

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Навчально-науковий інститут деревообробних технологій і дизайну

Кафедра технологій деревинних композиційних матеріалів,
целюлози та паперу

Пояснювальна записка
до дипломної роботи магістра на тему:
Аналіз способів термічної обробки
деревини

Виконав: студент групи ТДКМ-61м
_____ Сень О.Я.
(підпис)

Керівник: к.т.н., доцент ТДКМ
_____ Ортинська Г.Є
(підпис)

Рецензент: _____
(посада, вчене звання, науковий ступінь)

(підпис) (прізвище та ініціали)

Львів – 2024

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. Бехта П.А. _____
 “ _____ ” _____ 2024 року

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

Сень Олександр Ярославович _____

1. Тема роботи Аналіз способів термічної обробки деревини _____
 керівник роботи к.т.н., доцент ТДКМ Ортинська Галина Євгенівна. _____
 затверджені наказом університету від “ 31 ” серпня 2023 року № С-403А _____
2. Термін подання студентом роботи 20.01.2024 р. _____
3. Вихідні дані до роботи Розглянути макро-, мікроструктуру деревини та хімічну будову. Проаналізувати способи комерційної термічної обробки деревини. Описати їхній вплив на фізико-механічні властивості деревини _____
4. Зміст пояснювальної записки (розділи, які потрібно розробити)
 1. Стан питання та завдання дослідження _____
 2. Комерційні способи термічної обробки деревини _____
 3. Вплив методів термічної обробки деревини на її властивості _____
 4. Висновки та рекомендації _____
5. Дата видачі завдання 10.08.2023 р. _____

Студент _____ Сень О.Я. _____
 (підпис)

Керівник роботи _____ Ортинська Г.Є. _____
 (підпис)

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП..... | 4 |
| РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ..... | 6 |
| 1.1. Стан та перспективи розвитку виробництва термодеревини..... | 6 |
| 1.2. Макро- та мікроскопічна будова деревини..... | 9 |
| 1.3 Хімічний склад деревини | 13 |
| 1.4. Теплофізичні властивості деревини..... | 17 |
| 1.5. Висновки та завдання дослідження..... | 19 |
| РОЗДІЛ 2. КОМЕРЦІЙНІ СПОСОБИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕРЕВИНИ..... | 21 |
| 2.1. Особливості технології ThermoWood®..... | 21 |
| 2.2. Особливості технології Plato | 25 |
| 2.3. Ректифікування деревини..... | 26 |
| 2.4. Термічна обробка деревини оліями (ОНТ- Process)..... | 28 |
| 2.5. Висновки | 31 |
| РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ МЕТОДІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕРЕВИНИ НА ЇЇ ВЛАСТИВОСТІ | 34 |
| 3.1. Зміна хімічної будови деревини | 34 |
| 3.2. Вплив термообробки на властивості деревини | 36 |
| ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ..... | 46 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ | 48 |
| ДОДАТКИ..... | 52 |

ВСТУП

У сучасному світі значно зросло використання термічно модифікованої деревини впродовж останніх 20 років. Продукція та її виробництво, зокрема, технології розроблялися виробниками протягом десятиліть. Заборона використання хімічних способів модифікування деревини, яка була введена в країнах Європейського Союзу та в США, призвела до розвитку та впровадження більш екологічно чистих методів захисту, таких як термічна обробка. Вона є ефективним рішенням для збереження якості деревини та забезпечення її стійкості до руйнування під час зберігання та використання.

Дослідження, які проводилися різними науковцями на початку ХХ століття з питань, пов'язаних із сушінням при високих температурах, послужили основою для розробки технологій, які зараз застосовуються в термообробці деревини. Спостерігалось покращення гігроскопічних властивостей м'якої деревини та отримання продуктів, які можуть використовуватися зовні, протистоячи умовам навколишнього середовища, наприклад меблі, терасні дошки.

Існують різні технології обробки деревини, які відрізняються середовищем, температурою, тиском та часом обробки. Як середовище для запобігання горінню можна використовувати газоподібний азот, пару або олію. Залежно від тиску, ці технології можуть виконуватися при атмосферному тиску, надлишковому тиску або вакуумі. Всі технології включають різні умови для запобігання горінню матеріалу.

Ці нові підходи можуть забезпечити деревині покращену стійкість та довговічність, що робить її більш конкурентоспроможною у порівнянні з металами та синтетичними матеріалами в різних сферах застосування.

Вироби з термічно модифікованої деревини – це натуральні вироби з деревини, які не містять хімічних речовин і виготовлені із сертифікованої сировини. Вони мають тривалий життєвий цикл і можуть згодом легко перероблятися.

Проте, важливо враховувати, що довготривала дія високих температур під час термічної обробки може призвести до зменшення міцності деревини. Цей аспект є важливим при подальшому використанні таких термомодифікованих матеріалів. Деякі параметри міцності та деформації можуть бути змінені, тому важливо враховувати ці показники при проектуванні та використанні такої деревини у конструкціях або виробництві меблів.

Загалом, термічна обробка деревини має як позитивні, так і негативні аспекти, тому важливо уважно розглядати всі її характеристики та особливості перед використанням у різних сферах.

Метою роботи було проаналізувати способи термічної обробки деревини.

Відповідно, до поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

- розглянути перспективи розвитку;
- проаналізувати сучасні технології виготовлення термодеревини;
- розглянути вплив термічної обробки на властивості деревини.

Об'єктом дослідження є процес термообробки деревини.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Стан та перспективи розвитку виробництва термодеревини

В даний час захисту деревини приділяється увага, особливо на заміні небезпечних традиційних методів захисту екологічно чистими методами модифікування деревини (застосування безпечних хімічних реагентів, високої температури, ензимів, наночастинок).

Термічне модифікування є одним із безпечних для навколишнього середовища методів захисту деревини, оскільки модифікована деревина не містить хімічних чи шкідливих речовин, і попит споживачів на термічно модифіковану деревину зростає з кожним днем. Деревинні полімери модифікуються або реорганізуються під час впливу високих температур у діапазоні від 160 до 230°C впродовж різних періодів впливу у середовищі інертного газу [1]. Основними перевагами термічного модифікування є підвищена гідрофобність, покращена стабільність розмірів, знижений рівноважний вміст вологи, однорідне забарвлення, краща стійкість до мікроорганізмів та атмосферних впливів [1, 2, 3]. Таким чином, термічне модифікування спрямоване на підвищення терміну служби деревини в зовнішніх умовах [4]. Однак основними недоліками методу є втрата механічної міцності, крихкість і розтріскування [2, 4]. Термомодифікована деревина, яка зазвичай вважається екологічною альтернативою тропічним твердим породам деревини та деревині, обробленій тиском, використовується як для внутрішніх, так і для зовнішніх робіт, наприклад для настилів, сайдингу, підлоги, садових меблів, настінних і стельових панелей у саунах тощо.

Термічно модифікована деревина – це деревина, яка була модифікована шляхом контрольованого процесу піролізу деревини, нагрітої (> 180 °C) за відсутності кисню, викликаючи деякі хімічні зміни в хімічних структурах компонентів клітинної стінки (лігніну, целюлози та геміцелюлози) у деревині для підвищення її довговічності.

Цей відновлений інтерес, особливо в Європі, був викликаний проблемами навколишнього середовища та запровадженням законодавства, такого як Європейська директива про біоциди. У відповідь на це були комерційні процеси, розроблені у Франції (ректифікація), Фінляндії (Thermowood), Німеччині (Menz Holz) і Нідерландах (Plato Wood) [5, 6]. У двадцять першому столітті ТМТ знаходить все більше застосування в екстер'єрі. облицювання, настилу та столярних виробів і є добре запровадженою комерційною технологією.

На сьогоднішній день термодеревину виробляють в різноманітних країнах Міжнародна асоціація ThermoWood була заснована в 2000 році. Сьогодні налічує шістнадцять членів з восьми країн. Використання ThermoWood постійно зростає, і метою асоціації є вдосконалення продукції ThermoWood®. Так, кількість виробництва термодеревини постійно зростає рис.1.1.

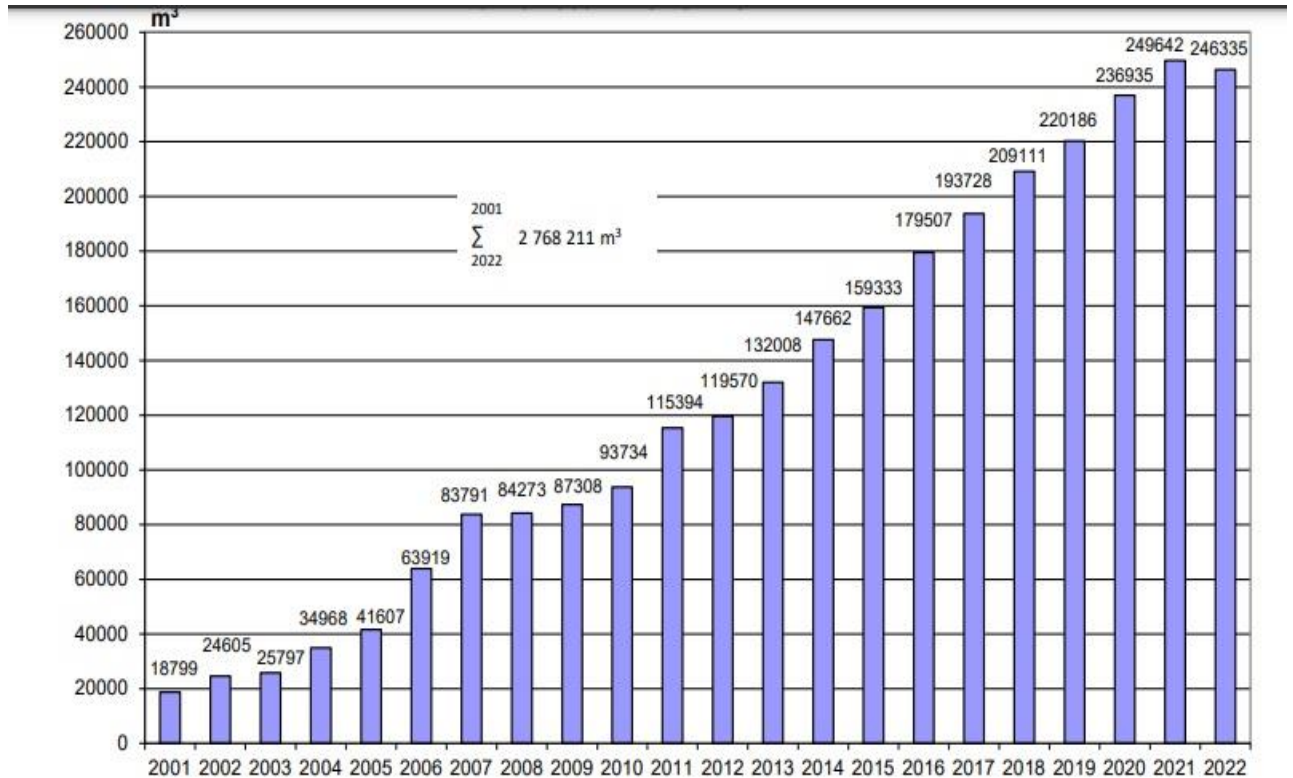


Рисунок 1.1. Виробництво термодеревини [9]

Сучасна промислова термообробка деревини базується на таких основних принципах, зокрема, перетворення доступних дешевих порід деревини в якісно новий матеріал, що розширює їх область застосування та підвищує цінову конкурентноздатність (рис.1.2).

