайного (*Quercus robur* L.), який широко поширений у лісах Полісся, Лісостепу та Західної України. Дубова деревина характеризується високою щільністю, міцністю, декоративністю та довговічністю, що робить її однією з найцінніших порід для виготовлення шпону. Водночас дубовий шпон має певні недоліки, зокрема високу анізотропність властивостей, схильність до деформацій при зміні вологості та потребу в попередній стабілізації перед використанням у меблевому виробництві. Тому дослідження, спрямовані на оптимізацію процесів ущільнення дубового шпону, мають як теоретичне, так і практичне значення.

Термічне ущільнення деревини належить до екологічно безпечних способів модифікації матеріалу, оскільки не потребує використання синтетичних смол чи токсичних речовин. Процес базується на фізико-хімічних перетвореннях у клітинній структурі деревини під впливом підвищених температур (160–220 °C) і тиску. Під час термічної обробки відбуваються складні явища — термопластична деформація клітинних стінок, часткове руйнування геміцелюлоз, зменшення кількості гідроксильних груп, зміна хімічного складу та зростання гідрофобності матеріалу. У результаті знижується водопоглинання, підвищується твердість і стабільність розмірів, що особливо важливо для шпону, який часто експлуатується в умовах змінної вологості.

Вивчення впливу параметрів термічного ущільнення (температури і тривалості обробки) на властивості струганого та пиляного дубового шпону дає змогу визначити оптимальні режими оброблення, які забезпечують

найкраще поєднання фізико-механічних і декоративних показників. Зокрема, це сприятиме покращенню якості облицювальних матеріалів, підвищенню ефективності склеювання шпону, зменшенню внутрішніх напружень і забезпеченню стабільності форми готових виробів.

Наукова новизна дослідження полягає у встановленні закономірностей зміни структури і властивостей дубового шпону залежно від способу його одержання та режимів термічного ущільнення, а також у визначенні оптимальних технологічних параметрів для струганого і пиляного шпону. Практичне значення полягає в можливості впровадження результатів дослідження у виробництво декоративних панелей, облицювальних матеріалів і фанери з покращеними характеристиками міцності, вологостійкості та стабільності.

Об'єктом дослідження є дубовий шпон, отриманий шляхом стругання та пиляння деревини дуба звичайного.

Предметом дослідження — зміна фізико-механічних властивостей шпону під впливом термічного ущільнення.

Метою роботи є встановлення впливу параметрів термічного ущільнення на властивості струганого та пиляного дубового шпону і визначення оптимальних режимів процесу для забезпечення високої якості матеріалу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

—дослідити особливості будови, структури та початкових властивостей струганого та пиляного дубового шпону;

—проаналізувати фізико-хімічні процеси, що відбуваються в деревині під час термічного ущільнення;

—експериментально визначити вплив температури та тривалості обробки на вологість, щільність, міцність та інші властивості шпону;

—здійснити порівняльну оцінку ефективності термічного ущільнення для шпону різних способів одержання;

—розробити рекомендації щодо оптимальних режимів ущільнення дубового шпону для промислового впровадження.

Структурно магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У першому розділі розглядаються теоретичні основи отримання шпону різними способами, аналізуються процеси ущільнення деревини та її поведінка при термічній дії. Другий розділ присвячено методиці проведення експериментальних досліджень і визначенню фізико-механічних властивостей дубового шпону до та після ущільнення. У третьому розділі наведено результати експериментів, проведено аналіз змін у структурі та механічних характеристиках шпону, а також сформульовано практичні рекомендації щодо оптимізації режимів ущільнення.

Таким чином, актуальність, наукова новизна та практична значущість теми зумовлюють необхідність проведення комплексного дослідження впливу термічного ущільнення на властивості струганого та пиляного дубового шпону, що сприятиме підвищенню конкурентоспроможності вітчизняної деревообробної промисловості та розширенню застосування екологічно чистих технологій модифікації деревини.

# 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 1.1. Теоретичні основи одержання шпону різними способами

Шпон є одним із базових видів деревних матеріалів, що широко застосовуються у сучасній деревообробній та меблевій промисловості. Його використовують як сировину для виготовлення фанери, клеєних конструкцій, облицювальних матеріалів, декоративних покриттів, а також для підвищення естетичних і експлуатаційних властивостей деревинних плитних матеріалів [1]. Термін «шпон» означає тонкий лист деревини, отриманий у результаті механічної обробки колоди або заготовки. Товщина шпону залежить від способу його виготовлення та призначення і, як правило, становить від 0,3 до 5 мм [2]. Незважаючи на зовнішню простоту, процес отримання шпону є складним технологічним завданням, що вимагає глибокого розуміння фізико-механічних властивостей деревини, напрямку волокон, вологості, температури різання, а також точного налаштування обладнання.

Деревина, як природний полімерний матеріал, відзначається анізотропністю своїх властивостей. Вона складається з клітинної структури, в якій волокна орієнтовані переважно вздовж стовбура, що обумовлює значні відмінності у фізико-механічних показниках у поздовжньому, радіальному та тангенціальному напрямках. Саме ці особливості визначають характер розшарування деревини під час отримання шпону, впливають на якість зрізу, шорсткість поверхні, збереження текстури та утворення дефектів. Отже, вибір способу виготовлення шпону має суттєвий вплив на подальші властивості матеріалу [3].

У промисловості застосовують три основні способи отримання шпону: пиляння, стругання та лущення. Кожен із них має свою технологічну специфіку, що визначає не лише продуктивність, а й якість поверхні, ступінь порушення структури деревини, пористість і природну декоративність [1].

Пиляний шпон одержують шляхом поділу колод або заготовок на тонкі пластини за допомогою дискових чи стрічкових пил. Товщина пиляного шпону зазвичай становить 1–5 мм. Основною перевагою цього способу є відсутність механічного сплюснення волокон та деформації текстури. Оскільки зрізування відбувається без значного стискання деревини, пиляний шпон зберігає природну структуру, колір і блиск. Завдяки цьому він має високу декоративність і використовується для облицювання виробів високої якості — меблів, музичних інструментів, художніх панелей [3]. Недоліком пиляння є невисокий коефіцієнт використання деревини, оскільки товщина пропилю становить до 1,5–2 мм. Це зумовлює значні втрати матеріалу та підвищує собівартість продукції. Крім того, цей метод характеризується низькою продуктивністю, що обмежує його використання у масовому виробництві [11].

Стругання є технологічно досконалішим способом одержання шпону, який забезпечує високу якість поверхні при значно меншій товщині листа — зазвичай від 0,3 до 2,5 мм. Процес полягає у зрізуванні тонких шарів деревини ножем із нерухомої призми або блока. На відміну від пиляння, тут відсутні втрати на пропилю, а зрізування здійснюється суцільним різом. Однак стругання вимагає високої якості підготовки деревини: волокна повинні бути спрямовані паралельно поверхні зрізу, а вологість матеріалу підтримується у межах, оптимальних для пластичної деформації волокон без їх розриву. Для полегшення процесу деревину часто піддають гідротермічній обробці — пропарюванню або прогріванню, що підвищує пластичність і зменшує опір різанню [11]. Струганий шпон відзначається виразною текстурою, гладкою поверхнею та високою щільністю. Він широко використовується для облицювання меблів, стінових панелей та декоративних елементів [3].

Лущення є найбільш поширеним способом виготовлення шпону у сучасній промисловості. Його суть полягає у безперервному зрізуванні тонкої стрічки деревини з поверхні обертового блока (чурака) на луцильному верстаті. Після

цього стрічку розрізають на окремі листи та сушать. Лущення має найвищу продуктивність і забезпечує мінімальні втрати деревини, оскільки товщина зрізу може становити лише 0,3–1,5 мм. Однак при цьому спостерігається часткове стискання волокон у зоні контакту з ножем, що призводить до зміни пористості та появи внутрішніх напружень [9]. Лущений шпон має дещо гіршу поверхневу якість, ніж струганий, однак є незамінним для виробництва фанери, гнуктоклеєних конструкцій та великоформатних облицювальних матеріалів [8].

Вибір способу отримання шпону значною мірою залежить від породи деревини. Для дуба, як високоміцної листяної породи з виразною текстурою, характерна наявність великих судин, висока твердість і анізотропність властивостей. Під час пиляння дуба вдається максимально зберегти природну текстуру, але значна твердість зумовлює підвищене зношування інструменту [3]. При струганні важливо забезпечити правильну орієнтацію волокон і оптимальну температуру прогріву, щоб уникнути сколювання [11]. Для лущення дубових блоків часто застосовують інтенсивну гідротермічну підготовку, оскільки без попереднього розм'якшення структура деревини не дозволяє одержати рівномірну стрічку шпону [1].

Технологічний процес виготовлення шпону складається з кількох основних етапів: підготовка сировини, гідротермічна обробка, власне процес зрізування, сушка та калібрування. Підготовка полягає у сортуванні, відокремленні серцевини, знятті кори й торцюванні колод на блоки відповідної довжини. Гідротермічна обробка є одним із ключових етапів, адже від неї залежить якість різання. Під дією температури (зазвичай 70–100 °C) і вологи деревина набуває більшої пластичності, зменшується її модуль пружності, а отже, легше піддається зрізуванню без розтріскування. При надмірному пропарюванні можуть відбуватися небажані зміни кольору або ослаблення волокон, тому режим підбирають індивідуально для кожної породи [13].

Важливим фактором, який визначає властивості шпону, є напрямок зрізування відносно річних кілець. Радіальне, тангенціальне або напіврадіальне розташування зрізу формує різний характер текстури, що особливо помітно на дубі. Радіальний зріз дає більш спокійний і рівномірний малюнок, тоді як тангенціальний – хвилясту структуру з виразними смугами. Це має значення при виборі декоративного напрямку для облицювання [3].

У процесі зрізування деревини відбувається складна взаємодія різального інструмента з матеріалом. На мікрорівні це поєднання процесів пружної та пластичної деформації, стискання, розтягування й зсуву волокон. При недостатньому розігріві деревини або неправильному куті різання спостерігається відрив волокон, що погіршує якість поверхні. Надто великий тиск ножа призводить до стискання клітинної структури, особливо у лущеному шпоні, що впливає на його подальшу поведінку під час термічного ущільнення [21]. Таким чином, параметри різання мають визначальний вплив на формування мікроструктури шпону та його фізико-механічні властивості [3].

Одним із важливих аспектів є також вологість шпону. Після зрізування вологість може становити 50–70 %, тому матеріал піддають сушінню до рівня 6–12 %, що відповідає умовам подальшого склеювання або облицювання. Сушіння здійснюють у стрічкових або роликкових сушарках з контрольованими температурними режимами. Нерівномірне висушування може призвести до жолоблення, утворення тріщин і внутрішніх напружень. Для дубового шпону особливо важливо забезпечити повільне та рівномірне висушування, щоб уникнути появи поверхневої сітки тріщин, властивої цій породі [4].

Виробництво шпону в Україні має давню історію та розвинену сировинну базу, що включає значні ресурси дуба, бука, вільхи, ясена та інших листяних порід. Український дуб традиційно вважається одним із найцінніших

матеріалів для виготовлення декоративного шпону завдяки своїй міцності, виразній текстурі та благородному кольору [20]. Україна за обсягами лісових ресурсів входить до провідних країн Європи: площа лісів становить близько 10,4 млн га, із запасом деревини приблизно 2,3 млрд м<sup>3</sup> [20]. Це створює надійну сировинну базу для виготовлення шпону. Основні підприємства, що спеціалізуються на шпоні, розташовані в Західному та Центральному регіонах — Львівська, Рівненська, Волинська, Вінницька області [14]. Український шпон успішно експортується до країн ЄС, де цінується за якість і декоративність [13].

## **1.2. Характеристика та властивості шпону**

Шпон як напівфабрикат деревинного походження поєднує у собі природні особливості деревини та специфічні властивості, зумовлені способом його одержання [1]. Його структура, фізико-механічні показники, а також експлуатаційні характеристики залежать від породи деревини, умов росту, вологості, орієнтації волокон, термічної історії матеріалу та технологічного режиму обробки [11]. У сучасному деревообробному виробництві шпон розглядається не лише як сировина для фанери, а й як високотехнологічний облицювальний матеріал, який визначає декоративність, теплові та механічні властивості готових виробів [10].

Шпон зберігає всі основні властивості природної деревини, але через зменшену товщину його поведінка під час експлуатації суттєво відрізняється [12]. У тонких листах різко знижується внутрішня напруженість, що позитивно впливає на стабільність форми та розмірів. Водночас через більшу відкритість пористої структури збільшується схильність до вбирання вологи, що вимагає належного регулювання вологості під час зберігання та використання [6].

Однією з найважливіших характеристик шпону є щільність. Вона відображає кількість деревинної речовини в одиниці об'єму та безпосередньо впливає на міцність, твердість, теплопровідність і здатність до склеювання [7]. Для шпону з дуба, який найчастіше використовується у високоякісному меблевому виробництві, середня щільність становить 650–750 кг/м<sup>3</sup> при вологості 12 % [7]. Така щільність забезпечує поєднання високої міцності з достатньою гнучкістю, що важливо під час формування криволінійних поверхонь або процесу облицювання [3].