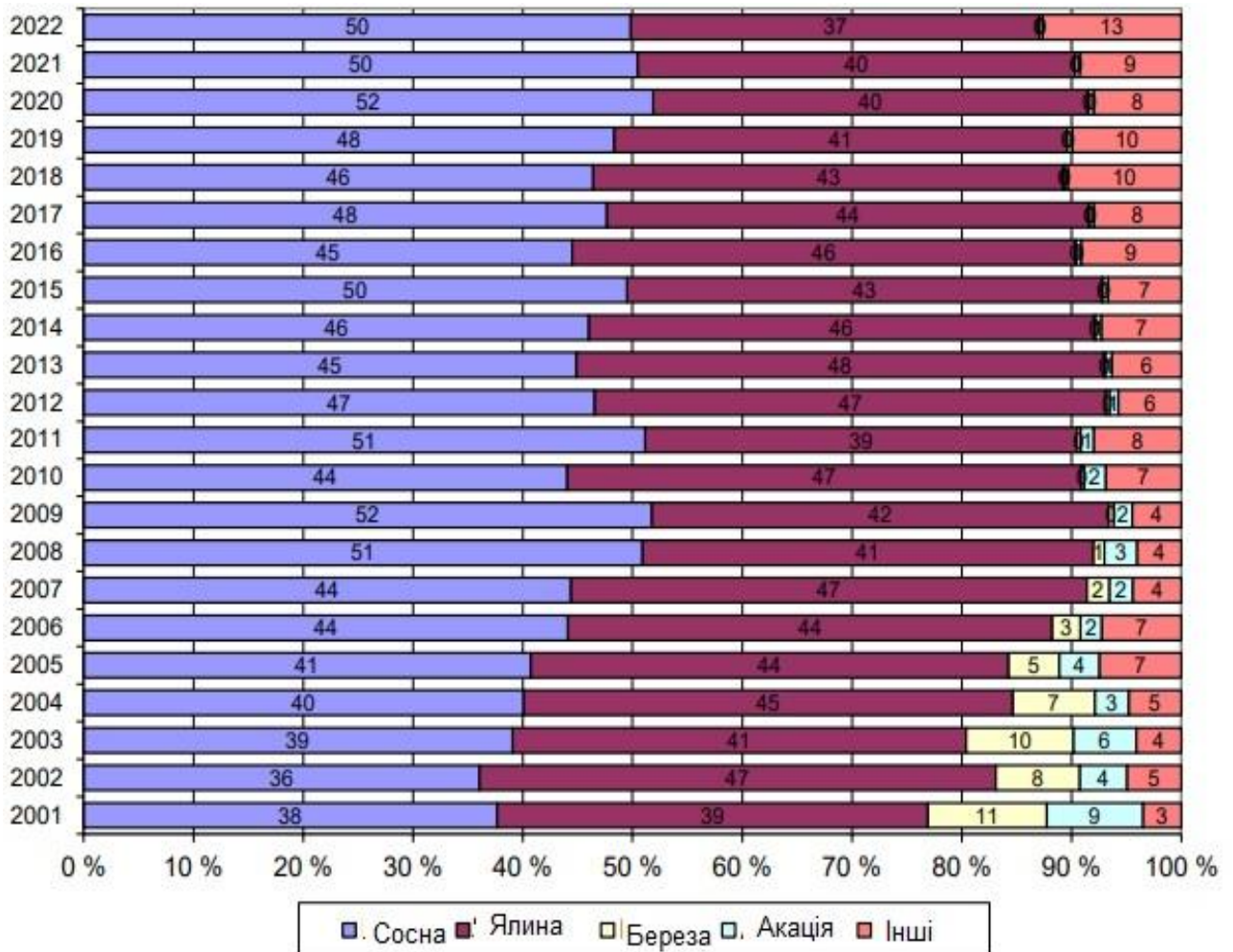


Рисунок 1.2. Найбільш поширені породи деревини, що застосовуються для виготовлення термодеревини [9, 10]

Інноваційний екологічно чистий спосіб захисту деревини як альтернатива хімічному, а також інновація у виробництві кінцевого продукту, яка проявляється в нових дизайнерських та інженерних рішеннях, виходячи з специфічних властивостей матеріалу.

Отже, термомодифікована деревина – це інноваційний та новий матеріал на ринку. У недавньому минулому матеріал був доступний лише

на європейському ринку, але із часом все більше виробників з'являється в Україні.

1.2. Макро- та мікроскопічна будова деревини

Макроструктура деревини, яку можна роздивитися неозброєним оком або через лупу, представляє собою будову деревини. Цю макроструктуру можна добре розглянути на розрізах стовбура дерева.

Стовбур є основною та найбільш цінною частиною дерева, з якої отримують від 60 до 90% деревини. Тонка верхня частина стовбура відома як вершина, а нижня, більш товста - комель. Місце, де робиться розріз стовбура перпендикулярно його осі, називається торцем [11].

Залежно від напрямку відносно осі стовбура будова деревини на різних розрізах має різний вигляд, а також різні властивості. Саме тому важливо вивчати макроструктуру деревини у таких трьох основних розрізах стовбура

Торцевий - поперечний розріз, який проходить перпендикулярно до осі стовбура.

Радіальний - поздовжній розріз, який проходить через серцевину стовбура. тангенціальному - поздовжньому, що проходить уздовж стовбура на тій чи іншій відстані від серцевини.

Для вивчення макроструктури дерева особливий інтерес представляє поперечний розріз стовбура (рис. 1.3). На ньому розрізняють серцевину, деревину, кору, камбій, річні шари, серцевинні промені.

Серцевина дерева складається з порівняно великих тонкостінних запасуючих клітин, які утворюються протягом перших років росту дерева. Вона має пухку структуру, легко викришується і є найбільш схильною до загнивання. Діаметр серцевини у хвойних порід зазвичай становить 2-3 мм, у листяних - 3-5 мм.

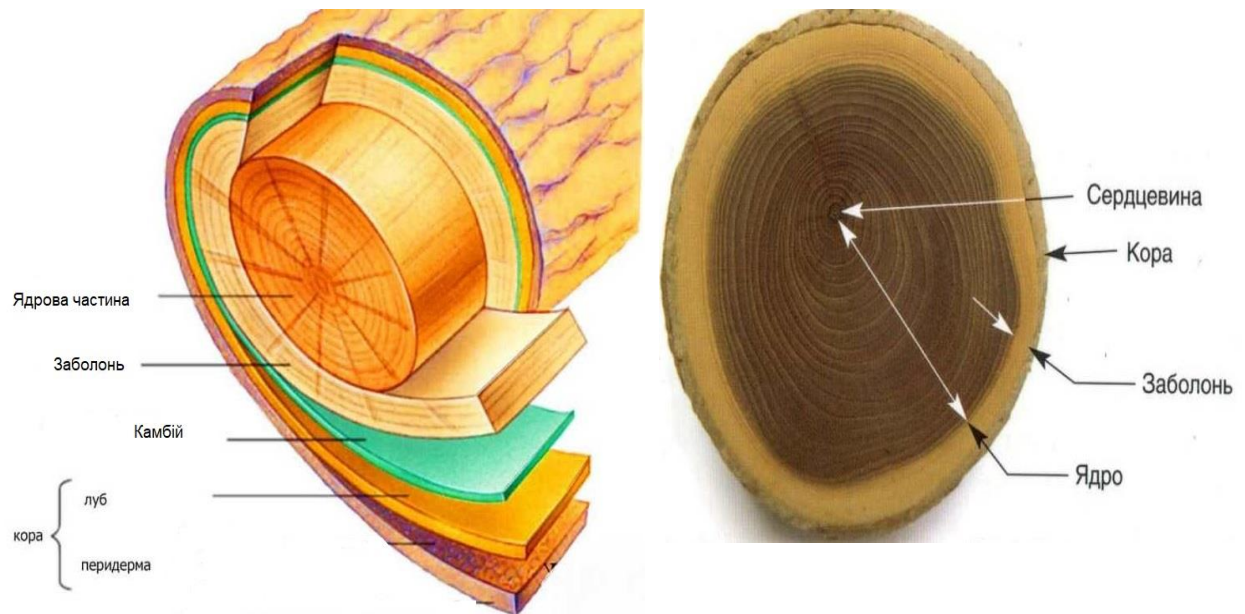


Рис. 1.3. Загальний вигляд поперечного розрізу стовбура [12]

Протягом життя дерево щороку наростає у напрямку від серцевини до кори, формуючи концентричні кільця або шари. Деякі породи мають деревину, що знаходиться ближче до серцевини, темнішою та меншою за вологою. Цю темнішу деревину зазвичай називають ядром, а породу, в якій вона знаходиться, - ядрою. Частина деревини від ядра до кори отримала назву заболонню. Ядро містить найбільш щільну і тверду деревину. Породи, у яких колір деревини від серцевини до кори однаковий, називаються без'ядровими.

Заболонь є менш щільною, і багато її клітин містять залишки протоплазми. У заболоні відбувається висхідний рух соку. Вона збільшується завдяки щорічному наростанню шарів нової деревини під корою. Поступово, внаслідок відмирання живих клітин у найглибших річних шарах заболоні, збільшується і ядро. Розміри ядра і заболоні також залежать від породи дерева, його віку та умов зростання [11, 12].

Будова деревини у без'ядрових порід є неоднаковою, тому вони поділяються на заболонні та спілодеревинні.

У заболонних порід будова деревини у всій товщі стовбура є однорідною і подібною до будови заболоні. Висхідний рух соку

відбувається по всій товщині стовбура. Колір деревини та вміст води у всьому перерізі є однаковим (наприклад, у берези, граба, вільхи, клена та інших).

Так, у деяких без'ядрових порід, особливо у бука, клена, берези, вільхи, осики, спостерігається темніше центральне ядро у центральній частині стовбура, що може створювати враження наявності ядра в цих порід. Це явище відоме як "несправжнє ядро".

Кора дерева складається з двох шарів: зовнішнього коркового та внутрішнього лубу. Корковий шар захищає дерево від холоду, спеки та механічних ушкоджень, тоді як луб участь бере у низхідному русі соку.

Так, ширина річних приростів або річних шарів деревини має велике значення для її властивостей та якості. У хвойних порід, чим вузчі річні шари, тим більше смоли і міцніше виходить деревина.

Навпаки, у листяних порід, де ранні частини річних шарів складаються з 2-3 кільцевих рядів великих судин, ширші річні шари ведуть до щільнішої, міцнішої і твердішої деревини.

Проте, для деяких листяних порід, у яких річні шари не виділяються чітко, таких як береза, клен, липа, вільха, граб, бук, осика, ширина річних шарів майже не впливає на якість деревини.

Серцевинні промені є складовою будь-якої породи дерева. Вони складаються з кількох рядів запасних клітин, розташованих у радіальному напрямку. Ці промені можуть бути первинними або вторинними, починаючи від середини стовбура і простягаючись до кори. Вони відіграють важливу роль у перенесенні повітря, води та поживних речовин у горизонтальному напрямку. Розміри серцевинних променів різняться у різних порід дерева: від 0,2 до 50 мм по висоті і від 0,005 до 0,6 мм по ширині. Ці промені можуть бути широкими (у бука, дуба), вузькими (у в'яза, клена) і дуже вузькими (у осики, берези) [11, 12, 13]. Серцевинні промені, якщо вони великі, можуть бути добре помітні на всіх розрізах дерева. На торцевому розрізі вони зазвичай виглядають як блискучі смуги, на

радіальному - як смуги і плями, тоді як на тангенціальному розрізі вони можуть мати вигляд штрихів і крапок. Це залежить від способу, яким промені перерізані під час розрізання деревини. Якщо промені великі та розташовані певним кутом щодо різання, вони можуть бути видимі у вигляді зазначених патернів на різних розрізах. Це допомагає визначити наявність та розподіл серцевинних променів в структурі деревини.