Вологість шпону — ще один ключовий параметр, який визначає його стабільність і технологічну придатність [6]. Оптимальна рівноважна вологість для більшості порід деревини становить 8–12 %, але під час технологічних процесів допустимі коливання можуть досягати 6–14 % [8]. Надмірна вологість знижує якість склеювання, сприяє утворенню грибкових уражень, а занадто низька призводить до крихкості шпону та появи тріщин під час пресування [5].

Вологість безпосередньо впливає на теплотехнічні властивості шпону. Зі зменшенням вологості знижується теплопровідність, оскільки вода має більшу теплопровідність, ніж повітря, яке заповнює пори деревини [12]. Для дубового шпону теплопровідність при 12 % вологості становить у середньому 0,17–0,20 Вт/(м·К) [11]. Цей показник залежить від напрямку волокон: уздовж волокон теплопровідність вища приблизно у 1,5–2 рази, ніж уперек, що зумовлено анізотропною природою деревини [11]. В умовах термічного ущільнення, коли частина пор змикається, а вологість частково випаровується, теплопровідність може підвищуватись [19].

Окрім теплопровідності, для шпону важливою характеристикою є електропровідність. Деревина сама по собі є діелектриком, проте при підвищеній вологості або нагріванні її електропровідність суттєво зростає [11]. Для дубового шпону при відносній вологості 10 % питомий опір становить

приблизно  $10^9$ – $10^{11}$  Ом·см, а при вологості понад 20 % — зменшується в десятки разів [11]. Це явище важливе для контролю процесів сушіння, оскільки електричні властивості можуть бути використані для непрямого визначення вологості [14].

Одним із визначальних показників шпону, особливо струганого, є декоративність [12]. Природна текстура дуба — з чергуванням світлих і темних річних шарів, медово-коричневих відтінків і чітко виражених променів — надає поверхні виразного малюнку, який зберігається навіть після багаторічної експлуатації [12]. Відтінок і блиск шпону можуть змінюватися залежно від способу одержання: луцений має більш рівномірний малюнок, тоді як струганий — глибший і контрастніший [12].

Адгезійна здатність шпону — властивість поверхні утворювати міцне з'єднання з клеями чи іншими матеріалами — має надзвичайне значення для забезпечення якості клеєних виробів [14]. На неї впливають мікрорельєф поверхні, вологість, наявність екстрактивних речовин і продуктів термічної обробки [5]. Для дубового шпону, що містить значну кількість танінів, важливо уникати надмірного перегріву під час сушіння, щоб запобігти утворенню плівки на поверхні, яка знижує адгезію [11].

Механічні властивості шпону залежать від анатомічної структури деревини й напрямку навантаження [11]. Для дуба міцність на розтяг уздовж волокон становить 90–120 МПа, модуль пружності — близько 11 ГПа [3]. У тонких листах шпону ці показники знижуються приблизно на 15–25 % через ефект зменшення об'єму волокон, однак після термічного ущільнення спостерігається часткове відновлення міцності завдяки підвищенню щільності матеріалу [12].

Окрему увагу варто приділити вологообмінним властивостям шпону. Його пористість і капілярна структура визначають швидкість сорбції та десорбції вологи [4]. При підвищенні відносної вологості повітря деревина вбирає

вологу, розширюючись, а при зниженні — віддає, що викликає усушку [4]. Для шпону, на відміну від масивної деревини, ці процеси відбуваються значно швидше, оскільки товщина матеріалу менша, і волога швидко проникає через товщу [4].

У структурному аспекті шпон має шарувату організацію, у якій чергуються клітинні елементи деревини — судини, волокна, паренхіма [11]. У дубовій деревині велика кількість судин забезпечує високу проникність і добру адгезію, але водночас спричиняє нерівномірність просочення [11]. Термічна обробка або ущільнення призводять до часткової деградації геміцелюлоз, що підвищує гідрофобність і стабільність розмірів [5]. Цей процес супроводжується незначним потемнінням кольору, що надає шпону благородного відтінку, часто бажаного у дизайнерських рішеннях [12].

Хімічний склад шпону визначає його поведінку під час нагрівання або контакту з клеями [11]. Основу становлять целюлоза (приблизно 40–50 %), геміцелюлози (20–30 %) і лігнін (20–25 %) [20]. Крім того, дуб містить дубильні речовини, що забезпечують природну біостійкість, але можуть вступати у реакцію з деякими смолами, змінюючи колір склеєного шару [11]. При термічному ущільненні частина цих компонентів полімеризується, що підвищує твердість і знижує водопоглинання [5].

Виробництво шпону в Україні має розвинену сировинну базу [3]. Основними породами для виготовлення є дуб, бук, ясен, вільха, береза, а також деякі хвойні — сосна і модрина [11]. За даними UkraineInvest, українська меблева та фанерна промисловість належить до найбільш динамічних секторів переробки деревини, орієнтованих як на внутрішній ринок, так і на експорт до країн ЄС [3]. Щорічно в Україні виробляється понад 40 тис. м<sup>3</sup> струганого і лущеного шпону різних порід, з яких значна частина — дубовий, що користується стабільним попитом у Європі [14].

Згідно з даними деревообробних компаній, в Україні спостерігається сталий ріст випуску деревинних матеріалів, зокрема шпону, завдяки модернізації обладнання та впровадженню технологій енергозбереження. Зростає частка високоякісного облицювального шпону, що виготовляється на сучасних лініях із автоматичним контролем товщини та вологості [14]. Українські підприємства, такі як ТОВ «Нарман», експортують шпон вільхи, дуба, ясена, горіха до Італії, Польщі, Німеччини, що підтверджує конкурентоспроможність на європейському ринку [14].

Таким чином, шпон є складною природно-техногенною системою, в якій поєднуються мікроструктурні особливості деревини та вплив технологічних чинників [14]. Його властивості — фізичні, теплотехнічні, електричні, механічні та декоративні — визначають поведінку матеріалу під час термічного ущільнення. Розуміння цих характеристик є необхідною передумовою для аналізу змін, що відбуваються під впливом температури, тиску та вологості у подальших розділах дослідження [19].

### **1.3. Аналіз впливу параметрів термічного ущільнення на властивості деревини**

Термічне ущільнення є одним із найефективніших методів фізичної модифікації деревини, що дозволяє поліпшити її експлуатаційні характеристики без застосування хімічних реагентів [21]. Основна суть процесу полягає у впливі на деревину підвищених температур і тиску, внаслідок чого відбувається стискання пористої структури, зміна хімічного складу компонентів клітинної стінки, зменшення пористості та підвищення густини матеріалу [5]. У результаті формується новий структурний стан деревини з підвищеною твердістю, стабільністю розмірів і зниженою гігроскопічністю [19].

На властивості ущільненої деревини істотно впливають параметри процесу, серед яких визначальними є температура, тиск, тривалість пресування, вологість матеріалу та умови охолодження після оброблення [12]. Оптимальне співвідношення цих факторів забезпечує максимальне поліпшення фізико-механічних показників без надмірного руйнування клітинної структури [5].

Температура визначає характер фізико-хімічних перетворень у деревині [21]. При її підвищенні до 100–140 °С лігнін і геміцелюлози частково розм'якшуються, завдяки чому деревина набуває пластичності та легко деформується під дією тиску [5]. Подальше підвищення температури до 150–200 °С активізує реакції термогідролізу полісахаридів, що сприяє зниженню гігроскопічності та стабілізації розмірів [19]. За надмірних температур понад 220 °С відбувається термодеструкція целюлози, зменшення механічної міцності та потемніння матеріалу [21]. Таким чином, найефективніші результати ущільнення досягаються при температурах у межах 160–200 °С [5].

Другим ключовим параметром є тиск пресування, який визначає ступінь ущільнення деревини [12]. Зі зростанням тиску до 3–8 МПа об'єм пористих елементів зменшується, клітинні стінки сплющуються, а волокна зближуються між собою [19]. Це призводить до збільшення густини деревини у 1,3–1,8 раза, підвищення твердості та міцності на стиск і вигин [5]. Проте при надмірному тиску можливе виникнення внутрішніх напружень, які після зняття навантаження спричиняють часткове «відпруження» та зниження стабільності структури [21]. Для запобігання цьому важливим є поетапне підвищення тиску з наступною термостабілізацією матеріалу [19].

Тривалість пресування визначає глибину прогрівання деревини та рівномірність деформації по всій товщині шпону [5]. За коротких циклів зовнішні шари прогриваються швидше, тоді як внутрішні залишаються менш пластичними, що викликає внутрішні напруження [19]. Подовження

тривалості дозволяє досягти рівномірного ущільнення, однак при надто тривалому впливі підвищеної температури можливе часткове руйнування полімерних сполук, що негативно позначається на еластичності [21]. Оптимальна тривалість процесу зазвичай становить 5–10 хвилин і залежить від товщини шпону та породи деревини [5].

Вологість матеріалу є критичним чинником, який визначає пластичні властивості клітинних стінок [12]. Якщо деревина занадто суха (менше 6 % вологи), вона стає крихкою і схильною до розтріскування [19]. При надмірній вологості (понад 15 %) значна частина теплової енергії витрачається на випаровування води, що знижує ефективність нагрівання [5]. Оптимальною для ущільнення є вологість у межах 8–12 %, коли клітинна стінка достатньо пластична, але не перенасичена вологою [21].

У ході термічного ущільнення деревина зазнає суттєвих змін. Густина збільшується, зменшується пористість, покращуються механічні характеристики [19]. Міцність на вигин, стиск і твердість поверхні зростають у середньому на 30–60 %, залежно від режиму оброблення [5]. Одночасно з цим зменшується водопоглинання, оскільки кількість вільних гідроксильних груп, здатних зв'язувати вологу, скорочується внаслідок термічних реакцій у геміцелюлозах [21]. Це забезпечує підвищену стабільність розмірів матеріалу під час експлуатації в умовах змінної вологості [5].

Термічне ущільнення також впливає на інші фізичні властивості деревини. З підвищенням густини збільшується теплопровідність, оскільки зменшується кількість повітря у поровому просторі [19]. Електричний опір, навпаки, знижується, що пояснюється щільнішим контактом між волокнами [12]. Крім того, ущільнена деревина характеризується кращими акустичними властивостями, підвищеною зносостійкістю і стійкістю до механічних пошкоджень [5].

Після завершення процесу важливе значення має режим охолодження [19]. Якщо охолодження відбувається без тиску, частина внутрішніх напружень розвантажується, і деревина частково відновлює первісні розміри [21]. Це знижує ступінь ущільнення та щільність матеріалу [5]. Для уникнення зворотних деформацій охолодження доцільно проводити під тиском, що дозволяє стабілізувати отриману структуру і зафіксувати форму клітинних стінок у новому стані [19].

Виділяють також відмінності у поведінці різних порід деревини під час ущільнення [21]. Дифузно-пористі породи, як-от бук, береза, вільха, реагують на пресування рівномірно, що забезпечує стабільне ущільнення [5]. Натомість у кільцепористих породах, таких як дуб чи ясен, через значну різницю між ранньою та пізньою деревиною відбувається нерівномірне стискання, особливо у зонах великих судин [19]. У результаті структура стає більш компактною, але може спостерігатися часткова неоднорідність [21]. Саме для дубового шпону процес термічного ущільнення є особливо ефективним, оскільки він дозволяє зменшити просвіти судин, підвищити твердість і покращити декоративність поверхні [5].

Загалом термічне ущільнення є складним багатofакторним процесом, що поєднує фізичне стискання, термопластичну деформацію та часткову хімічну модифікацію полімерів деревини [19]. Вплив основних параметрів — температури, тиску, тривалості, вологості та охолодження — визначає кінцеві властивості матеріалу [21]. Правильне поєднання цих факторів дозволяє досягти суттєвого поліпшення експлуатаційних характеристик шпону: підвищення густини, міцності, стабільності розмірів та естетичних якостей [5]. Оптимізація режимів ущільнення має вирішальне значення для ефективного використання цього методу у промисловості, зокрема у виробництві декоративних облицювальних матеріалів, меблів та фанери з дубового шпону [19].

#### **1.4. Процеси, які відбуваються під час ущільнення і термічного оброблення деревини**

Термічне ущільнення деревини є складним фізико-хімічним процесом, у якому взаємодіють теплові, механічні та структурні чинники. Під час дії підвищеної температури та тиску деревина переходить у стан, коли її полімерні компоненти — целюлоза, геміцелюлози та лігнін — частково розм'якшуються, втрачають пружність і стають пластичними. Це дає змогу здійснювати цілеспрямоване стискання клітинної структури, зменшення пористості й утворення більш компактної та однорідної текстури матеріалу [1].

На початковому етапі процесу відбувається прогрівання деревини, що супроводжується підвищенням температури всередині волокон і поступовим випаровуванням вологи. У міру зростання температури вода у клітинах переходить із рідкого стану в пароподібний, утворюючи внутрішній тиск, який сприяє пом'якшенню клітинних стінок. За таких умов деревина виявляє термопластичні властивості, зокрема при температурах 120–180 °С, коли лігнін починає розм'якшуватися, а геміцелюлози — частково деструктуватися. Цей стан є критичним для ефективного ущільнення, адже саме в цей момент матеріал набуває здатності до пластичної деформації без утворення тріщин і розривів [11].

Під дією тиску клітинні стінки починають стискатися, порожнини волокон і судин сплющуються, міжклітинні пори закриваються. При цьому зменшується загальний об'єм деревини, зростає її густина, змінюється мікроструктура. Внутрішня будова матеріалу зазнає істотних перетворень — клітинні перегородки частково зливаються, створюючи зони підвищеної щільності. Так формується нова макроструктура деревини, у якій зменшується частка пористого простору, а волокна розташовуються щільніше одне до

одного. Цей етап супроводжується виникненням внутрішніх напружень, що вимагає точного контролю швидкості нагрівання й величини прикладеного тиску [21].

У міру тривання процесу відбуваються більш глибокі хімічні зміни. Частковий гідроліз геміцелюлоз призводить до утворення летких речовин — оцтової кислоти, фурфуролу, карбонільних сполук. Ці продукти реакцій сприяють додатковій деструкції гідроксильних груп, зменшуючи гігроскопічність деревини. Лігнін зазнає процесів конденсації та часткового окиснення, унаслідок чого утворюються нові ароматичні структури з підвищеною стабільністю. Ці зміни зумовлюють потемніння кольору деревини, підвищення її твердості та опору біологічному руйнуванню. Целюлоза залишається порівняно стійкою до термічного впливу, хоча при надмірно високих температурах (понад 200–220 °C) відбувається її деградація, що може знижувати механічну міцність [11].

Одним із ключових фізичних процесів, що супроводжують ущільнення, є видалення вологи. Під час нагрівання частина води випаровується, створюючи пару, яка, у свою чергу, сприяє пом'якшенню деревини зсередини. Водночас надмірне пароутворення може спричинити розшаровування матеріалу, тому важливо забезпечити рівномірне відведення вологи під час пресування. Оптимальним вважається стан, коли волога видалається поступово, а внутрішній тиск не перевищує міцності клітинних стінок [5].

Після основного етапу ущільнення деревина зазвичай піддається стабілізації — повільному охолодженню під тиском, що запобігає зворотній деформації, так званому «відпружненню». Цей процес особливо важливий для шпону, оскільки навіть незначне зниження щільності після зняття тиску може призвести до зміни товщини та порушення геометрії аркушів. У період стабілізації відбувається фіксація нової просторової структури полімерів,

зокрема лігнін переходить у твердий, зшитий стан, що забезпечує підвищену міцність і стабільність отриманого матеріалу [21].

Під час термічного ущільнення деревини спостерігається низка фізико-механічних змін. Міцність на стиск і вигин зростає на 40–80 %, твердість поверхні — у 1,5–2 рази. Водночас знижується гігроскопічність, оскільки кількість доступних гідроксильних груп у полісахаридах зменшується. Це зумовлює покращення стабільності розмірів у вологих умовах. Щільна структура також сприяє зниженню коефіцієнта водопоглинання та збільшенню зносостійкості. Втім, надмірна термообробка може призвести до крихкості, особливо у випадку деревини з високим вмістом геміцелюлоз [5].

Хімічні реакції, що відбуваються під час нагрівання, відіграють визначальну роль у формуванні нових властивостей деревини. У процесі термолізу полімерні компоненти частково полімеризуються, що сприяє утворенню зшитої структури з високою термостійкістю. При цьому зменшується кількість вільних функціональних груп, здатних зв'язувати воду, що пояснює зниження гігроскопічності. Разом з тим, через втрату частини геміцелюлоз знижується еластичність, тому ущільнена деревина стає твердішою, але менш гнучкою [11].

Крім хімічних і фізичних процесів, важливим є й структурно-механічний аспект. При тиску понад 5 МПа спостерігається пластична деформація клітинних стінок, що супроводжується зсувом мікрофібрил целюлози та утворенням нових контактів між ними. Це збільшує зчеплення між волокнами, що безпосередньо впливає на механічну міцність. Також змінюється напрямок мікрофібрил, що призводить до підвищення твердості уздовж волокон і зменшення анізотропії властивостей деревини [21].

Важливо зазначити, що характер і глибина змін значною мірою залежать від породи деревини. Наприклад, дуб, який характеризується щільною анатомічною будовою та наявністю великих судин, реагує на термічне

ущільнення утворенням більш однорідної структури завдяки частковому спаюванню волокон лігніном. Для дифузно-пористих порід, таких як береза чи вільха, ущільнення проходить рівномірніше, однак їх міцність зростає менш суттєво. Таким чином, порода деревини визначає не лише технологічні параметри процесу, а й кінцеві властивості отриманого матеріалу [3].

### **1.5. Мета та завдання дослідження**

Метою даної роботи є встановлення закономірностей впливу термічного ущільнення на фізико-механічні, структурні та експлуатаційні властивості струганого та пиляного дубового шпону, а також визначення оптимальних технологічних параметрів процесу для забезпечення високої якості готового матеріалу.

Основна ідея дослідження полягає у порівнянні поведінки шпону різних способів одержання при дії температури та тиску, визначенні особливостей зміни мікроструктури, густини, вологості, твердості та адгезійної здатності. Оскільки дуб має виражену кільцепористу будову, характер його реакції на термічне ущільнення істотно залежить від орієнтації волокон, глибини різку й стану поверхні шпону. Тому дослідження спрямоване на виявлення відмінностей між пиляним та струганим шпоном, які формують різну текстуру, товщину і ступінь відкритості судин.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю підвищення якості дубового шпону, який широко застосовується у виробництві меблів, дверних полотен, декоративних панелей і облицювальних матеріалів. Сучасне виробництво вимагає матеріалів із стабільними геометричними параметрами, підвищеною міцністю та стійкістю до вологи, що може бути досягнуто шляхом термічного ущільнення без використання хімічних реагентів. В умовах української деревообробної галузі така технологія має значний потенціал

завдяки екологічності, енергоефективності та можливості використання шпону середньої якості для виготовлення продукції преміум-класу.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити такі основні науково-практичні завдання:

— дослідити фізико-механічні властивості струганого та пиляного дубового шпону до термічного ущільнення, зокрема їх щільність та вологість;

— визначити вплив параметрів термічного ущільнення (температури та тривалості) на зміну щільності, міцності, а стабільності розмірів шпону;

— порівняти поведінку струганого та пиляного шпону під час ущільнення, встановити закономірності їх деформації;

— розробити рекомендації щодо оптимальних режимів ущільнення для кожного виду шпону, які забезпечують підвищення міцності матеріалу.

Очікуваним результатом дослідження є отримання системи експериментальних даних, що характеризують зміни властивостей дубового шпону різних способів одержання під впливом температури та тривалості, а також формулювання практичних рекомендацій для промислового використання технології термічного ущільнення у виробництві декоративних деревних матеріалів.

Таким чином, мета дослідження полягає у комплексному аналізі впливу параметрів термічного ущільнення на фізико-механічні властивості струганого та пиляного дубового шпону з метою підвищення їх міцності, стабільності та декоративних якостей. Реалізація поставлених завдань дозволить не лише вдосконалити технологію термічної модифікації деревини, а й підвищити ефективність використання дубових лісоматеріалів у деревообробній промисловості України

## 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1. Матеріали, які використані для експериментальних досліджень

Для проведення експериментальних досліджень у межах даної роботи використовувався дубовий шпон двох типів — струганий і пиляний. Матеріалом для його виготовлення слугувала деревина дуба звичайного (*Quercus robur* L.), що є однією з найпоширеніших і найцінніших порід твердолистяних дерев в Україні. Вибір дуба як об'єкта дослідження обґрунтовується його високими показниками міцності, щільності та зносостійкості, а також стабільністю розмірів під час термічної обробки. Дубова деревина має добре виражену текстуру, рівномірну пористу структуру та природну стійкість до гниття, завдяки чому вона широко використовується у виробництві меблів, паркету, фанери та облицювальних матеріалів. З огляду на значну поширеність дуба в Україні, результати дослідження мають практичну цінність для вітчизняних деревообробних підприємств, що спеціалізуються на виготовленні шпону.

Струганий шпон виготовляли методом зрізання тонких шарів деревини з поверхні підготовлених заготовок. У результаті отримували шари завтовшки близько одного міліметра з рівною та гладкою поверхнею без виривів волокон. Такий шпон мав чітко виражену текстуру річних кілець і природний блиск, що зумовлює його популярність у виробництві декоративних облицювальних матеріалів.

Пиляний шпон одержували шляхом розрізання дубових чураків на тонкі шари товщиною один міліметр за допомогою стрічкового пиляння. Такий спосіб дає можливість отримати шпон із грубішою поверхнею, ніж при струганні, однак він має підвищену шорсткість, що позитивно впливає на адгезійні властивості матеріалу при подальших технологічних процесах. Поверхня пиляного шпону є більш матовою, із видимими слідами пилки, але зберігає природну фактуру дубової деревини.

Для подальших експериментів зразки обох типів шпону були вирізані у вигляді квадратів розміром 300×300 міліметрів і товщиною один міліметр. Такий розмір було обрано для забезпечення рівномірного нагріву та розподілу тиску під час термічного ущільнення. Зразки маркували залежно від способу отримання шпону та режиму подальшої обробки, щоб забезпечити відстеження змін властивостей у кожній групі. Перед експериментальними дослідженнями зразки кондиціонували у стандартних лабораторних умовах при температурі  $20 \pm 2$  °C і відносній вологості повітря  $65 \pm 5$  відсотків протягом семи діб, що дозволило досягти рівноважної вологості матеріалу та стабілізувати його структуру.

Зовнішній вигляд і мікроструктура обох типів шпону суттєво відрізняються. Струганий шпон має гладку поверхню, меншу кількість відкритих пор і більш рівномірний колір, тоді як пиляний характеризується виразнішою текстурою, підвищеною шорсткістю та більшим коефіцієнтом відкритої пористості. Ці відмінності зумовлюють різний характер взаємодії матеріалу з теплом і тиском під час термічного ущільнення. Саме тому порівняння обох видів шпону дозволяє глибше дослідити вплив технологічних параметрів процесу на зміну фізико-механічних властивостей дубової деревини.

Вибір дубового шпону як об'єкта дослідження зумовлений не лише його декоративними характеристиками, але й тим, що дубова деревина належить до високоденситних порід, які найбільш чутливо реагують на термомеханічну дію. Це дає можливість простежити суттєві зміни структури під впливом температури і тиску, а також оцінити потенціал дубового шпону для подальшого використання у виробках, де важливими є твердість, стабільність розмірів і термостійкість.

Таким чином, у дослідженні було використано два різновиди дубового шпону — струганий і пиляний, виготовлені з однорідної сировини та підготовлені до експерименту з дотриманням однакових умов вологості та розмірних параметрів.

## 2.2.Обладнання і вимірювальна апаратура використана в дослідженні

Для проведення експериментів використовувалось наступне обладнання:

- лінійка металева;
- гідравлічний прес для склеювання деревинних матеріалів ПГ 160-400;
- секундомір;
- електронна вага AD 2000 (точність 0,01 г);



- штангенциркуль;



- електронний вологомір;



- товщиномір

- персональний комп'ютер для математичної обробки та оформлення результатів досліджень.

Експериментальні дослідження впливу термічного ущільнення на властивості струганого та пиляного дубового шпону проводилися з використанням комплексу сучасного вимірювального та технологічного обладнання, яке забезпечує точність, повторюваність і стабільність результатів. Кожен етап експерименту — від підготовки зразків до контролю їх фізико-механічних параметрів — здійснювався із застосуванням приладів, які відповідають вимогам метрологічної точності та пройшли попередню калібровку.

Основним технологічним агрегатом, який забезпечував процес термічного ущільнення шпону, був гідравлічний прес ПГ 160-400, призначений для склеювання та пресування деревинних матеріалів. Його конструкція включає дві нагрівальні плити з рівномірним розподілом температури по всій площині робочої поверхні. Це дало змогу забезпечити стабільний тепловий контакт із зразками протягом усього циклу ущільнення. Регулювання тиску здійснювалося за допомогою гідравлічної системи з манометром високої точності, що дозволяло підтримувати задані параметри навантаження у межах 0,5–4 МПа з похибкою не більше  $\pm 0,05$  МПа. Нагрівання плит преса відбувалося за допомогою вбудованих електронагрівачів, що дозволяли встановлювати температуру в діапазоні від 20 до 200 °С. Контроль температури здійснювався автоматично за допомогою терморегулятора, а стабільність режиму контролювалася термопарою типу ТХА (хромель–алюмель). Це забезпечувало підтримання сталої температури з відхиленням не більше  $\pm 2$  °С протягом усього процесу ущільнення.