Мікропорожнини – це порожнини деревних клітин і стінок клітин, а також міжклітинних порожнин. Клітини, що зрослися між собою, сполучені системою пор. Форма клітин різноманітна, звичайно вони витягнуті в напрямку росту дерева.

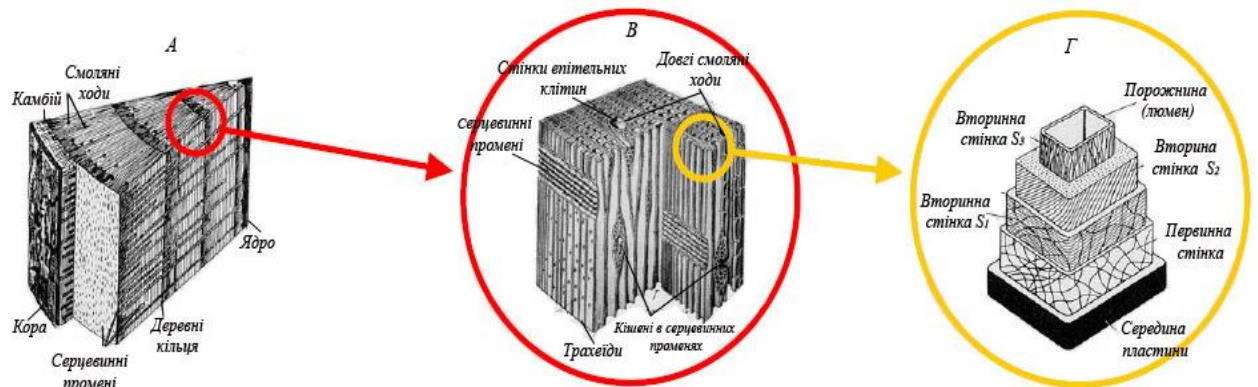


Рисунок 1.4. Загальний вигляд макро- і мікро- структури деревини

Деревина містить різні види клітин, такі як паренхімні (живі) та прозенхімні клітини, які різняться за формою та функціями. Провідні клітини, такі як судини та трахеїди, відповідають за перенесення води та поживних речовин, тоді як запасуючі клітини мають велику порожнину для зберігання поживних речовин. Опорні клітини, або трахеїди, відіграють механічну роль і є найстійкішими до руйнування.

У деревині хвойних порід зустрічаються ходи, призначені для нагромадження смолистих речовин, що підвищують стійкість і довговічність деревини.

Під корою (лубом) і над деревиною знаходиться тонкий шар живих клітин, відомий як камбій. Камбій формує нові клітини протягом усього періоду росту дерева, що призводить до збільшення товщини стовбура і гілок. Кожен рік камбій утворює новий шар деревини, який видно у вигляді концентричних колець або річних шарів. Ці річні шари є результатом активності камбію і дозволяють візуально відокремити річні прирости. Такі шари добре помітні у багатьох порід дерев, особливо у хвойних порід [14].

Отже, застосування різноманітних порід, а також способу розкрою буде впливати на текстурні властивості виробів. В якості сировини слід використовувати добірні пиломатеріали. Якість сировини контролюється протягом усього виробничого процесу. В принципі, для термомодифікування можна використовувати для різні породи деревини (ялина, сосна, береза, осика, ясен), але властивості сировини сильно впливають на кінцевий результат. Зважаючи на особливості будови деревини кожної породи, розроблено окрему технологічну інструкцію, відповідно до якої проводиться термічне модифікування.

1.3. Хімічний склад деревини

Деревина є складним органічним матеріалом, склад якого формують живі та відмерлі клітини, що мають різні форми та функції. І основними її хімічними елементами є карбон – 50%, кисень – 44% та водень – 6%. Ці елементи входять до матеріальної структури, що створюється за рахунок взаємодії целюлози (основного компонента деревини) та лігніну (важливої складової, що надає міцності та стійкості) з додатками екстрактивних та інших речовин. Екстрактивні речовини надають їй колір, запах, смак і збільшують її стійкість проти гниття та грибків. Крім того, деревина містить суберин, який надає додаткову гідроізоляцію та захист від агресивних середовищ [11, 13].

Стінки клітини складені з органічних сполук, які у хвойних порід на

70%, а у листяних на 80% представлені вуглеводнями. Прикладом простих вуглеводнів є глюкоза. Молекули глюкози під впливом ферментів здатні об'єднуватися в більш складні сполуки: крохмаль та целюлозу. Більша частина вуглеводневої складової – це целюлоза та геміцелюлоза. Вони можуть бути видалені з деревини у вигляді волокнистого матеріалу шляхом обробки окислювачами (кислотами) [11, 15, 16].

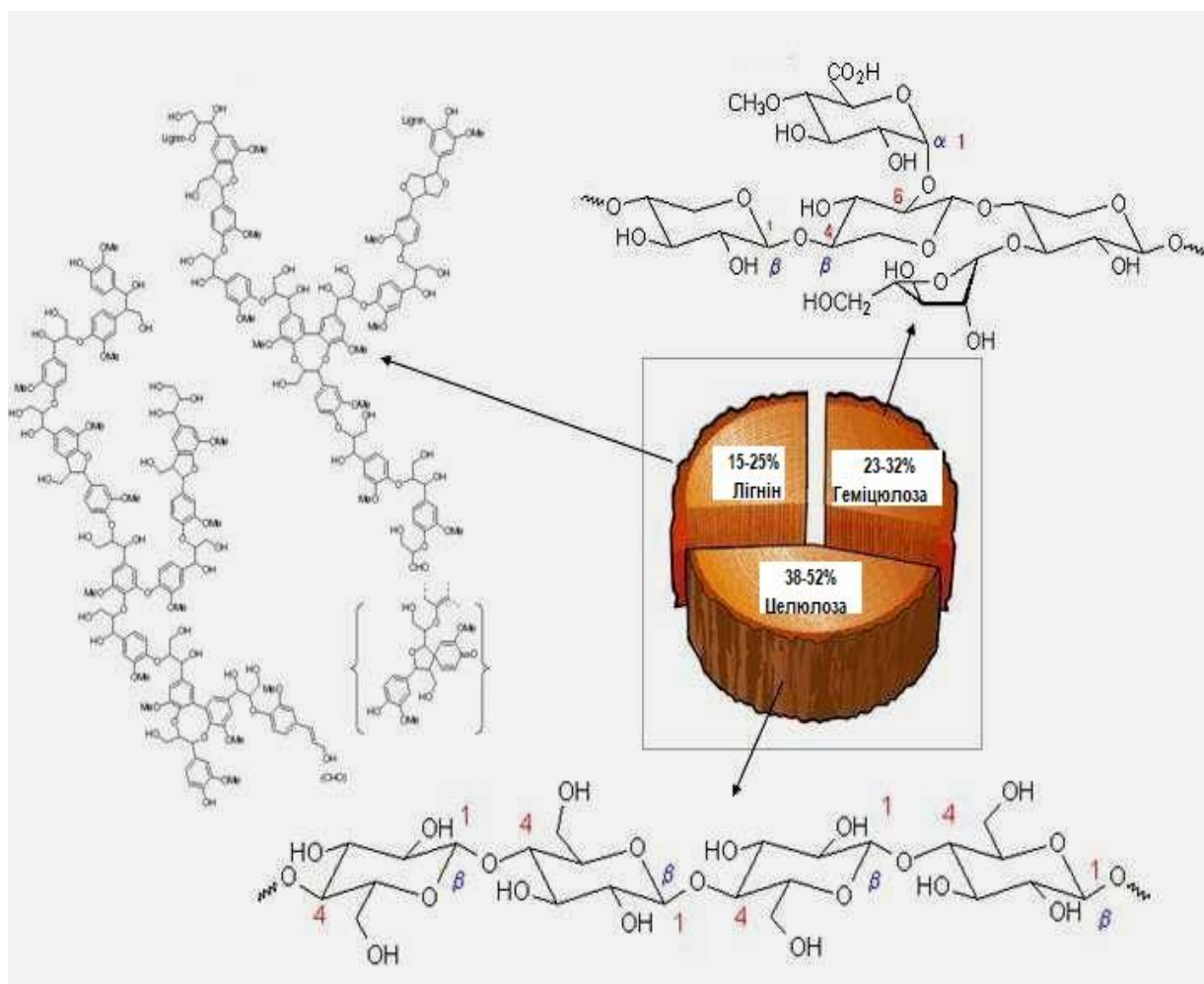


Рисунок 1.5. Хімічний склад деревини [16]

Із рис 1.5 видно, що до 30% деревини складають речовини ароматичної природи, відомі як лігнін. Вуглеводні та лігнін – високомолекулярні сполуки, полімери з усіма притаманними їм характеристиками. Незначна частка в складі деревини припадає на екстрактивні речовини, що відносяться до низькомолекулярних сполук (смоли, смоляні кислоти, ефірні

масла, барвники тощо). Вони просочують стінки клітин та накопичуються у порожнинах міжклітинного простору, при цьому вони надають деревині колір, запах, смак, підвищують стійкість проти гниття та ураження грибами.

Целюлоза — це лінійний гетероланцюговий полімер, що має велику кількість гідроксильних груп, здатних до утворення водневого зв'язку. Цей тип хімічного зв'язку надає підвищеної жорсткості полімеру. Целюлоза, як основна речовина деревини, ступінь полімеризації якої досягає 300...600, утворює шарувату клітинну оболонку (стінку), здатну при механічній обробці розпадатися на тонкі волокна – фібрили, а при хімічній – мікрофібрили. Фібрили та мікрофібрили складаються з молекулярних кристалічних фаз, тобто регулярно розташованих молекул, але інколи ці зони перемішуються з аморфними, де має місце хаотичне розташування макромолекул та утворення геміцелюлози, ступінь полімеризації якої досить низький і становить 100...200.

Деревинні целюлозні волокна мають спіральну структуру і містять 55...65% кристалічної та 25...35% аморфної (геміцелюлозної) фаз, причому хвойні породи відрізняються меншим вмістом аморфної частини, а листяні – більшим.

Лігнін - природний полімер сітчастої структури, другий за вмістом структуротвірний компонент деревини, кількість якого у складі хвойних порід досягає 28...30%, а листяних – 18...24%. Лігнін це аморфна речовина, що відрізняється більшою реакційною здатністю та меншою хімічною стійкістю порівняно з целюлозою. Целюлоза та лігнін здатні до хімічної взаємодії між собою з утворенням лігнокарбонових (лігновуглецевих) комплексів, але деяка частина лігніну знаходиться у деревині у вільному стані. Структура деревини утворюється за рахунок складної взаємодії целюлози (армуючого компонента) та лігніну (матриці). Волокна целюлози мають високу міцність на розтяг, але легко згинаються, а лігнін як зв'язуюча речовина поєднує їх в одне ціле за допомогою різних видів хімічного зв'язку та когезії.

Головний ланцюг *геміцелюлози*, також відомий як поліоза, найчастіше складається з будь-якого з них глюкоза і маноза (глюкоманнани) або ксилоза (ксилани). Зазвичай складають геміцелюлози від 20 до 35% маси сухої деревини (Rowell 2013). Має сильно розгалужену структуру бічні ланцюги кількох різних цукрових одиниць, таких як група гексози; глюкоза, маноза і галактоза. Інша група цукрових одиниць називається пентозою і складається з ксилози та арабінози.