Вимірювання маси зразків проводилися на електронних вагах моделі AD-2000 з точністю до 0,01 г. Перед початком дослідів ваги проходили калібрування за допомогою еталонних гир, що дозволяло усунути похибки та забезпечити стабільність результатів зважування. Зважування виконувалося до і після термооброблення, що дозволяло визначати зміну маси, пов'язану з випаровуванням вологи та змінами структури деревини. Геометричні параметри шпону — товщину, довжину і ширину — визначали за допомогою металевої лінійки та штангенциркуля із ціною поділки 0,02 мм. Вимірювання проводили в кількох точках кожного зразка для обчислення середніх значень і зменшення впливу локальних відхилень, спричинених неоднорідністю структури деревини.

Контроль вологості зразків здійснювався за допомогою електронного вологоміра, який дає змогу швидко визначати відносну вологість деревини без руйнування зразка. Прилад працює за принципом вимірювання електричного

опору матеріалу, який прямо залежить від вмісту вологи. Для підвищення точності вимірів результати перевіряли додатково за допомогою вагового методу визначення вологості згідно з вимогами стандарту ДСТУ ISO 13061-1:2017.

Для фіксації тривалості процесів пресування, нагрівання та витримування використовувався секундомір із точністю до однієї секунди. Чітка фіксація часу дозволяла забезпечити дотримання заданих режимів ущільнення, оскільки навіть незначне відхилення тривалості впливу температури або тиску може призвести до зміни кінцевих властивостей шпону. Усі отримані дані заносилися в протоколи дослідів у режимі реального часу, після чого вводилися в електронну таблицю для подальшої обробки.

Комп'ютерна обробка результатів здійснювалася на персональному комп'ютері із використанням програмного забезпечення Microsoft Excel та Microsoft Word . Ці програми дозволяли виконувати математичну статистику, обчислювати середні значення, дисперсії, коефіцієнти варіації, а також будувати графіки залежностей між параметрами ущільнення (температура, тиск, час) та показниками властивостей шпону (щільність, вологість, товщина, деформаційна стабільність). Це дало змогу отримати достовірні кореляційні зв'язки між змінними величинами та зробити узагальнення щодо закономірностей процесу ущільнення.

Перед початком кожної серії експериментів проводилася перевірка працездатності обладнання, калібрування вимірювальних приладів і тестування стабільності температурного поля нагрівальних плит преса. Для цього використовувалася контрольна термопара, показники якої звірялися із показниками вбудованих датчиків. Усі відхилення не перевищували допустимих меж, передбачених технічними характеристиками обладнання. Це дозволило гарантувати сталість режимів та зменшити похибку експерименту.

Випробування проводилися у лабораторних умовах при температурі повітря  $20 \pm 2$  °C і відносній вологості  $65 \pm 5$  %, що відповідає стандартним умовам кондиціонування деревинних матеріалів. Кожен зразок дубового шпону перед пресуванням кондиціонувався не менше 7 діб для стабілізації внутрішньої вологи. Після термообробки зразки зберігалися у тих же умовах не менше 24 годин до моменту проведення контрольних вимірювань, щоб уникнути впливу залишкової температури та градієнтів вологості.

Таким чином, використання комплексу точного лабораторного обладнання — гідравлічного преса ПГ 160-400, електронних ваг АД-2000, штангенциркуля, вологоміра, секундоміра та комп'ютерного комплексу для обробки результатів — забезпечило достовірність і точність експериментальних даних. Це дозволило об'єктивно оцінити вплив параметрів термічного ущільнення на фізико-механічні властивості струганого та пиляного дубового шпону й створило передумови для подальшого моделювання процесу на основі отриманих залежностей.

### **2.3. Підготовлення зразків до наступних операцій**

Експериментальні дослідження проводилися у лабораторії НЛТУ України на лабораторному обладнанні кафедри ТДКМ.

Вимірювання вологості проводили експрес-методом за допомогою вологоміра та стандартизованим (сушильно-ваговим) методом за ГОСТ 20800-75 для шпону і ГОСТ 16483.7-71 для деревини.

## **2.4. Методика дослідження та планування експериментів**

### **2.4.1. Вибір змінних факторів та планування експериментів**

З метою визначення властивостей шпону використовували класичний експеримент.

Сталими факторами при проведенні експериментів були:

- порода деревини: дуб;
- тиск ущільнення шпону: 2 МПа.

Змінними факторами при проведенні досліджень були:

- вид шпону: струганий, пиляний;
- температура ущільнення шпону: 120 °С, 150 °С, 180 °С;
- тривалість ущільнення шпону: 3 хв., 5 хв., 7 хвилин.

### **2.4.2. Методика визначення фізичних властивостей шпону**

Визначення фізичних властивостей шпону здійснювалося відповідно до вимог стандартів щодо фізико-механічних випробувань деревини та шпону, що забезпечує відтворюваність результатів і можливість порівняння даних з іншими дослідженнями [8]. До основних фізичних показників, які підлягали визначенню, було віднесено вологість, густину, водопоглинання та розбухання.

Густину шпону визначали розрахунковим методом за відношенням маси до об'єму, який визначався на основі вимірювання довжини, ширини й товщини у трьох контрольних точках [7]. Використання середнього значення товщини дозволяло зменшити вплив локальних анатомічних варіацій, характерних для дубової деревини, зокрема змін у товщині клітинних стінок та розмірі судин [3]. Встановлення густини є важливим елементом аналізу,

оскільки вона безпосередньо пов'язана зі структурною неоднорідністю, пористістю та можливостями подальшої модифікації матеріалу [18].

Для кожного показника проводили не менше трьох паралельних вимірювань, що забезпечувало статистичну надійність отриманих результатів відповідно до методичних рекомендацій з оброблення експериментальних даних [15]. Розрахункові значення визначали на основі середніх величин та похибок вимірювань, що дозволяло комплексно оцінити фізичний стан матеріалу.

Застосування такої методики забезпечує повну характеристику фізичних властивостей шпону, враховує вплив вологості, структури, густини та гідрофільності, а також відповідає вимогам нормативних документів щодо контролю якості деревинних матеріалів [9].

#### **2.4.3. Методика визначення механічних властивостей шпону**

Механічні властивості шпону визначалися відповідно до вимог нормативних документів для фізико-механічних випробувань деревини та шпону [9]. Основна увага зосереджувалась на встановленні межі міцності при розтязі вздовж волокон, статичної твердості та модуля пружності при згині, оскільки ці характеристики визначають поведінку матеріалу під час оброблення, склеювання та експлуатаційних навантажень.

Межа міцності при розтязі вздовж волокон

Розтягальні випробування проводили на плоских зразках заданої довжини та ширини, орієнтованих таким чином, щоб навантаження прикладалося паралельно напрямку волокон. Така схема відповідає природі роботи шпону та дозволяє оцінити цілісність волоконно-пористої структури дубової деревини [3].

Зразки закріплювали в розривній машині з рівномірним наростанням навантаження до моменту руйнування. Межу міцності при розтязі визначали за максимальним навантаженням, яке витримував зразок до розриву, з подальшим розрахунком у перерахунку на площу поперечного перерізу. Отримані значення відображають стан клітинних стінок і якість волоконного каркаса, які істотно залежать від щільності й вологості шпону [12].

#### Модуль пружності при статичному згині

Такий показник є важливим під час дослідження шпону, оскільки визначає його поведінку під час формування клеєних пакетів і впливає на загальну стабільність композитних виробів [2].

#### Умови підготовки та проведення випробувань

Геометричні параметри кожного зразка — довжина, ширина та товщина — визначали з високою точністю відповідно до вимог стандартів [9].

Випробувальне обладнання перед початком роботи перевірялося на точність згідно з вимогами до технічної справності машин для механічних випробувань деревини [8]. Швидкість прикладання навантаження підбиралася таким чином, щоб виключити ударний характер навантаження та забезпечити чисту статичну дію.

#### Оброблення результатів

Для кожного виду механічних випробувань виконували не менше трьох паралельних визначень, що давало можливість отримати середні значення та оцінити варіацію результатів згідно з методиками статистичного аналізу [15]. Таке опрацювання дозволяло виявити закономірності впливу структури, щільності та вологості дубового шпону на його механічні характеристики.

Комплексне застосування зазначених методів забезпечувало повне уявлення про механічні властивості шпону та створювало основу для подальшого аналізу впливу термічного ущільнення на його поведінку під навантаженням [13].

## 2.5. Статистична обробка результатів досліджень

Надійність та об'єктивність висновків, отриманих у ході експериментальних досліджень, безпосередньо залежить від коректності та повноти статистичної обробки вимірюваних даних. Оскільки результати експериментів розглядаються як випадкова вибірка сукупності, яка підпорядковується законам теорії ймовірностей, першочерговим етапом є попередня статистична обробка. Вона спрямована на узагальнення даних, оцінку їхньої варіативності та підготовку до подальшого регресійного аналізу [15].

Під час статистичної обробки експериментальних даних визначалися наступні основні статистичні характеристики:

### 1. Середнє арифметичне значення

Середнє арифметичне значення є найбільш поширеною мірою центральної тенденції, яка дає уявлення про типове значення досліджуваної властивості. Воно розраховується як сума всіх вимірних значень, поділена на загальну кількість спостережень:

$$\bar{y} = \frac{(y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n)}{n}, \quad (2.17)$$

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

$n$  – число спостережень.

### ***Вибіркова дисперсія та середньоквадратичне відхилення***

Вибіркова дисперсія та середньоквадратичне відхилення

Середнє арифметичне саме по собі не відображає ступінь розсіювання або мінливості вимірюваної властивості. Для кількісної оцінки мінливості (варіації) результатів застосовують вибірку дисперсію ( $S^2$ ) та середньоквадратичне відхилення.

Вибіркова дисперсія

Дисперсія визначає середній квадрат відхилення окремих результатів від середнього арифметичного значення [15]:

$$S^2 = \frac{(y_1 - \bar{y})^2 + (y_2 - \bar{y})^2 + \dots + (y_n - \bar{y})^2}{n - 1}, \quad (2.18)$$

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

$y_i$  – значення в  $i$ -му досліді;

$\bar{y}$  – середнє арифметичне значення.

### ***Середньоквадратичне відхилення***

$$S = \sqrt{S^2}, \quad (2.19)$$

### ***Коефіцієнт варіації***

Для порівняння ступеня варіації властивостей, виміряних у різних одиницях, або для оцінки відносного розсіювання використовують коефіцієнт варіації ( $V$ ). Він виражає середньоквадратичне відхилення у відсотках від середнього значення:

$$V = \frac{S}{\bar{y}} \cdot 100 \%, \quad (2.20)$$

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

### ***Середньоквадратична похибка середнього значення***

Оскільки отримане середнє арифметичне значення базується на обмеженій вибірці, необхідно оцінити його надійність щодо справжнього середнього значення генеральної сукупності. Для цього визначають середньоквадратичну похибку середнього значення [15]:

$$S_y = \pm \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (2.21)$$

### ***Показник точності дослідів***

Для комплексної оцінки надійності експерименту використовується показник точності дослідів  $P$ . Він виражає середню похибку середнього значення у відсотках до самого середнього значення:

$$P = \pm \frac{S_y}{\bar{y}} \cdot 100, \% \quad (2.22)$$

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

### **3. ОБРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ**

Основним завданням дослідження був аналіз властивостей струганого ущільненого, пиляного ущільненого, струганого не ущільненого, пиляного неущільненого дубового шпону за різної температури ущільнення, різної тривалості ущільнення, але при сталих значеннях тиску.

Для експерименту використовувався дубовий лущенний та пиляний шпон. Ущільнення шпону проводилося в пресі за різного часу: 3, 5, 7 хвилин та при різній температурі: 120, 150, 180 °С

#### **3.1. Дослідження впливу термічного ущільнення на величину спресування шпону**

У ході експериментальних досліджень було проаналізовано зміну величини спресування зразків струганого та пиляного шпону залежно від температури пресування та часу. Результати наведені на рис 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 3.1.4, 3.1.5

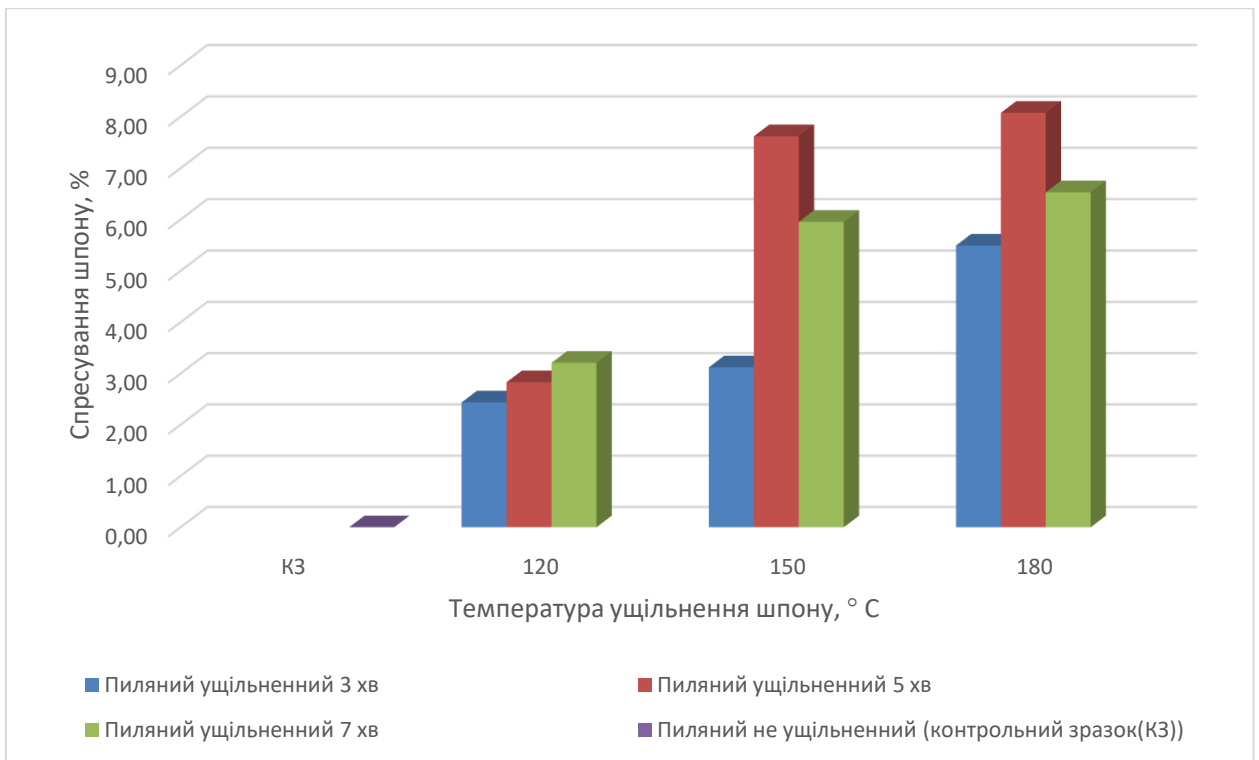


Рис 3.1.1 Залежність величини спресування від температури та часу ущільнення пиляного шпону

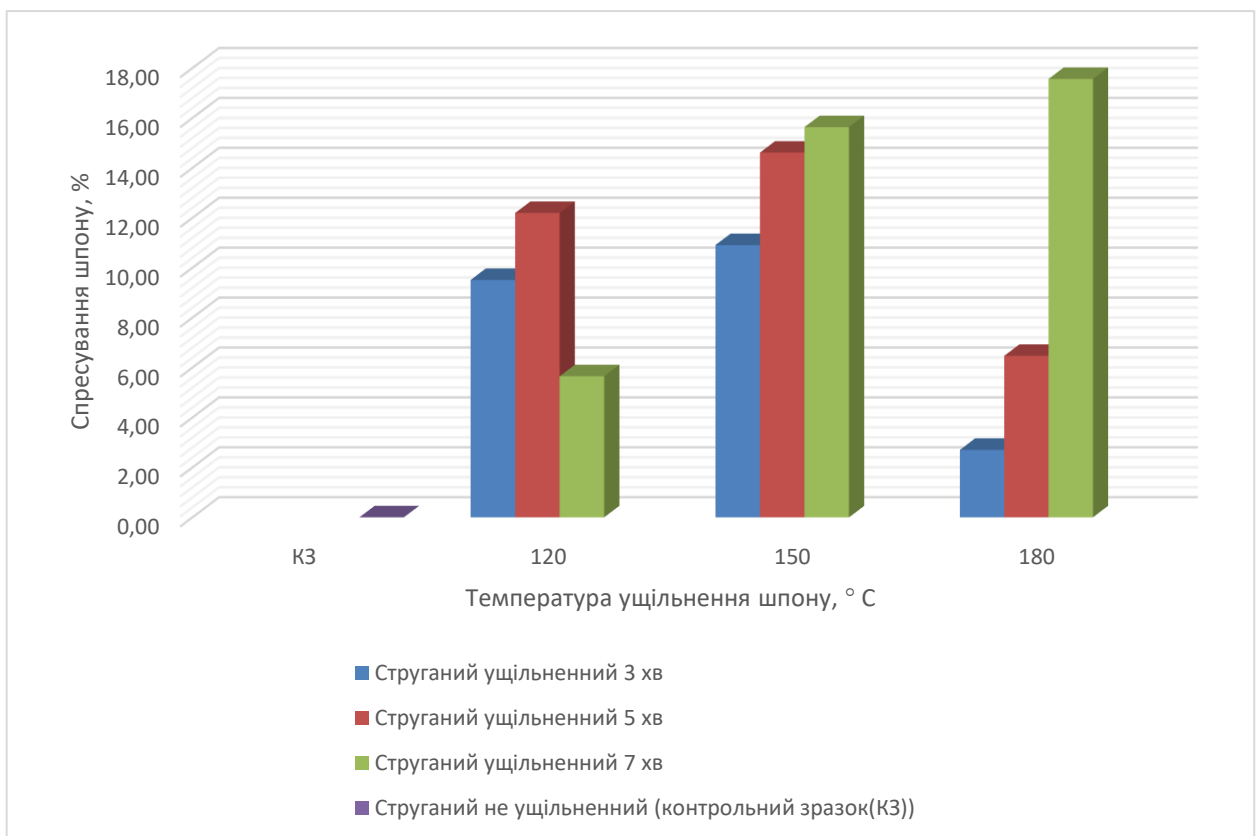


Рис 3.1.2 Залежність величини спресування від температури та часу ущільнення струганого шпону



Рис 3.1.3 Залежність величини спресування від температури та при сталому часі ущільнення шпону

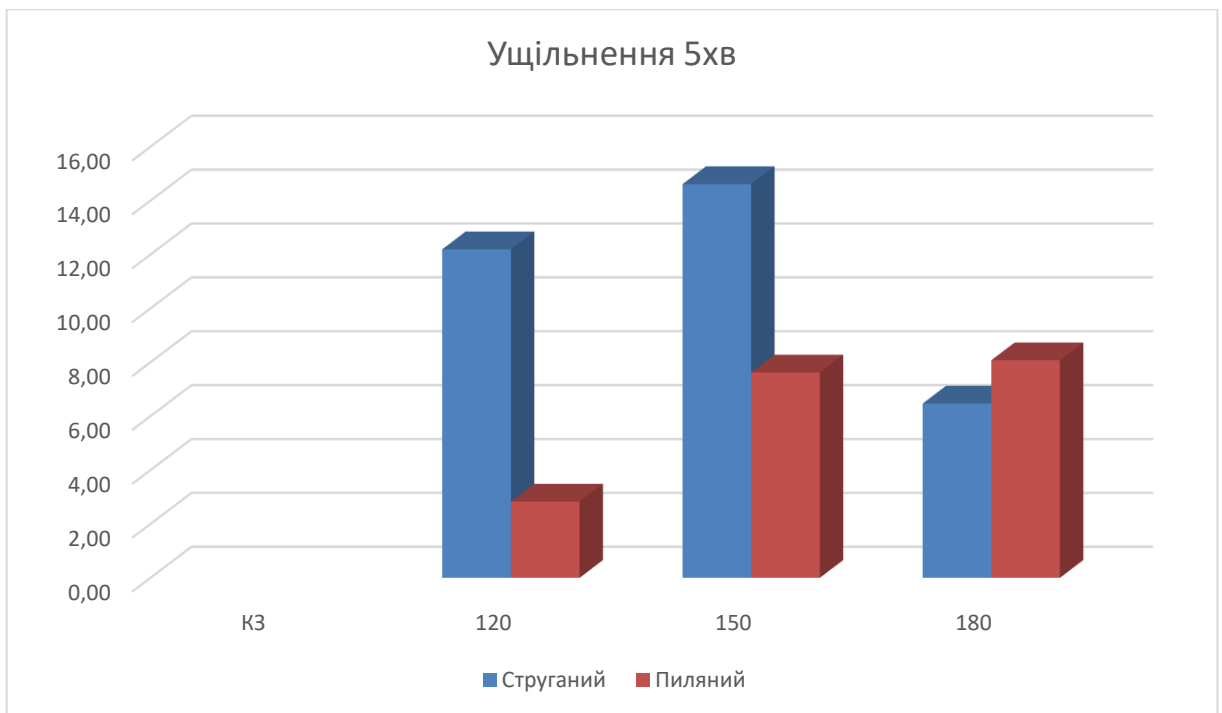


Рис 3.1.4 Залежність величини спресування від температури та при сталому часі ущільнення шпону

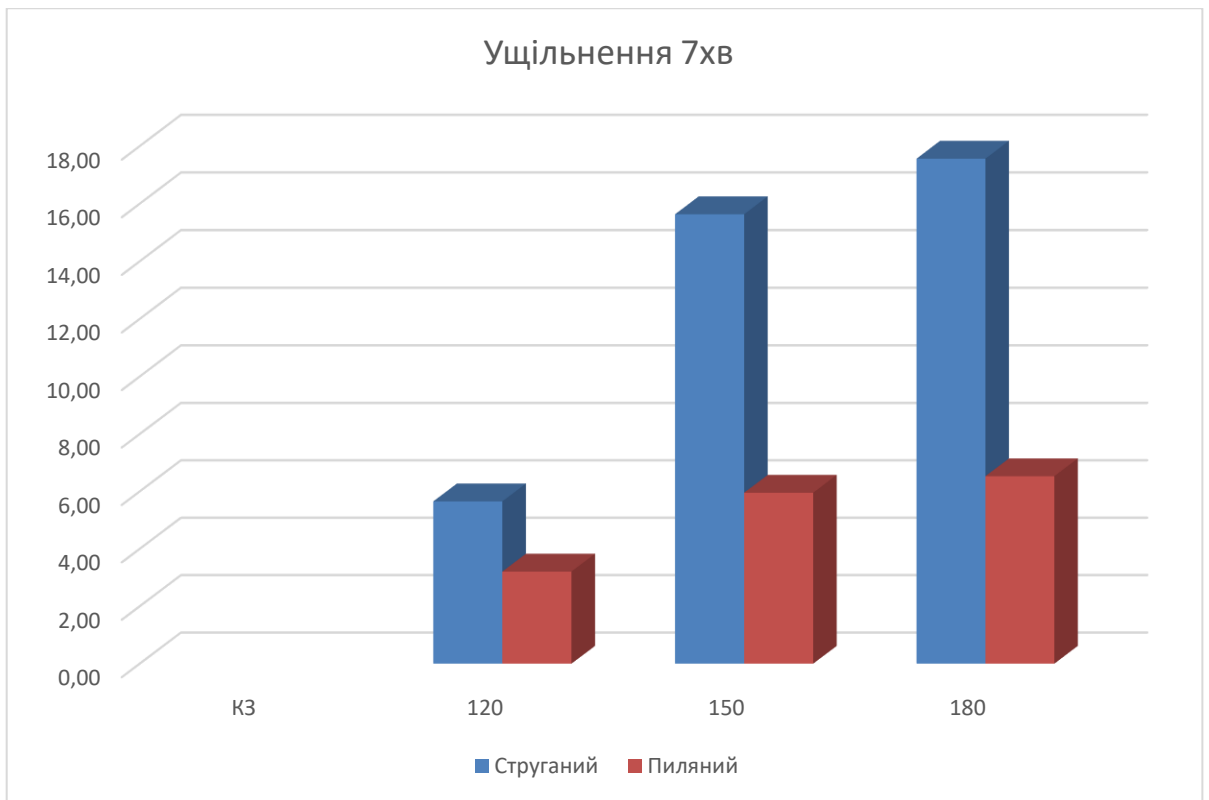


рис 3.1.5 Залежність величини спресування від температури та при сталому часі ущільнення шпону

У результаті експериментальних досліджень встановлено, що термічне ущільнення істотно впливає на величину спресування струганого та пиляного дубового шпону. Зі зростанням температури та тиску спостерігається збільшення ступеня спресування, що зумовлено термопластичною деформацією клітинних стінок і зменшенням пористості деревини.

Виявлено, що струганий шпон ущільнюється більш рівномірно та стабільно порівняно з пиляним, що пояснюється кращою якістю поверхні та меншою кількістю структурних дефектів. Отримані результати підтверджують залежність величини спресування як від режимів термічного ущільнення, так і від способу одержання шпону, та свідчать про доцільність використання цього процесу для регулювання його товщини й структури.