Бічні гілки створюють аморфну структуру, а також забезпечують високу доступність гідроксильні групи. Це пояснює, чому більша частина вологи в деревині зв'язана з геміцелюлозою. Листяна деревина містить більше геміцелюлози, ніж хвойна деревина.

Таким чином, деревина – це природний органічний композиційний матеріал із конгломератним типом структури, в якому матриця представлена просторовою сіткою з лігніну, а армуючий компонент (наповнювач) – волокнами у вигляді целюлози. Характер структури деревини, в тому числі його кори, визначає експлуатаційні властивості отриманих виробів. Наприклад, кора пробкового дуба подібна стільникам, що містять маленькі комірки 14...16-гранної форми, стінки яких багат шарові і складаються з лігніну та целюлози. Пробка містить суберин – нерозчинний у воді та спирті сік клітини, який є сумішшю жиру, кислот та важких органічних спиртів. Ця речовина надає пробці непроникності для газів та рідин, а також робить її інертною до дії агресивних середовищ. Зазначені структура та склад кори пробкового дуба визначають її низьку тепло– та звукопроникність, еластичність, легкість, гідроізолюючі та антиконденсаційні властивості. Вона є антистатиком та гіпоалергентом.

Виходячи з вмісту різних речовин, можна зрозуміти, що деревина хвойних порід, завдяки великому вмісту лігніну та смолистих речовин, виявляє більшу стійкість до зовнішніх факторів, таких як гниль чи ураження грибами, порівняно з деревиною листяних порід, яка містить більше целюлози та геміцелюлози. Це дозволяє використовувати деревину хвойних

порід для різних цілей, зокрема для термообробки деревини.

1.4.Теплофізичні властивості деревини

В процесі термообробки відбувається ряд теплофізичних процесів. Оскільки деревина являє собою складний матеріал, що має складну макро-, мікро- та хімічну будову, тому важливо розглянути основні теплофізичні властивості.

Визначення теплових властивостей деревини (теплоємність, теплопровідність, температуропровідність) має велике значення для процесів теплообміну під час термообробки [5, 6].

Одним із основних показників є теплоємність деревини, що відображає властивості матеріалу акумулювати тепло. Характеризується вона показником питомої теплоємності або коефіцієнтом теплоємності.

Питома теплоємність залежить від температури і вологості деревини. Теплоємність абсолютно сухої деревини практично рівна теплоємності деревинної речовини (вміст повітря в деревині дуже малий) і за загальними даними складає для всіх порід $1,55 \text{ кДж/кг}\cdot^\circ\text{C}$, із збільшенням температури деревини її теплоємність також збільшується [14].

Набагато складніший вплив чинить вологість на даний показник. Це пов'язано із значно вищим показником теплоємності води ($4,19 \text{ кДж/кг}\cdot^\circ\text{C}$, при $t=20^\circ\text{C}$, порівняно з деревиною [6, 11].

Волога деревина може бути представлена (з врахуванням того, що вміст повітря незначний) двофазною системою, яка складається із деревинної речовини і води. Її теплоємність може бути визначена з використанням закону адитивності, як середньозважена сума теплоємностей її компонентів. Закон адитивності справедливий тоді, коли компоненти системи не вступають між собою в хімічну і фізичну взаємодію. Тому, за низької вологості деревини, коли в ній міститься тільки адсорбційна волога, визначити теплоємність деревини, використовуючи закон адитивності не

можна. А теплоємність вологої деревини можна розглядати як середньозважену між теплоємністю сухої деревини і теплоємністю води.

Теплопровідність матеріалу виражає його здатність проводити теплоту через свою масу та характеризується коефіцієнтом теплопровідності [6].

Коефіцієнт теплопровідності для деревини є умовним, тому що передавання теплової енергії відбувається в ній трьома способами – теплопровідністю, конвекцією, випромінюванням. Волога деревина являє собою складну трифазну систему: тверда фаза – деревинна речовина, рідка – вільна і зв'язана волога і газоподібна – повітря і водяна пара. Теплопровідність кожного із компонентів різна.

Розглянемо фактори, які впливають на теплопровідність деревини. Одним з найважливіших факторів, що впливає на теплопровідність матеріалу (деревини) є його вологість [12, 14,]. Це зв'язано з тим, що вода має приблизно в 23 рази більшу теплопровідність, ніж повітря. Тому під час зволоження деревини, а відповідно, заміні повітря, яке в ній знаходиться, на воду, теплопровідність деревини значно збільшується.

Інший фактор, який впливає на теплопровідність деревини – температура. Із підвищенням температури збільшується теплопровідність деревини. Така залежність характерна для теплоізоляційних матеріалів і зв'язана із збільшенням частини теплопередачі способом випромінювання. Найбільший вплив на теплопровідність дає взаємодія температури та вологості [17, 18].

Порода деревини також впливає на коефіцієнт теплопровідності. Мається на увазі, вплив таких факторів, як щільність деревини, особливості її анатомічної будови: розміри і об'єм серцевинних променів, пор, вміст пізньої деревини.

Щільність деревини, характеризується її пористістю, та суттєво впливає на теплопровідність деревини. Це пояснюється тим, що із збільшенням щільності збільшується питома вага деревинної речовини в одиниці об'єму деревини, а її теплопровідність є в 20 разів більшою

теплопровідності повітря.

Для деревини берези характерний високий вміст серцевинних променів, а також незначна різниця між щільністю ранньої і пізньої деревини. Спостерігається велика різниця між теплопровідністю вздовж і поперек волокон, що становить – 2,5 рази [2, 6].

Температуропровідність деревини характеризує її теплоінерційні властивості, іншими словами, швидкість розподілу тепла в матеріалі при нестационарних теплових процесах (нагріванні, охолодженні).

Температуропровідність є однією з важливих теплофізичних характеристик деревини при нестационарному теплообміні і разом з тим, одним з найменш вивчених показників деревини. За даними багатьох досліджень даний показник залежить від щільності, температури і вологості деревини, а також напрямку теплового потоку.

Що стосується впливу вологості, то на цей рахунок є різноманітні думки, оскільки багато дослідників вважають, що із збільшенням вологості зменшується коефіцієнт температуропровідності поперек волокон. Це пояснюється тим, що порожнини клітин заповнюються водою, температуропровідність якої в 100 раз менша температуропровідності повітря [18, 19]. Проте ці показники не варто брати до уваги, тому що зі збільшенням вологості об'ємна теплоємність змінюється більше ніж температуропровідність сировини.

Отже, збільшення вологості деревини призводить до підвищення коефіцієнта теплопровідності та температуропровідності, тому під час вибору будь-якої технології важливим є правильний вибір вологості вихідного матеріалу.

1.5. Висновки та завдання дослідження

1. Термічно модифікована деревина – це деревина, яка була модифікована шляхом контрольованого процесу піролізу деревини, нагрітої

(> 180 °C) за відсутності кисню, викликаючи деякі хімічні зміни в хімічних структурах компонентів клітинної стінки (лігніну, целюлози та геміцелюлози) у деревині для підвищення її довговічності.

2. Наведено основні макро-та мікроструктуру деревини та її хімічний склад для кращого розуміння та прогнозування змін під час теплової обробки деревини. Зважаючи на особливості будови деревини кожної породи, потрібно розробляти окрему технологічну інструкцію, відповідно до якої проводиться термічне модифікування.

3. Збільшення вологості деревини призводить до підвищення коефіцієнта теплопровідності та температуропровідності, тому під час вибору будь-якої технології важливим є правильний вибір вологості вихідного матеріалу.

4. Застосування різноманітних порід, а також способу розкрою буде впливати на текстурні властивості виробів. В якості сировини слід використовувати добірні пиломатеріали. Якість сировини контролюється протягом усього виробничого процесу. В принципі, для термомодифікування можна використовувати для різні породи деревини (ялина, сосна, береза, осика, ясен), але властивості сировини сильно впливають на кінцевий результат.

Загалом, термічна обробка деревини має як позитивні, так і негативні аспекти, тому важливо уважно розглядати всі її характеристики та особливості перед використанням у різних сферах.

Метою роботи було проаналізувати способи термічної обробки деревини.

Відповідно, до поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

- проаналізувати сучасні технології виготовлення термодеревини;
- розглянути вплив термічної обробки на властивості деревини.

Об'єктом дослідження є процес термообробки деревини.

РОЗДІЛ 2. КОМЕРЦІЙНІ СПОСОБИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕРЕВИНИ

Однією з найбільш відомих торгових марок термічно модифікованої деревини є ThermoWood®, яка належить до заснованої в грудні 2000 року одноіменної „Thermowood Association”. Дана марка захищена численними патентами, а основні виробництва розташовані в Скандинавії, в основному в Фінляндії. Виробниками є Finnforest, Stora Enso Timber, Stellac та ін.

Серед них Thermowood™, Platowood™, Retiwood™, Perdure™ та інші марки, які належать різним компаніям з різних країн, займаються виробництвом та продажем термічно модифікованої деревини. Кожна з цих марок може мати свої особливості та технології, спрямовані на досягнення конкретних якісних характеристик деревини. За різною глибиною карбонізації та корозії термічно модифіковану деревину можна розділити на поверхневу, глибоку та повну карбонізацію.

Ці продукти можуть бути використані у різних галузях, таких як будівництво, меблеве виробництво, садове господарство та інші сфери, де вимагається висока якість та стійкість матеріалу. Кожен виробник має свою власну технологію та унікальний підхід до термічної модифікації деревини, що відрізняє їхні продукти на ринку.

2.1. Особливості технології ThermoWood®

ThermoWood® - це одна з провідних торгових марок термомодифікованої деревини. Ця технологія була розроблена і патентована Thermowood Association, що спеціалізується на термомодифікації деревини. ThermoWood® використовується для покращення фізичних та хімічних властивостей деревини, зокрема її стійкості до вологи, міцності та стабільності.

Процес термомодифікації ThermoWood® включає нагрівання деревини до високих температур у спеціальних умовах, зазвичай без доступу повітря

або за вакуумом, що дозволяє змінювати хімічну та фізичну структуру деревини. Це покращує її властивості, зокрема зменшує поглинання води, підвищує стійкість до розкладання, збільшує міцність та довговічність [20, 21].

Процес виготовлення деревини ThermoWood® можна розділити на три основні етапи (рис. 2.1) [21].