### 3.2 Дослідження впливу термічного ущільнення на щільність шпону

У ході експериментальних досліджень було проаналізовано зміну щільності зразків струганого та пиляного шпону залежно від температури пресування та часу. Результати наведені в рис 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3, 3.2.4, 3.2.5

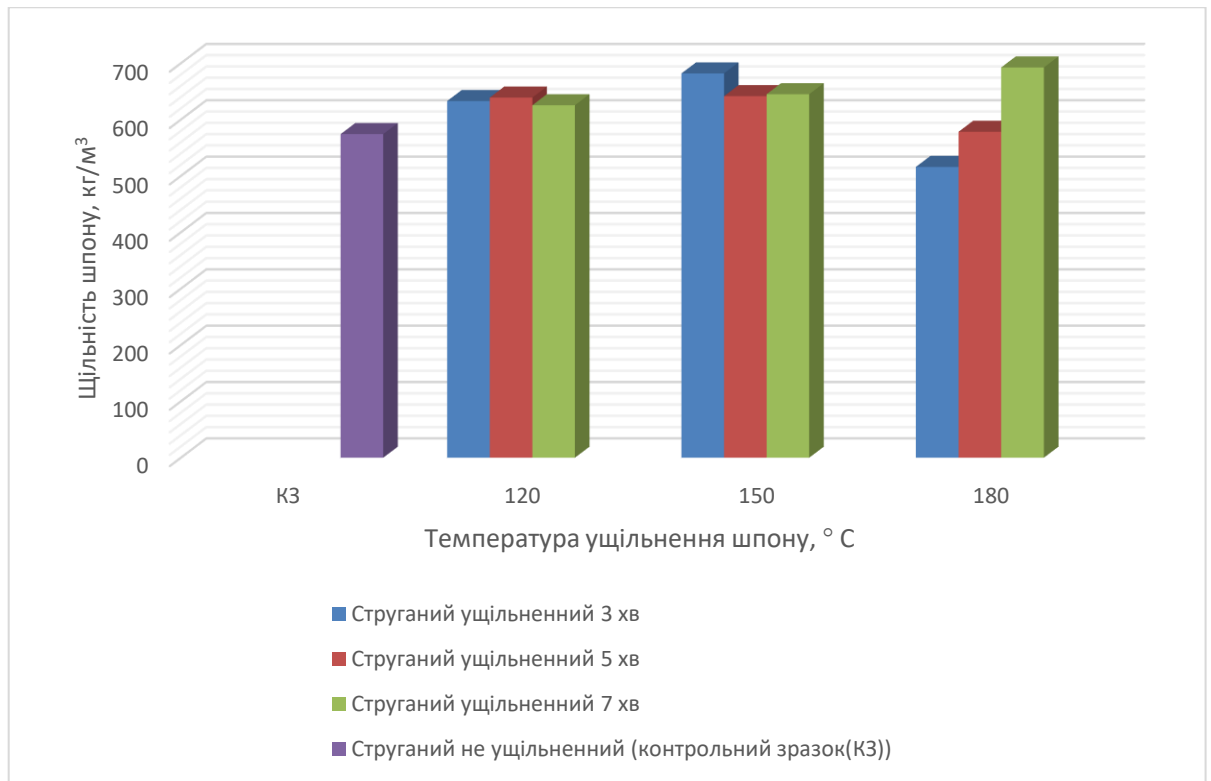


Рис 3.2.1 Залежність величини щільності від температури та часу ущільнення пиляного шпону

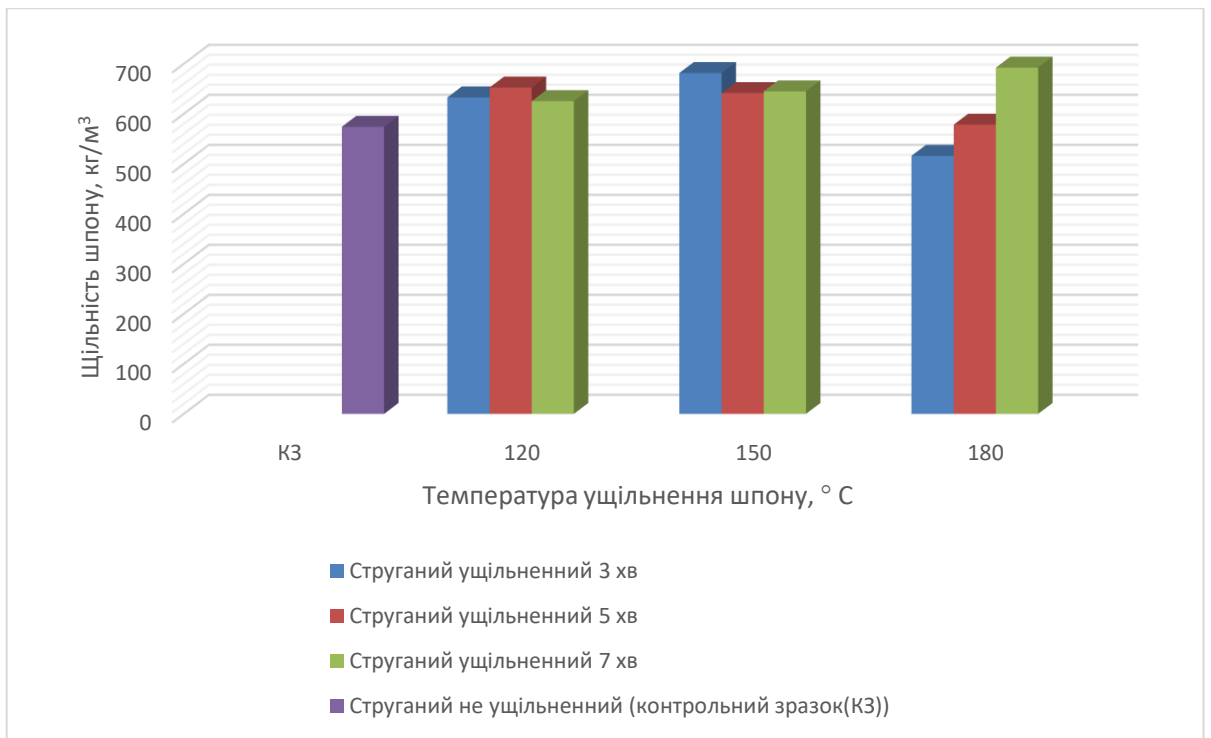


Рис 3.2.2 Залежність величини щільності від температури та часу ущільнення струганого шпону

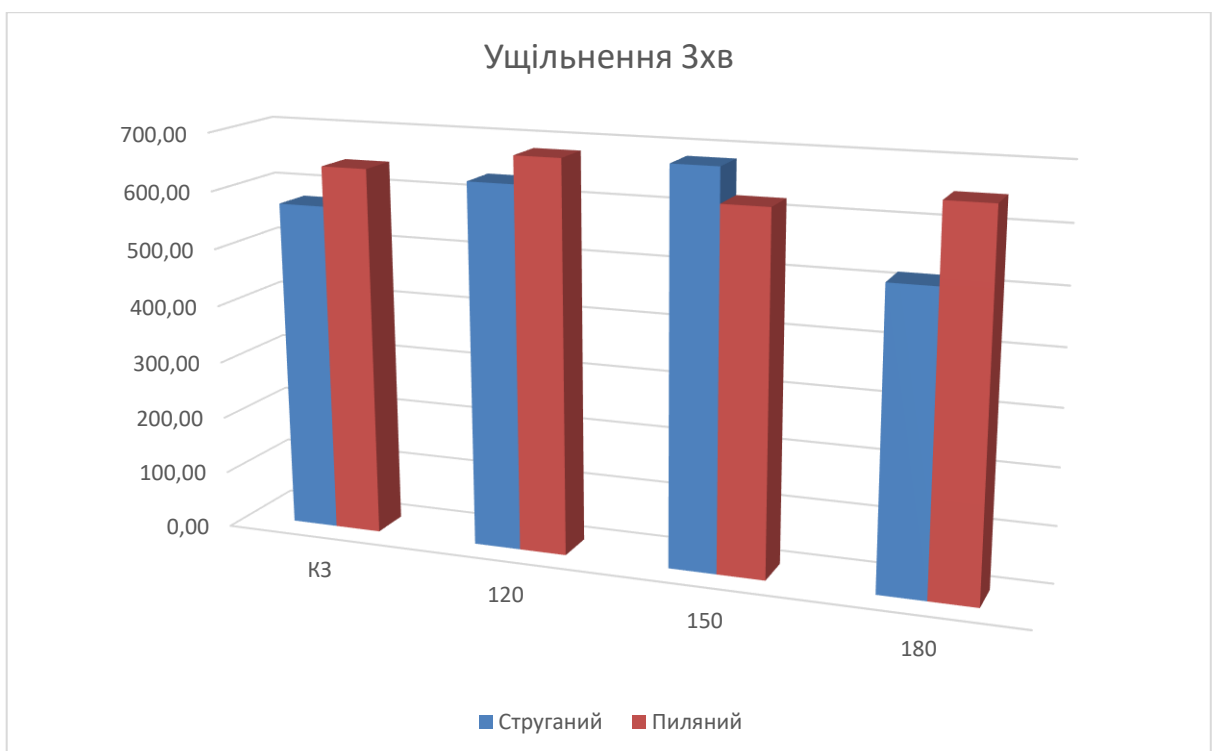


Рис 3.2.3 Залежність величини щільності від температури та при сталому часі ущільнення шпону

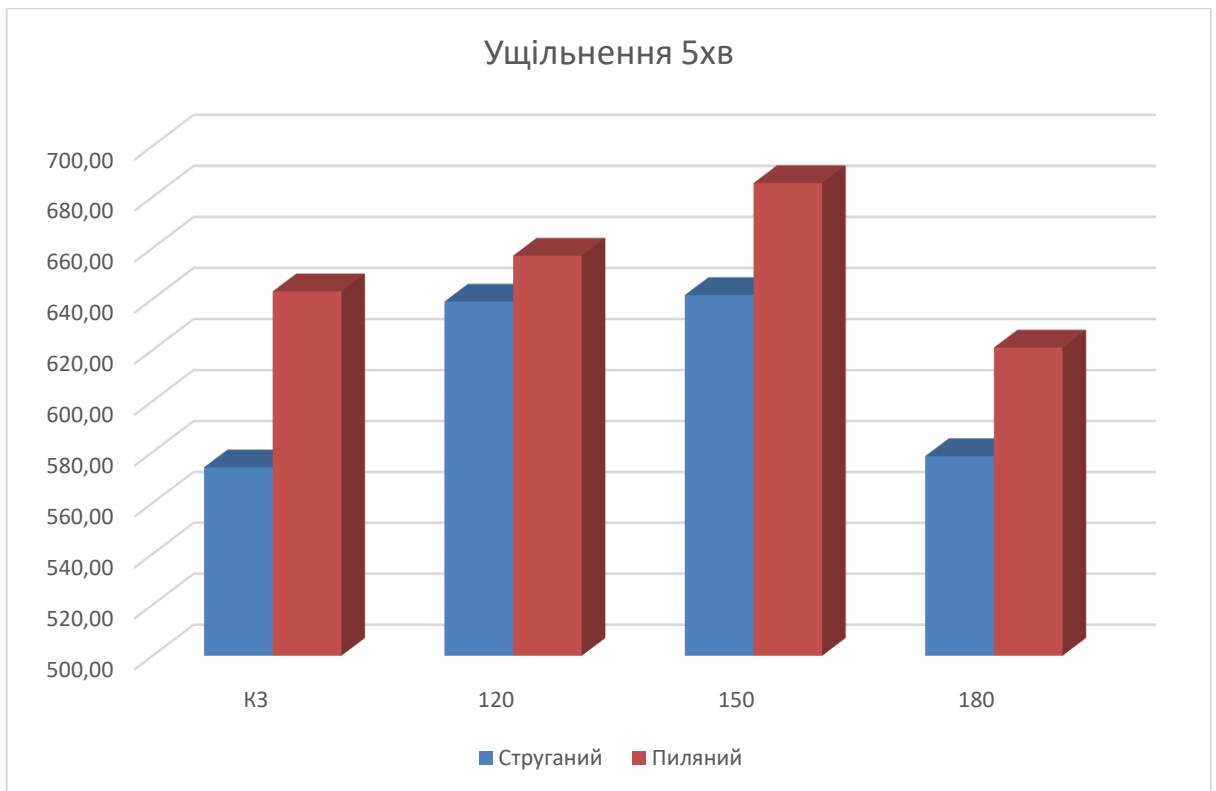


Рис 3.2.4 Залежність величини щільності від температури та при сталому часі ущільнення шпону

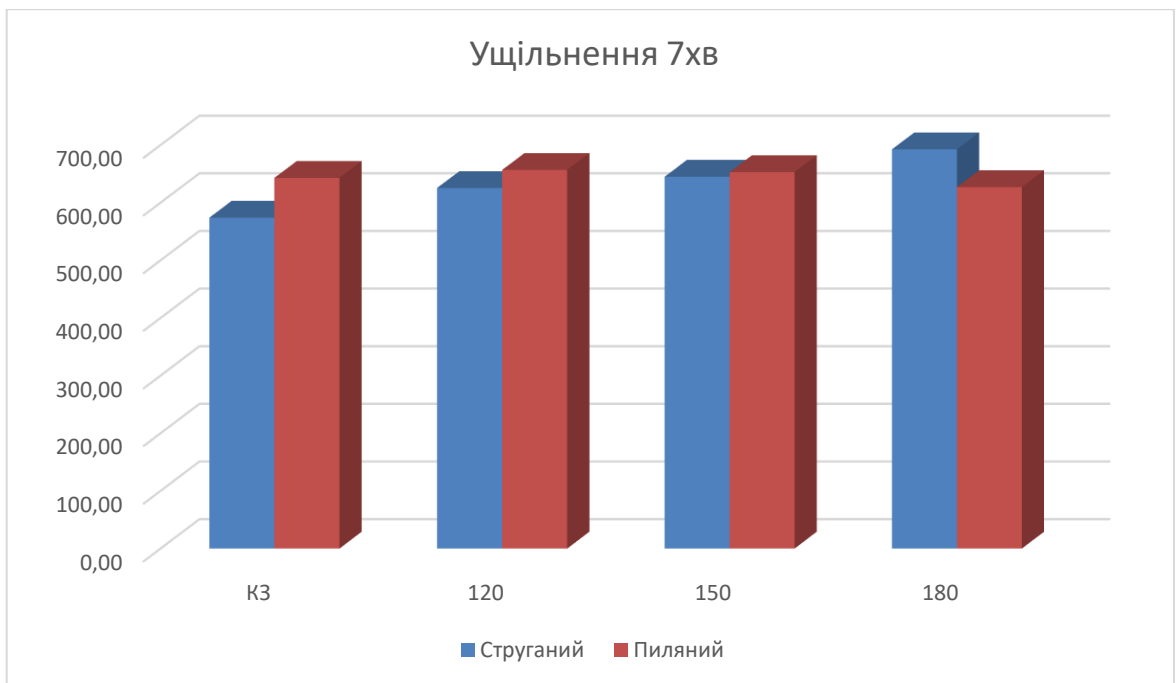


Рис 3.2.5 Залежність величини щільності від температури та при сталому часі ущільнення шпону

У ході досліджень встановлено, що термічне ущільнення спричиняє істотне зростання щільності струганого та пиляного дубового шпону. Підвищення температури та тиску призводить до зменшення пористості матеріалу та зближення клітинних елементів, що безпосередньо впливає на збільшення маси деревинної речовини в одиниці об'єму.

Виявлено, що струганий шпон після ущільнення характеризується вищою та більш стабільною щільністю порівняно з пиляним, що пояснюється його одноріднішою початковою структурою. Отримані результати підтверджують ефективність термічного ущільнення як способу підвищення щільності дубового шпону та створюють передумови для покращення його механічних властивостей.

### **3.3 Дослідження впливу термічного ущільнення пиляного, струганого шпону на межу міцності на розтяг вздовж волокон**

У ході експериментальних досліджень було проаналізовано зміну межі міцності на розтяг вздовж волокон зразків струганого та пиляного шпону залежно від температури пресування та часу. Результати наведені на рис 3.3.1, 3.3.2, 3.2.3, 3.2.4, 3.2.5.

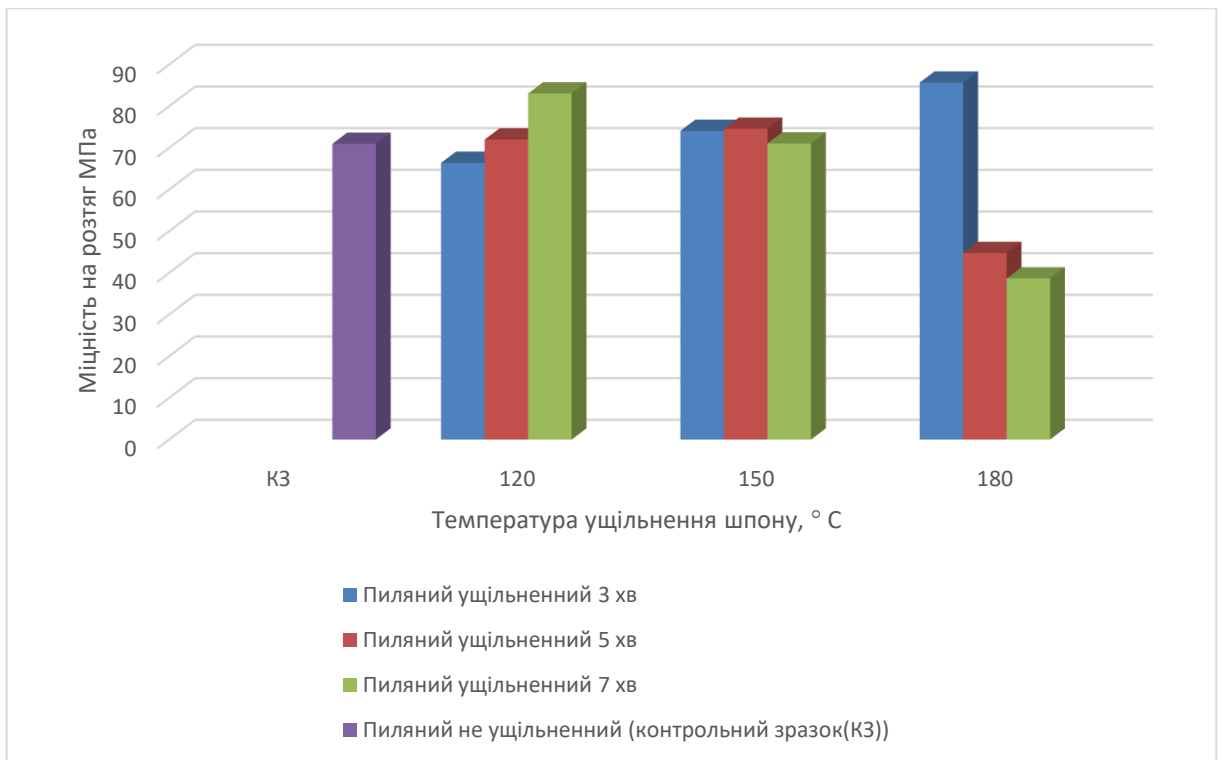


Рис 3.3.1 Залежність величини межі міцності на розтяг вздовж волокон від температури та часу ущільнення пиляного шпону

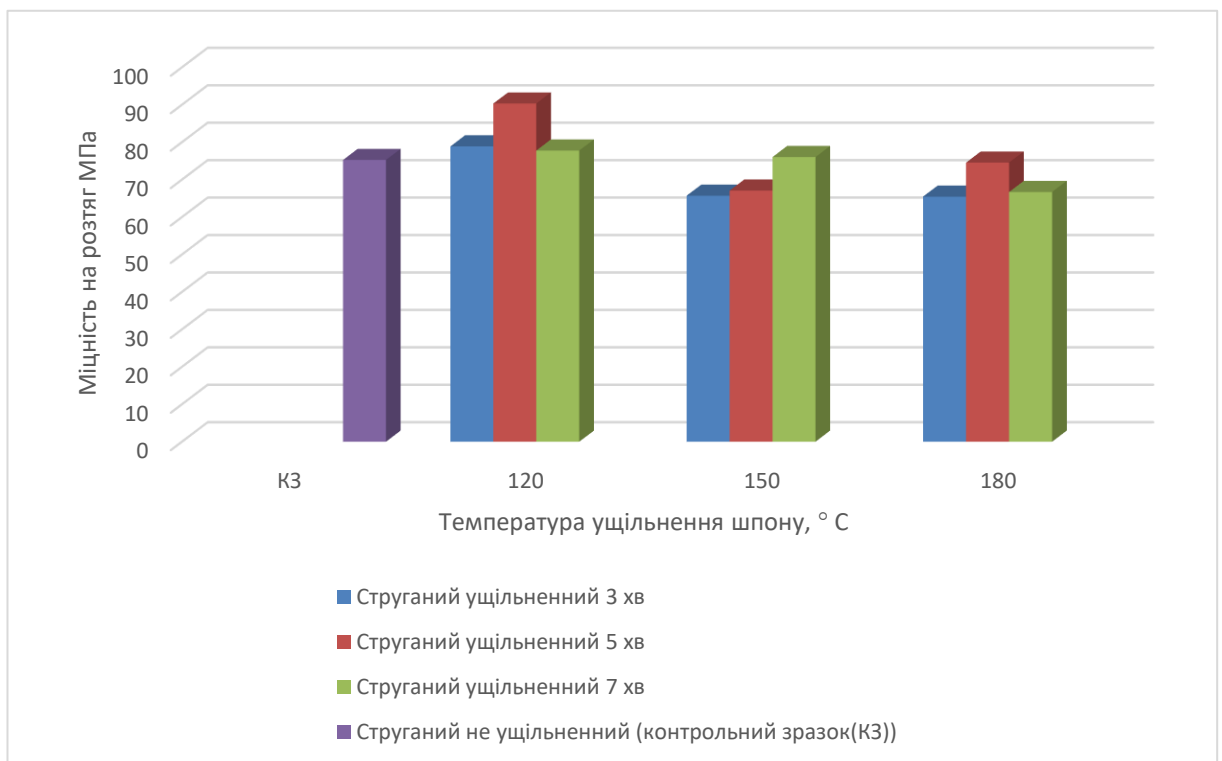


Рис 3.3.2 Залежність величини межі міцності на розтяг вздовж волокон від температури та часу ущільнення струганого шпону

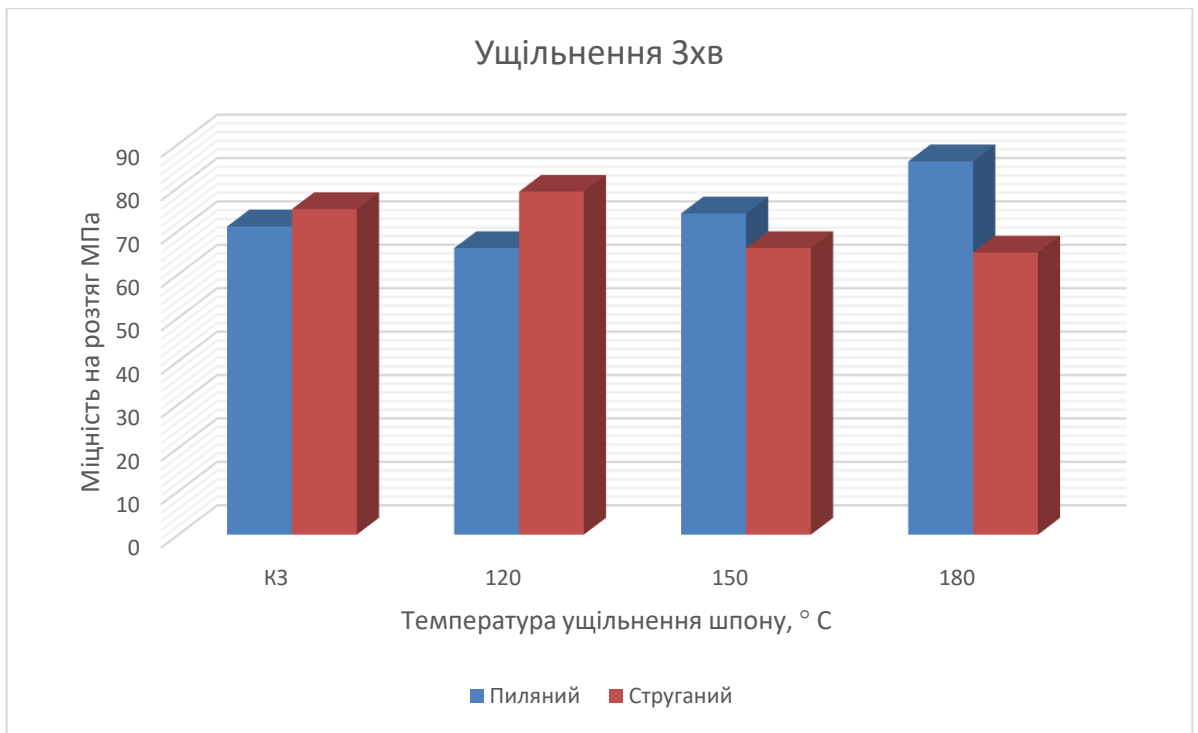


Рис 3.3.3 Залежність величини межі міцності на розтяг вздовж волокон від температури та при сталому часі ущільнення шпону