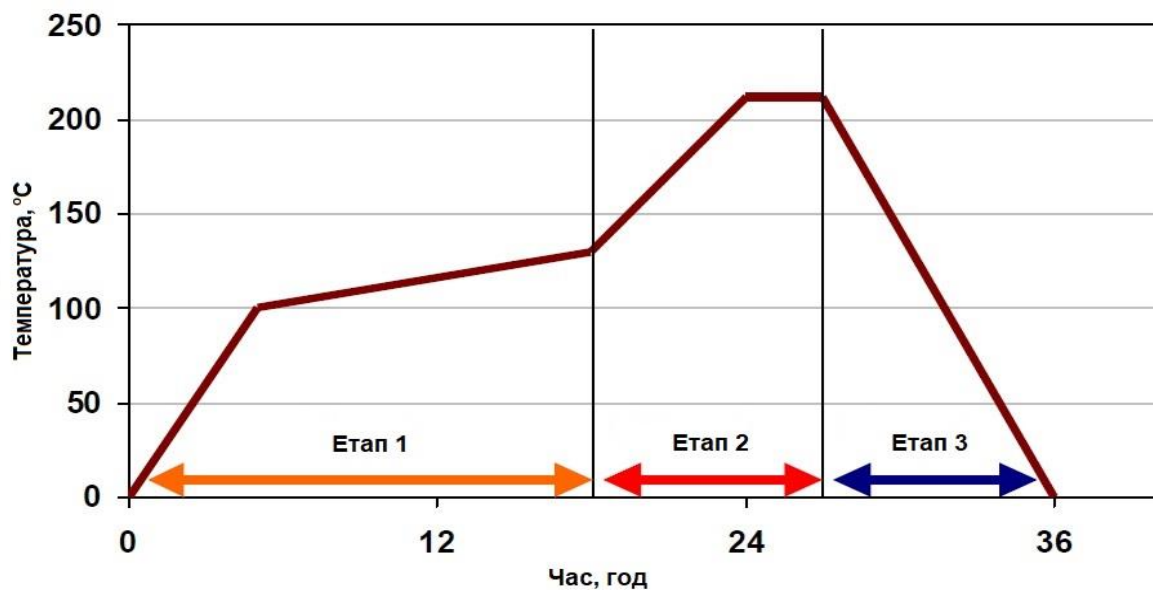


Рисунок 2.1. Діаграма виробничого процесу [21]

На першому етапі відбувається зростання температури та високотемпературне сушіння із використанням тепла і пари, температура сушарки швидко зростає до температури близько 100°C. Після цього температура постійно збільшується до 130 °C, впродовж всього часу відбувається високотемпературне сушіння і вологість деревини зменшується майже до нуля. Тривалість фази сушіння залежить від вихідної вологості, породи та товщини деревини. Оскільки деревина стає еластичною при високих температурах, то її стійкість до деформації краща, ніж у традиційній сушарці.

На другому етапі відбувається термообробка, тобто температура всередині сушарки підвищується до 185 °C та 215 °C. Коли необхідне

значення температури досягається, то вона залишається постійною впродовж 2-3 годин залежно від виробу і його кінцевого використання. Пара використовується під час сушіння і термічної обробки як захист від загоряння деревини, а також впливає на хімічні зміни в деревині.

Далі відбувається охолодження та кондиціонування вологи, тобто температура зменшується за допомогою систем розпилення води; коли температура досягає 80-90 °С, відбувається повторне зволоження до приведення вологості деревини до 4-7%. Тривалість близько 5-15 годин. Загальне енергоспоживання лише на 25% більше, ніж при конвективному сушінні, при цьому 80% теплової енергії іде власне на сушіння.

Деревина перед початком процесу може бути сирою або висушеною. Якщо процес починається із використанням сирової деревини, то вона може бути висушена при дуже високій температурі сушіння. Цей процес підходить для хвойних та листяних порід. Однак його необхідно оптимізувати окремо для кожної породи деревини.

Термічно модифікована деревина здатна задовольнити різноманітні потреби різних ринкових сегментів через свої унікальні властивості, які вона набуває після модифікації. Ці властивості можуть варіюватися залежно від технології обробки, породи деревини та параметрів процесу модифікації.

У Фінляндії найпоширенішими породами деревини, які використовуються для термічної обробки, є сосна, ялина, береза та осика європейська, хоча можуть використовуватися і інші породи. Процес термічної обробки відрізняється для кожної породи деревини, і кінцевий результат відрізняється через різний хімічний склад деревини та клітинні структури. Зазвичай хвойні породи обробляють сильніше і листяні обробляється більш легко.

Породи хвойних і листяних порід мають окрему класифікацію властивості явно відрізняються. Існує два класи термічної обробки. Мати більше ніж два класи є недоцільним, оскільки властивості деревини спочатку змінюються повільно у міру підвищення температури. Коли

температура обробки перевищує 200 °С, властивості швидко змінюються.

Розрізняють два методи виготовлення ThermoWood®: Thermo-S і Thermo-D. Їх характеристика наведена в табл. 2.1 та 2.2 [21, 22, 23, 24].

Таблиця 2.1

Класи обробки сосни і ялини Thermo-S

| | Thermo-S | Thermo-D |
|--|---|---|
| Технологічні параметри: • температура • тривалість інтенсивної термообробки | 190 ± 3 °С 2 - 3 год | 212 ± 3 °С 2 - 3 год |
| Зміна властивостей: • довговічності • стабільності розмірів • межа міцності на згин • потемніння кольору | + + без змін + | ++ ++ - ++ |
| Рекомендації щодо застосування | <ul style="list-style-type: none"> • будівельні елементи • стінові та стельові панелі в сухих умовах • меблі • садові меблі • деталі дверей та вікон • елементи сауни • дошки • облицювання • жалюзі | <ul style="list-style-type: none"> • облицювання • фасції дошки • зовнішній столярні вироби • жалюзі • звукові бар'єри • сауна і ванна кімната Обладнання <ul style="list-style-type: none"> • настилів • садові меблі • інші зовнішні структури |

Таблиця 2.2

Класи обробки берези та осики Thermo-S Thermo-D

| | Thermo-S | Thermo-D |
|--|--|---|
| Технологічні параметри: • температура • тривалість інтенсивної термообробки | 185 ± 3 °С 2 - 3 год | 200 ± 3 °С 2 - 3 год |
| Зміна властивостей: • довговічності • стабільності розмірів • межа міцності на згин • потемніння кольору | без змін + без змін + | + + - ++ |
| Рекомендації щодо застосування | <ul style="list-style-type: none"> • меблі • садові меблі • елементи сауни • підлога | Використання кінцевих продуктів Thermo-D листяних порід так само, як Thermo-S продуктів. Колір темніший через збільшення температури обробки |

У високоціновому сегменті ринку термічно модифікована деревина місцевого походження може бути сприйнята як альтернатива тропічним та північноамериканським породам. Це через те, що термічно модифікована деревина може мати певні переваги, такі як висока стійкість до розкладання, менша поглинання вологи, більша стійкість до деформації під впливом зовнішніх умов тощо, що робить її привабливою для високоякісних додатків у будівництві, меблевому виробництві та інших галузях.

Кожен виробник самостійно визначає свої цільові ринки та застосування термічно модифікованої деревини відповідно до його технологічних можливостей та особливостей продукту.

2.2. Особливості технології Plato

Процес Plato в основному складається з чотирьох етапів (рис.2.2.) [25]. На першому етапі процесу, сиру або висушену на повітрі деревину гідротермічно обробляють за температури 150°C-190°C та підвищеному тиску (0,6-0,8 МПа) впродовж 4-5 годин. Цей етап передбачає деградацію геміцелюлози з утворенням альдегіду і органічних кислотних сполук та активацію лігніну. Целюлоза залишається незміненою.

Далі відбувається процес сушіння деревини, в якій оброблену деревину сушать до низького вмісту вологи (близько 8-10%).

Останній етап являє собою етап затвердіння, в якому сухий проміжний продукт знову нагрівають до температури, як правило, 170-190°C. Термообробка триває 12-16 годин. На цьому етапі відбуваються реакції між продуктами розпаду геміцелюлози та активованим лігніном, що призводить до формування перехресних зв'язків. Вологість деревини після термообробки становить близько 1%.

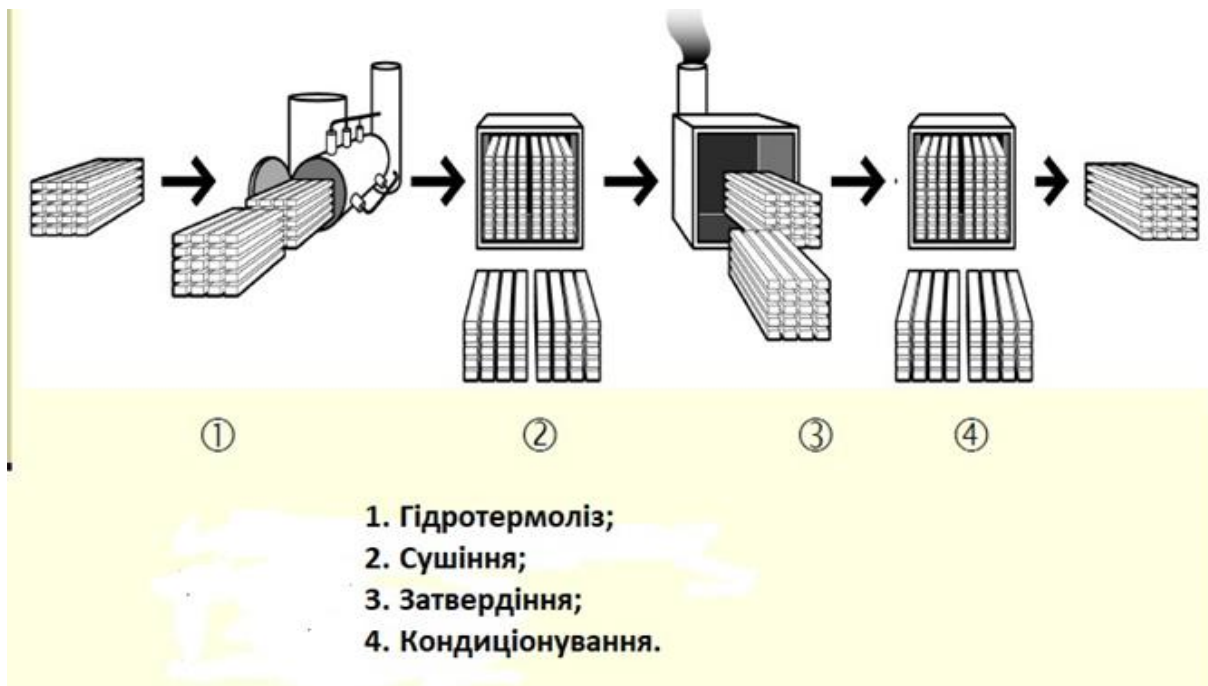


Рисунок 2.2. Основні технологічні етапи [25]

Після цього деревину кондиціонують для збільшення вологості деревини до бажаного рівня (близько 4-6%). Цей етап вимагає близько 3 днів. Тривалість процесу залежить від породи деревини, а також її товщини, форми тощо [24].

Термічна обробка завжди призводить до потемніння деревини. Модифікована деревина Plato має світло-коричневий колір, але як і раніше зберігає зовнішній вигляд натуральної деревини. Крім того, зменшується гігроскопічність модифікованої деревини. Деревина стає стійкішою до різних родів дереворуйнівних грибів.

Механічні властивості термічно обробленої деревини процесом Plato показали середню втрату міцності на згин в діапазоні від 5% до 18% залежно від застосовуваних умов процесу.

2.3. Ректифікування деревини

Ректифікування деревини є процесом термічного модифікування, який розроблений в École des Mines de Saint Etienne у Франції. Цей процес включає в себе нагрівання деревини в атмосфері азоту за високих

температур від 180 °С до 250 °С. Для модифікування застосовують деревину вологістю 12%. Діаграма технологічного процесу зображено на рисунку 2.3. Як із рисунку видно, що відбувається ступінчасте нагрівання. Перший етап процесу включає в себе попередній нагрів деревину до температури (від 100 °С до 120 °С), з якою вільна вода, яка міститься в матеріалі, буде випаровуватися. Другий етап відповідає процесу сушіння при високій температурі (від 200 °С до 240 °С). Це забезпечує випаровування залишків вільної води з попереднього етапу.