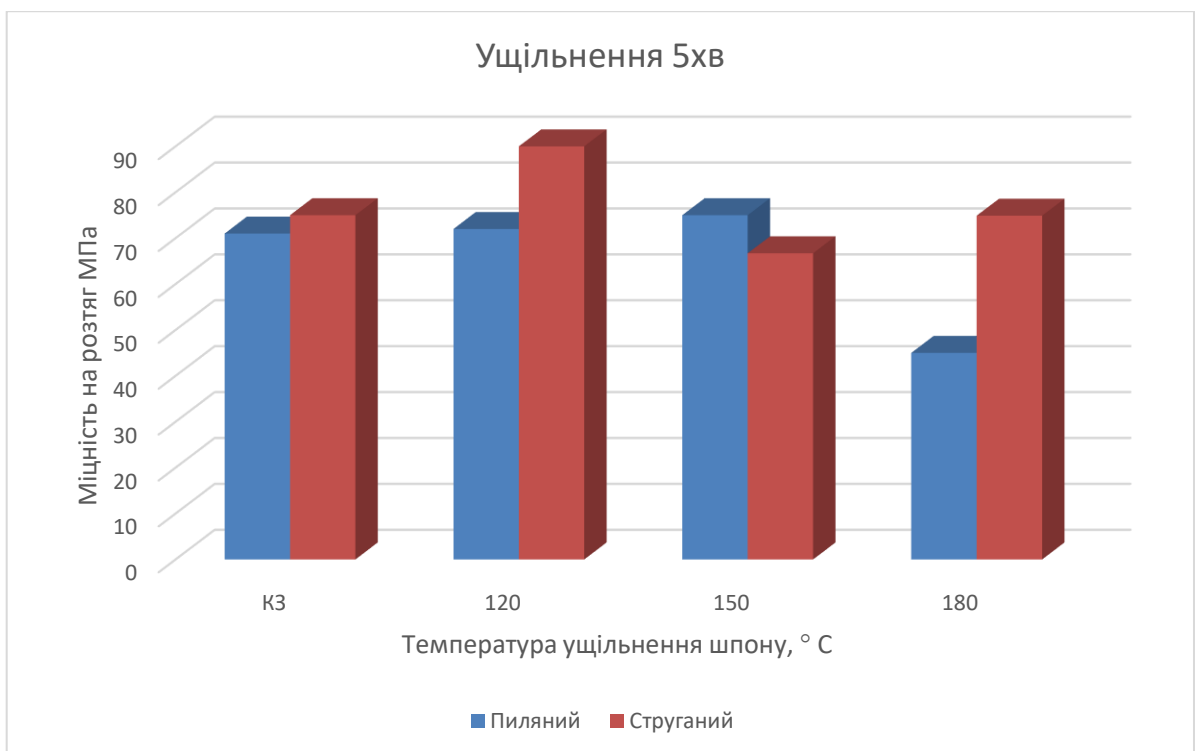


Рис 3.3.4 Залежність величини межі міцності на розтяг вздовж волокон від температури та при сталому часі ущільнення шпону

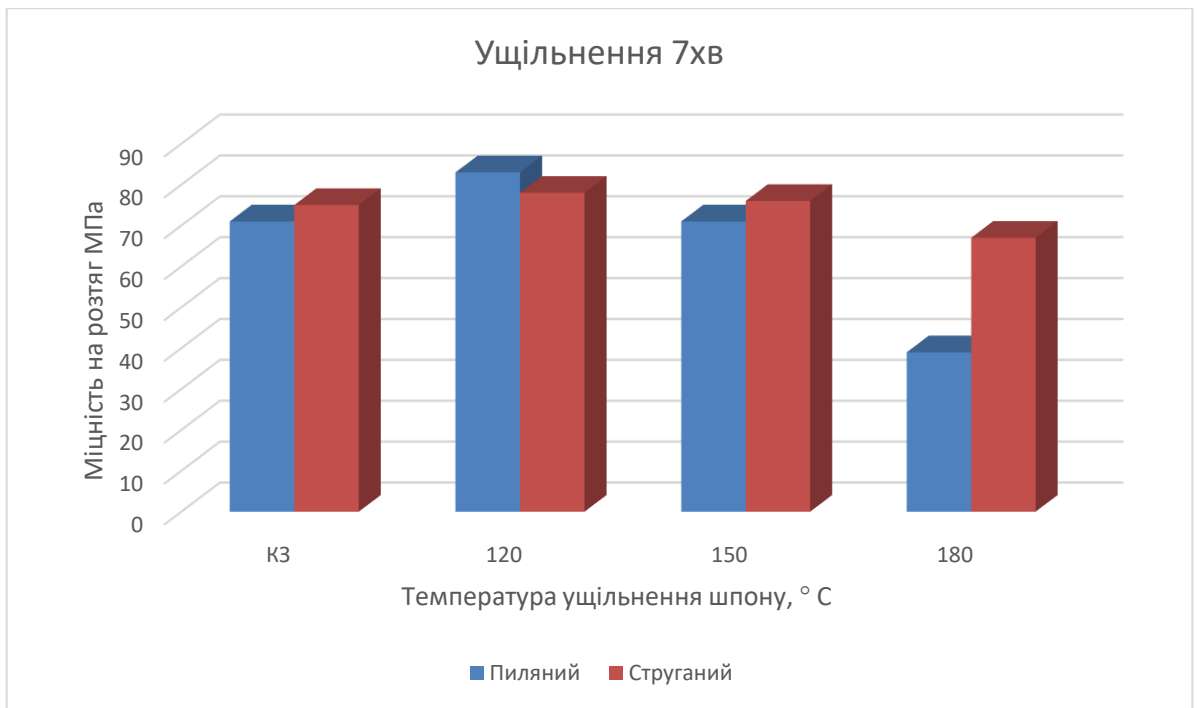


Рис. 3.3.5 Залежність величини межі міцності на розтяг вздовж волокон від температури та при сталому часі ущільнення шпону

Результати експериментальних досліджень показали, що термічне ущільнення позитивно впливає на межу міцності струганого та пиляного дубового шпону на розтяг уздовж волокон. Підвищення міцності зумовлене зростанням щільності матеріалу та покращенням міжволоконної взаємодії внаслідок ущільнення клітинної структури.

Встановлено, що струганий шпон після термічного ущільнення характеризується вищими показниками міцності порівняно з пиляним, що пов'язано з більш однорідною структурою та меншою кількістю початкових дефектів. Отримані результати підтверджують доцільність застосування термічного ущільнення для підвищення механічної надійності дубового шпону при його подальшому використанні у клеєних та облицювальних виробках..

## Висновки

У магістерській роботі виконано експериментальне дослідження впливу термічного ущільнення на властивості струганого та пиляного дубового шпону. Актуальність обраної теми зумовлена зростаючими вимогами до якості деревинних матеріалів, необхідністю раціонального використання цінної деревинної сировини та впровадження екологічно безпечних технологій її модифікації у деревообробній і меблевій промисловості.

У результаті аналізу науково-технічної літератури встановлено, що шпон є високотехнологічним напівфабрикатом, властивості якого значною мірою залежать від способу одержання, породи деревини та режимів подальшої обробки. Показано, що термічне ущільнення належить до перспективних методів фізичної модифікації деревини, оскільки дозволяє суттєво підвищити її щільність, міцність і стабільність розмірів без застосування хімічних реагентів. Встановлено, що для дубової деревини, яка характеризується кільцепористою структурою та високою анізотропністю властивостей, процес ущільнення є особливо ефективним, оскільки сприяє зменшенню пористості та вирівнюванню внутрішньої структури матеріалу.

У роботі детально проаналізовано фізико-хімічні та структурні процеси, що відбуваються у деревині під час термічного ущільнення. Доведено, що під впливом температури та тиску відбувається термопластична деформація клітинних стінок, частковий гідроліз геміцелюлоз і конденсація лігніну, що зумовлює зменшення гігроскопічності, підвищення твердості та стабільності отриманого матеріалу. Встановлено, що надмірні температури та тиск можуть призводити до деструкції полімерних компонентів деревини і зниження механічних характеристик, що обґрунтовує необхідність оптимізації режимів ущільнення.

У ході експериментальних досліджень встановлено закономірності впливу параметрів термічного ущільнення на величину спресування, щільність і

міцність струганого та пиляного дубового шпону. Показано, що зі збільшенням температури і тривалості ступінь спресування шпону зростає, що супроводжується істотним підвищенням його щільності. При цьому струганий шпон характеризується більш рівномірним ущільненням по товщині, тоді як у пиляного шпону спостерігається дещо більша неоднорідність, зумовлена особливостями початкової структури та орієнтації волокон.

Експериментально доведено, що термічне ущільнення позитивно впливає на механічні властивості дубового шпону. Межа міцності на розтяг уздовж волокон після ущільнення зростає, що пов'язано зі збільшенням щільності та покращенням міжволоконної взаємодії. При цьому оптимальні режими оброблення забезпечують підвищення міцності без суттєвого погіршення еластичності матеріалу. Встановлено, що струганий шпон після ущільнення має дещо вищі показники міцності порівняно з пиляним, що робить його більш придатним для використання як облицювального матеріалу.

Отримані результати свідчать, що термічне ущільнення є ефективним способом покращення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей дубового шпону. Застосування оптимальних режимів температури та тривалості оброблення дозволяє отримати матеріал з підвищеною щільністю, міцністю, зносостійкістю та стабільністю розмірів, що особливо важливо для меблевого виробництва, виготовлення декоративних панелей і фанери.

Практичне значення роботи полягає в можливості використання отриманих результатів для вдосконалення технологій виробництва шпону та облицювальних матеріалів на підприємствах деревообробної промисловості. Запропоновані рекомендації щодо режимів термічного ущільнення можуть бути впроваджені у промислові умови з метою підвищення якості продукції, розширення сфери застосування дубового шпону та підвищення конкурентоспроможності вітчизняних виробів на внутрішньому і зовнішньому ринках.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бехта П.А. «Технологія деревинних композитних матеріалів», 2003.
2. Методичні вказівки: застосування методів статистичного аналізу в деревообробленні. Частина 1. – Львів: УкрДЛТУ, каф. ТВД, 2004.
3. Вінтонів І.С. Деревинознавство: навч. посіб. / І.С. Вінтонів, І.М. Сопушинський, А. Тайшінгер. – [2-е вид.]. – Львів: Априорі, 2007. – 312 с.
4. Вологість деревини і властивості, пов'язані з її зміною [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://bibliograph.com.ua/materialovedenie/7.htm>
5. Вплив технологічних параметрів на процес ущільнення деревини [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/8508/2/Conf\\_2014\\_Minitsky\\_A\\_V-The\\_influence\\_of\\_technological\\_61-62.pdf](http://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/8508/2/Conf_2014_Minitsky_A_V-The_influence_of_technological_61-62.pdf)
6. Стандарт 16483.7-71. Деревина . Метод визначення вологості
7. Стандарт 16483.1-84. Деревина . Метод визначення щільності
8. Стандарт 16483.0-89. Деревина. Загальні вимоги до фізико-механічних випробувань : введ 01. 07. 90.
9. Стандарт 20800-75. Шпон струганий. Методи випробувань: введ. 30.06.76.
10. Стандарт 99-96. Шпон струганий. Технічні умови.
11. Гупало О.П., Тушницький О.П. Хімія деревини: Підручник — 2-ге вид., випр. і доп. — К.: Знання, 2008. — 276 с.
12. Дерево/Деревні матеріали [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://uk.wikibooks.org/wiki/Дерево/Деревні\\_матеріали](https://uk.wikibooks.org/wiki/Дерево/Деревні_матеріали)
13. Колір, блиск і текстура деревини [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://moyaosvita.com.ua/fizuka/kolir-blisk-i-tekstura-derevini/>
14. Манзій С.О., Панов В.В., Орловський Ю.І. Модифікування деревини: Навчальний посібник для ВНЗ. - Львів: ІЗМН, 2002. - 106 с.
15. Манзій С.О., Панов В.В., Шепелюк О.О., Кузьмин О.М., Козак Р.О., Копанський М.М. Контроль процесу виготовлення шпону і оцінка якості

готової продукції. Методичні вказівки до лабораторних робіт. – Львів, НЛТУ України, 2008 р. - 60с.

16. Методичні вказівки: застосування методів статистичного аналізу в деревообробленні. Частина 1. – Львів: УкрДЛТУ, каф. ТВД, 2004. – 32с.

17. Пінчевська О. О. Деякі фізико-механічні властивості термомодифікованої деревини / О. О. Пінчевська, В. М. Головач, О. Ю. Горбачова // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. - 2014. - Вип. 147. - С. 3-9. [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg\\_2014\\_147\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2014_147_3).

18. Пилипчук М. І., Григор'єв А. С, Шостак В. В. Основи наукових досліджень: Підручник. - К.: Знання, 2007. - 270 с.

19. Питома вага | Щільність деревини [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://tehnopost.kiev.ua/drova/10-schlnt-derevini-pitoma-vaga.html>

20. Пресована деревина. Технологія та властивості [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://c-a-m.narod.ru/material/presswood.htm>

21. Уголев Б.Н. Деревинознавство з основами лісового товарознавства: Підручник для ВНЗ. – 2-ге вид., М.: Лісова промисловість. – 1986.

22. Хухрянский П.Н. Пресування деревини. М.: Лісова промисловість 1964.