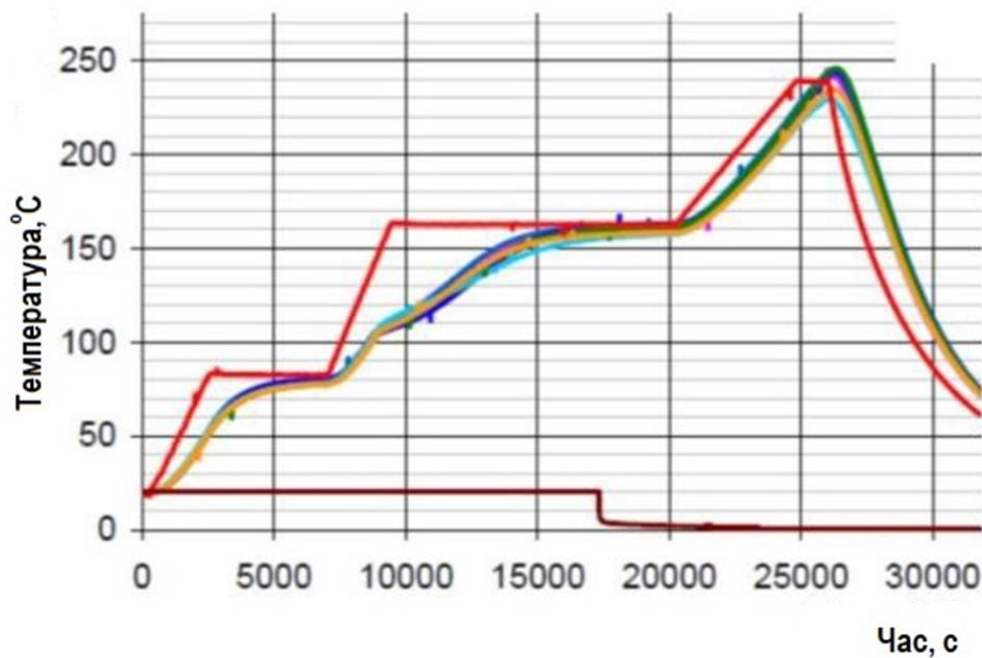


Рисунок 2.3. Діаграма процесу ректифікування [24]

Температура, яка використовується під час процесу позитивно впливає на довговічність деревини, але негативно впливає на механічну стійкість. Вихід готового продукту неоднаковий для цих двох процесів. Ми можемо легко зрозуміти, що завдяки кращому контролю сировини на вході в сушарку і завдяки тому, що деревина підтримується під тиском під час процесу за допомогою спеціального пристрою, кінцевий вихід набагато вищий у процесі ретифікації, ніж у «Vois Perdure».

Промислове виробництво ректифікованої деревини розпочалося у 1995 році. Перша камера для ректифікування, яка могла обробляти деревину

довжиною до 3 метрів, була запущена в експлуатацію в 1997 році. Ця технологія розроблена компанією Four et Brûleurs REY та розташована поблизу міста Сент-Етьєн в Франції [24, 25, 26].

Ректифікована деревина має меншу гігроскопічність порівняно з натуральною деревиною. Гігроскопічність визначається здатністю матеріалу поглинати вологу з оточуючого середовища. Завдяки процесу ректифікації, ця деревина стабілізується при близько 4-5% вологості у вологому середовищі, у порівнянні з 10-12% для натуральної деревини. Ця низька гігроскопічність допомагає покращити біологічну стійкість деревини, у тому числі проти гнилення, плям та цвілі.

2.4. Термічна обробка деревини оліями (ОНТ-Process)

Модифікувати деревину за допомогою гарячих олій можна здійснювати такими двома способами:

- обробка оліями при високих температурах (цей процес включає обробку деревини за високої температури, що дозволяє оліям проникати в молекулярні структури деревини. Відбувається зміна молекулярних компонентів деревини, що може покращити її властивості, такі як стійкість до вологи, термічна стійкість або міцність);

- обробка деревини олією при нижчих температурах, що не призводить до повного модифікування (у цьому випадку температура не досягає рівня, необхідного для повного проникнення олій у молекулярну структуру деревини. Це означає, що деякі хімічні зміни відбуваються, але властивості деревини залишаються практично незмінними).

Процес виготовлення модифікованої деревини шляхом просочення її гарячими оліями складається з наступних етапів:

- 1) завантаження деревини (ялини або сосни) в автоклав;
- 2) подача гарячої олії в автоклав.

Для модифікування використовують переважно рослинну олію

(ріпакову, соняшникову, соєву або льняну). Під час процесу модифікування гарячими оліями необхідно виключити кисень. Деревина довжиною до 4 м може оброблятися за температури від 180 °С до 220 °С, причому час обробки становить від 18 годин. Вибір тривалості витримки залежить від розмірів та породи деревини.

Термічна обробка олій при високих температурах, особливо понад 230 °С, може вплинути на їхню консистенцію і склад. Високі температури можуть впливати на випаровування летких компонентів, що може призвести до того, що олія стає густішою або в'язкішою. Крім того, розкладання деревини під час термічної обробки може призвести до утворення нових речовин, які можуть накопичуватися в олії та змінювати її склад. Ці фактори потрібно враховувати під час планування модифікування деревини оліями.

Процес термічної обробки деревини оліями високої температури (180-220°С) не призводить до проникнення олії всередину клітинної стінки деревини під час нагрівання (рис. 2.4). Виявилось, що необхідно підтримувати бажану температуру процесу (наприклад, 220°С) протягом 2-4 годин в середині дерев'яних деталей, які підлягають обробці. Потрібен додатковий час для нагрівання та охолодження в залежності від розміру деревини. На рис. 2.4. наведено приклад фази розігріву колод перерізом 90 мм на 90 мм. Типова тривалість процесу для всього циклу обробки (включно з нагріванням і охолодженням) для колод перерізом 100×100 мм і довжиною 4 метри становить 18 годин. Але, коли зразки залишаються в олійній ванні після нагрівання під час охолодження, спостерігається поглинання олії зразками деревини. Це призводить до збільшення маси зразків у 50-70%. При цьому поверхня деревини залишається сухою після обробки [24, 27, 28].

Теплоносієм є нерафінована рослинна олія. Наприклад, ріпаку, лляна або соняшникова олія. Олія служить для швидкої та рівномірної передачі тепла деревині, забезпечуючи однакові умови тепла по всьому автоклаві, ідеальне відділення кисню від деревини

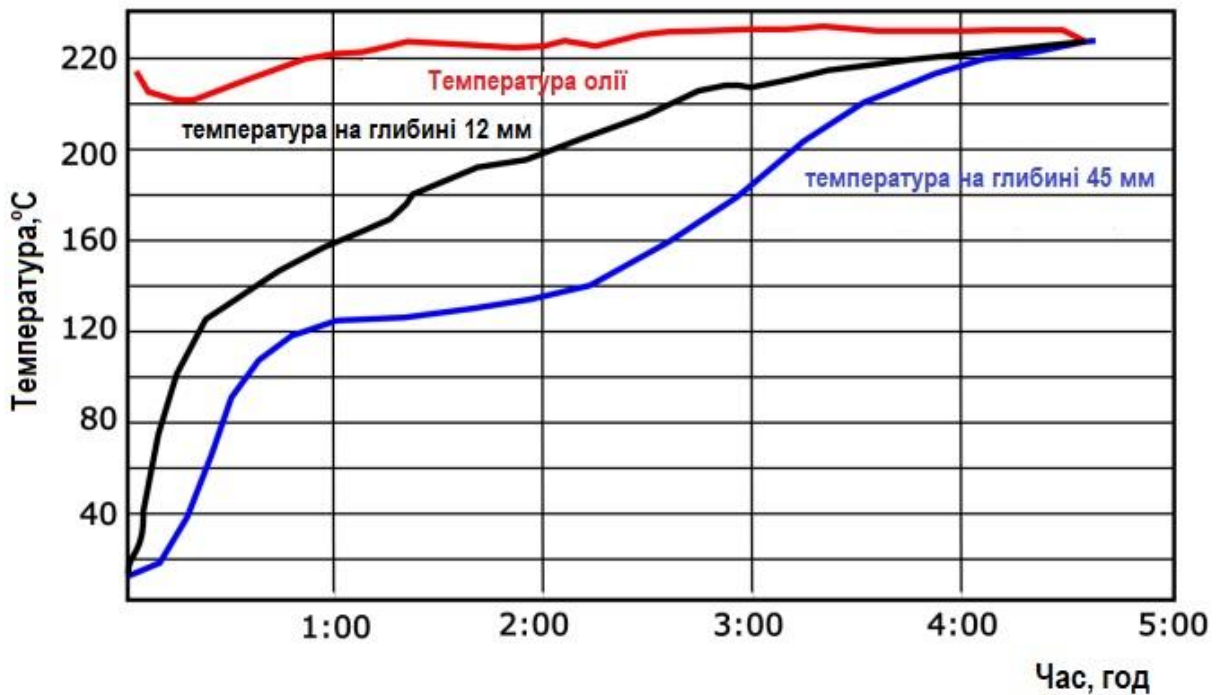


Рисунок 2.4. Діаграма нагрівання деревини у гарячих оліях [27]

Натуральні рослинні олії піддаються олійно-термічному покращенню деревини з екологічної точки зору та завдяки своїм фізичним і хімічним властивостям. Використання інших рослинних олій, наприклад, ріпакової, соняшnikової, соєвої або навіть талові олії або похідні талової олії на додаток до висихаючих олій, таких як лляне масло, також можливі. Лляна олія виявилася безпроблемною, хоча запах, який виникає під час термічної обробки, може бути недоліком. Температура диму та схильність до полімеризації також важливі для висихання олії в деревині та для стабільності відповідної партії олії. Здатність олії витримувати нагрівання мінімально температуру 230°C є обов'язковою умовою. При термічній обробці змінюється консистенція і колір олії. Олія стає густішим, тому що летючі компоненти випаровуються, продукти розкладання деревини накопичуються в маслі і змінюють його склад. Це, очевидно, призводить до покращеного захоплення олій [26, 27].

Термічна обробка оліями вказує на зміни властивостей деревини. В

результаті такої обробки модуль пружності підвищується, що може свідчити про певні зміни у внутрішній структурі деревини.

Процес Royal (або Royale) спочатку був розроблений як метод сушіння деревини, під час якого деревина нагрівається в олії під вакуумом. Використовуються низькі температури (60-90°C) порівняно з іншими методами термічного модифікування оліями.

Олія, яка нагрівається до певної температури, вводиться у спеціальну камеру для обробки разом зі сирою деревиною. Застосування вакууму перед просочуванням дозволяє забезпечити краще проникнення олії всередину деревини, оскільки вакуум допомагає видалити повітря з пор цільної структури. Коли деревина досягає необхідної вологості, вводиться олія для просочення. Після просочення створюється вакуум для видалення надлишкової олії з деревини, що дозволяє досягти бажаної консистенції та властивостей матеріалу. Олія надає деревині водовідштовхувальні властивості та може захищати її від вологи, розкладу, гниття та інших зовнішніх факторів, підвищуючи таким чином тривалість її використання та стійкість.

Цей метод модифікування може бути використаний для покращення властивостей деревини для різноманітних застосувань, включаючи будівництво, меблеве виробництво та інші галузі, де важлива якість та тривалість матеріалу.

2.5. Висновки

Спільним для всіх чотирьох методів модифікування є те, що масивна деревина піддається впливу температур, близьких або вищих за 200 °C, впродовж кількох годин в атмосфері з низьким вмістом кисню. Завдяки термічному модифікуванню деякі механічні властивості знижуються, але стабільність розмірів і біологічна довговічність деревини збільшуються без додавання зовнішніх хімічних речовин / біоцидів до деревини. Тому

термічно модифікована деревина для багатьох розглядається як новий матеріал.

У таблиці 2.3 наведено основні характеристики для кожного з процесів термічної обробки, серед яких можна спостерігати помітні відмінності між тиском, температурою, атмосферою, вмістом вологи та комерційними назвами, які зараз використовуються процесами.

Ці технології обробки деревини викликають хімічні реакції між целюлозою, геміцелюлозою, лігніном, екстрактами та навколишнім середовищем. Мета цих обробок полягає в тому, щоб запропонувати кращі фізичні характеристики з точки зору тривалості та стабільності розмірів, а також кращі естетичні аспекти шляхом однорідності кольору матеріалу. Ці технології відрізняються величинами, такими як температура, час і тиск, а також залежно від атмосфери, в якій виконується кожен процес [22, 23, 27, 30, 31].

Таблиця 2.3
Порівняння між процесами термообробки деревини

| Способи термообробки | Середовище | Початкова вологість деревини | Температура термообробки, °C | Етапи |
|-------------------------------------|------------------|---------------------------------------|------------------------------|--|
| Обробка гарячими оліями (Німеччина) | Гаряча олія | Повітряно-суха, 6% | 180-220 | Один |
| Термо деревина (Фінляндія) | Пара | Сира деревина (свіжозрубана деревина) | 150-240 | Підняття температури і сушіння, термообробка, охолодження і кодинцінування |
| Ректифікування деревини | Азот | Повітряно-суха, 12% | 200-240 | Один |
| Плато процес (Нідерланди) | Пара або повітря | Сира або повітряно-суха | 170-190 | Гідротермоліз, сушіння, гаряче сушіння (затвердіння) |

Найпоширенішими нагрівальними рідинами є повітря і пара, також можуть використовуватися олії. Середовище може змінюватися залежно від позитивного або негативного тиску, пари або інертних газів, які перешкоджають горінню в матеріалі.

Розкриті технології мають принаймні спільні етапи нагрівання,

обробки та охолодження, і вони уникають безпосереднього горіння матеріалу.

Деревина, модифікована термічною обробкою, використовується для виготовлення дощок, перекриттів, балок, колон, панелей, конструктивних і декоративних елементів зовнішнього використання.

РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ МЕТОДІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕРЕВИНИ НА ЇЇ ВЛАСТИВОСТІ

3.1. Зміна хімічної будови деревини

Термічна обробка деревини призводить до змін у фізичній і хімічній будові деревини під час процесу нагрівання (рис. 3.1). Основні компоненти деревини (целюлоза, геміцелюлози та лігнін) розпадаються по-різному під час нагрівання. Целюлоза і лігнін розпадаються повільніше і за вищої температури, ніж геміцелюлоза. Екстрактивні речовини в деревині розпадаються легше, і ці сполуки випаровуються з деревини впродовж термічної обробки [34].

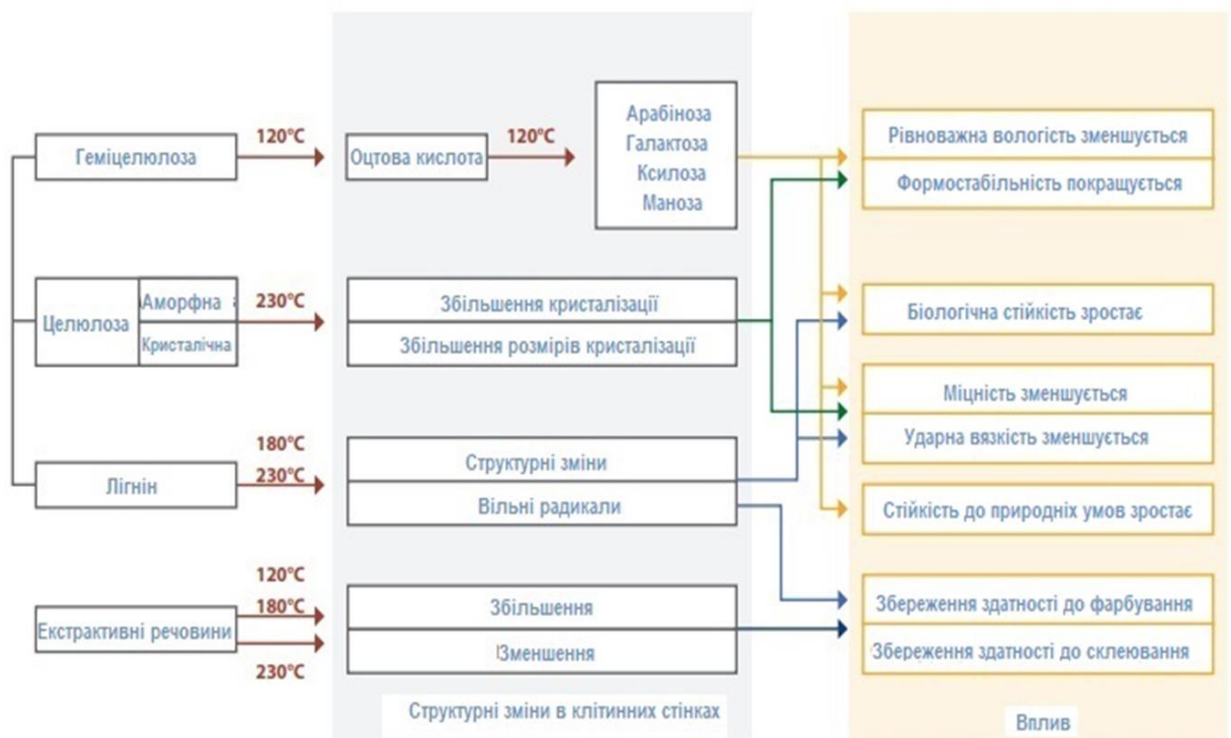


Рисунок 3.1. Зміна хімічної будови деревини під час термічної обробки [30]

Дуже важко детально описати хімічні зміни, що відбуваються під час процесу термічного модифікування. Багато хімічних змін відбуваються одночасно за участю як ендотермічних, так і екзотермічних реакцій. Таким чином, значення температури для кожної окремої реакції зараз майже

неможливо.

Під час термооброби деревина нагрівається і утворюється оцтова кислота з ацетильованої геміцелюлози під час гідролізу. Утворена оцтова кислота виступає каталізатором гідролізу геміцелюлози до розчинних цукрів, сприяючи розкладанню складних вуглеводів на прості цукри.

Більше того, оцтова кислота також може впливати на целюлозу, розчиняючи зв'язки між одиницями глюкози та руйнуючи целюлозні молекули на менші компоненти. Цей процес може привести до деполімеризації мікрофібрил целюлози, що означає розривання довших ланцюгів целюлози на коротші фрагменти через розрив зв'язків між глюкозними одиницями [20, 23, 30].

Ці процеси грають ключову роль у термічному розкладанні компонентів деревини, впливаючи на їхню структуру та властивості під час термічної обробки.

Після термічної обробки деревина містить значно меншу кількість геміцелюлози. Внаслідок цього термічно оброблена деревина є стійкою до грибного ураження порівняно з звичайною сухою деревиною. З розпадом геміцелюлози, концентрація водопоглинальних гідроксильних груп зменшується і стабільність розмірів обробленої деревини також покращується порівняно з звичайною сухою хвойною деревиною.

Температура розкладання геміцелюлози зазвичай нижча (близько 200-260 °C) у порівнянні з целюлозою (приблизно 240-350 °C). Геміцелюлоза є одним з компонентів деревини, і її розпад відбувається при термічній обробці за відносно низьких температур порівняно з целюлозою [24, 34].

Целюлоза є основним структурним компонентом деревини і відіграє ключову роль у забезпеченні її механічної міцності. Розпад целюлозного ланцюга під час термічної обробки може суттєво вплинути на зміну міцності деревини.

З іншого боку, геміцелюлоза також є важливим компонентом деревини, але вона має менший вплив на загальну міцність порівняно з целюлозою.

Розпад геміцелюлози може спричинити певні зміни у властивостях деревини, таких як зменшення генерації внутрішніх напруг та покращення водонепроникності. Однак розпад геміцелюлози не має такого значного впливу на загальну міцність деревини, як целюлоза.

Лігнін помірно реагує, як компонент деревини, але при високих температурах. Вважається, що стадія гідротермолізу відповідає за активацію лігніну, а також деградацію геміцелюлози (розщеплення ацетилфурфуролу).

На другому етапі термічної обробки відбувається автоконденсація лігніну шляхом утворення метиленових зв'язків між ароматичними кільцями, а також наступна деградація геміцелюлози. Реактивні проміжні сполуки з'єднуються знову (зшивання). Результатом цього етапу є отримання довговічності та розмірної стійкості [32, 33, 34].

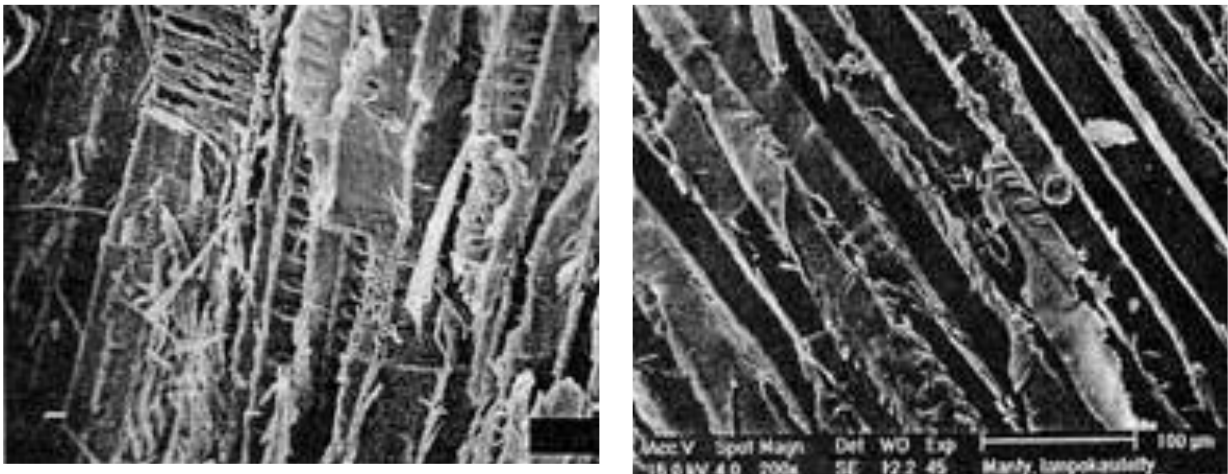
Результат процесу термічного модифікування залежить від температури, часу та наявності кисню і води. Присутність кисню призведе до окисних реакцій, які переважно можна запобігти обробкою в інертній атмосфері, такій як азот, олія, вуглекислий газ, вода або пар. Пар – це звичайний, ефективний і досить дешевий спосіб створення цієї інертної атмосфери, але він також впливає на реакції, що виникають під час обробки. Деградація більша в системі, де присутні вода або волога.

3.2. Вплив термообробки на властивості деревини

Термічна обробка деревини перш за все збільшує «біологічне життя» деревини, забезпечує стабільність розмірів, зменшуючи її рівноважний вміст вологи, а також внутрішні напруження та покращує естетичність текстури шляхом гомогенізації кольору. Проте термічна обробка зменшує механічні властивості деревини максимум на 30 %, знижує її щільність максимум на 20 % і крихкість матеріалу [4].

Внаслідок процесу термічної обробки структура деревини змінюється і на мікрорівні. На рисунку 3.2 зображено як структура відрізняється від

звичайної необробленої сосни і термічно обробленої сосни. Встановлено, що теплова обробка деревини спричинює її термічний розклад, який проявляється у втраті речовини деревини, до того ж в оберненій залежності від розмірів зразка; починаючи з температури 150 °С, втрата речовини в бука значно більша, ніж у сосні; інтенсифікація процесу термічної обробки деревини (збільшення температури і тривалості) погіршує її механічні характеристики і в першу чергу ударну в'язкість, яка утворює чітку тенденцію до зменшення вже за 130 °С (для сосни); заболонна деревина сосни більш чутлива до термообробки, ніж деревина бука.



а)

б)

Рисунок 3.2. Будова деревини [24]
а) необроблена сосна б) термічно оброблена сосна

Нагрівання деревини змінює її хімічні та фізичні властивості. Зміна властивостей в основному обумовлена термічним розпадом геміцелюлози. Бажані зміни починають з'являтися вже близько 150 °С і продовжуються, коли температура підвищується поетапно. Як наслідок, зменшується набрякання і всихання, підвищується біологічна довговічність, темнішає колір, деревина стає легшою, рівноважна вологість зменшується, рН зменшується, теплоізоляційні властивості поліпшуються. Проте жорсткість деревини і міцнісні властивості також змінюються [35].

Зміна забарвлення

Чітко помітним ефектом термічно модифікованої деревини є те, що вона набуває темнішого кольору (рис. 3.3). У багатьох випадках цей ефект затемнення розцінюється як позитивний ефект. Зміна кольору особливо бажана для ринків, де зазвичай використовуються ексклюзивні тверді породи деревини [35, 36]. Вимірювання кольору має великий потенціал для прогнозування якості процесу термічної модифікації, прогнозування змін властивостей, таких як хімічні зміни, втрати міцності і втрати маси [22, 36, 37, 38].

Зміна природного кольору виду на темніший. Залежно від температури процесу та тривалості можна отримати різні відтінки. Відбувається потемніння деревини, при цьому зміна кольору залежить від температури та часу обробки [22, 30]. У міру нагрівання деревини відбуваються хімічні зміни макромолекулярних компонентів клітинної стінки, що спричиняє зміну кольору. Що вища температура, то подальше розкладання і темніша деревина (рис. 3.3). Зміна в колір деревини однорідний по всьому виробу. Термічна обробка має здатність збільшити світлий відтінок низькоцінних порід дерев, щоб вони нагадували більш темні відтінки, які бажані від екзотичних порід деревини, але за меншу вартість [10, 30, 32].

Також деякі науковці розглядають зміну кольору у зв'язку з впливом температури та обробки на міцність на вигин. Існувала лінійна залежність між міцністю на вигин і зміною кольору. Ці результати припустили, що за змінами кольору деревини можна передбачити міцність деревини на згин [37].

За рахунок втрати під час нагрівання частини речовини деревини в цілому і її окремі клітини зменшувалися в об'ємі. Тепло за температури 70 °C ще не впливає на пиломатеріали, за 100 °C починається його слабка дія, а у разі дальшого під-вищення температури і у разі збільшення часу її дії маса пиломатеріалів зменшується.



Рисунок 3.3. Зміна кольору термічно модифікованої деревини

У разі підвищення температури деревини від 100-180 °C сорбційні властивості її зменшувалися. У разі витримки її за температури 180 °C протягом 6-24 год сорбційні властивості її продовжувалися зменшуватися, але у разі дальшої витримки за цієї ж температури вони знову збільшувалися, що пояснюється різними сорбційними властивостями поліоз, целюлози і лігніна.

Стійкість до грибів і комах

Термічне модифікування деревини показало великі перспективи з точки зору економічного способу виробництва нетоксичних деревинних матеріалів із покращеною біологічною довговічністю [5, 31, 32].

Термічне модифікування знижує рівноважну вологість деревини практично вдвічі. При вищій відносній вологості різниця в значення вологості деревини вище. Сапротрофні гриби активізуються, коли вологість деревини перевищує 20%. Незалежно від відносної вологості повітря, рівноважна вологість термічно модифікованої деревини залишається значно нижче 20 %. Це значно впливає на довговічність деревини.

Термічне модифікування підвищує стійкість до гниття. Було виявлено, що ступінь розкладання грибів залежить від виду, температури, часу та типу гнилі чи комах. Під час термічного модифікування деградація геміцелюлози та лігніну є основним внеском у покращення стійкості до грибів.

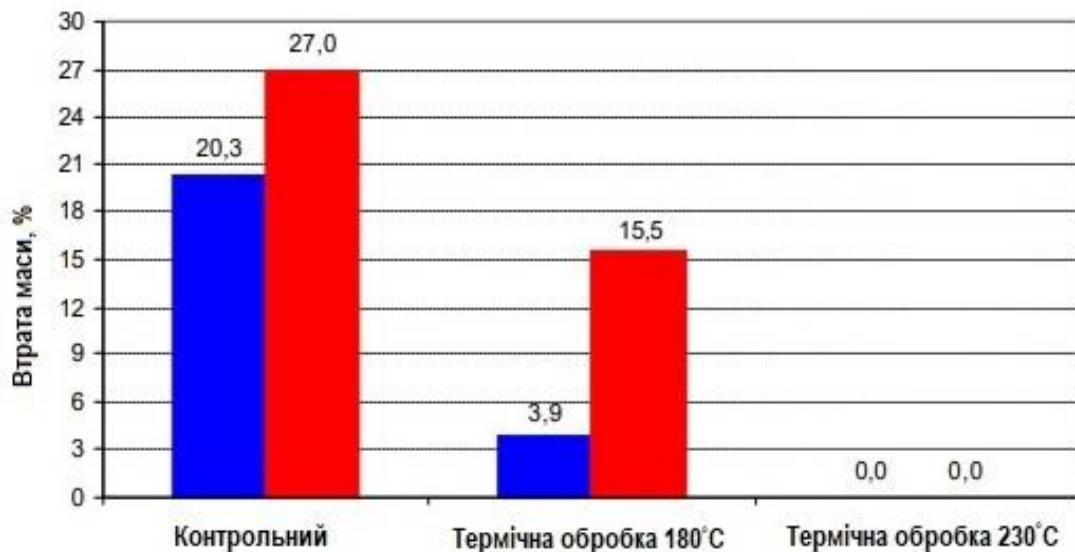


Рисунок 3.6. Вплив температури обробки біостійкість

Геміцелюлоза, як правило, вважається основним у гігроскопічній поведінці деревини для розвитку деревних гнильних грибів, а також модифікування лігніну є частиною пояснення неефективності грибкових ферментативних атак [39, 40, 41]. Наведено результати щодо стійкості до грибів (рис. мають широкий спектр результатів залежно від виду обробки та

тривалості, що вимагає подальшого вивчення того, які методи обробки покращують стійкість до яких грибів. Основним є втрата маси після обробки різними грибами.

Втрата маси

Втрата маси деревини вважається однією з найважливіших характеристик термічної обробки, і її зазвичай називають ознакою якості [30, 31]. Зниження ваги є загальним ефектом для всіх термічних обробок через деградацію вуглеводів і зниження вмісту вологи, що утримується в деревині. Втрата маси змінювалася залежно від виду, що оброблявся, і ступеня температури в процесі (рис. 3.7) [40, 41]. Коли деревина нагрівається, початкове зменшення ваги відбувається через втрату зв'язаної вологи та летких екстрактивних речовин [31]. Коли температура підвищується під час процесу, відбуваються хімічні зміни макромолекулярних компонентів клітинної стінки, викликаючи подальшу втрату ваги [4, 30, 31]. Рівноважний % вологості також є великою частиною, яка пов'язана з кінцевою масою продукту. Існує явна подібність між втратою ваги та втратою рівноважного вмісту вологи після збільшення інтенсивності термічної обробки.

Найпомітніша різниця у втраті маси між видами пов'язана з м'якою та листяною деревиною, причому втрата маси, як правило, вища у листяних порід (MacLean 1951; Zaman et al. 2000; Militz 2002). Заман та ін. (2000) представили дослідження, яке показало різницю між листяною та м'якою деревиною при температурах від 205 °C до 230 °C протягом 4-6-8 годин. Загальна втрата маси зразків сосни звичайної (*Pinus sylvestris*) під час нагрівання при 205°C і 230°C змінювалася в діапазоні 5,7-7,0 і 11,1-15,2% відповідно, що свідчить про явний вплив температури на загальну втрату маси.

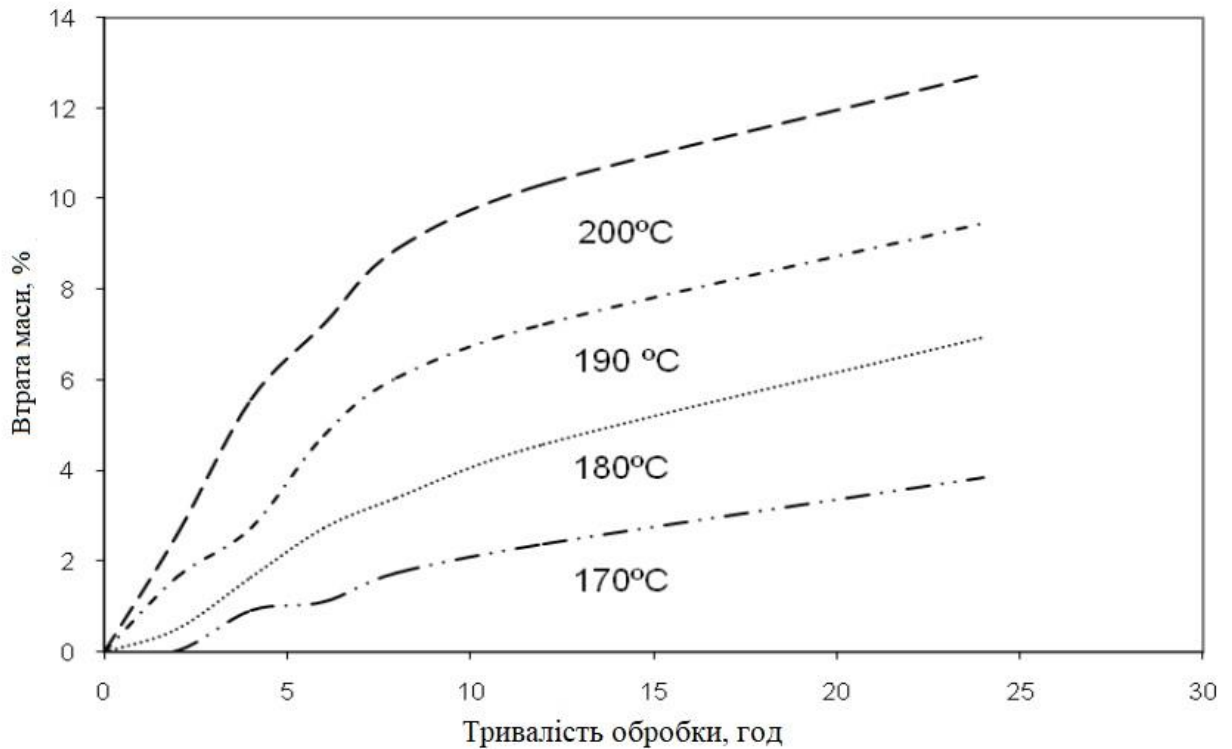


Рисунок 3.7. Залежність втрати маси від температури та тривалості обробки

Зниження щільності деревної речовини за температури 180 °С може бути пов'язане з розпадом геміцелюлози, що спричиняє кількісне збільшення лігніну (рис.3.8). Однак, збільшення щільності за температури 200 °С через процес деструкції лігніну не було підтверджено хімічним аналізом термічно обробленої деревини.

Зростання щільності деревини, яке спостерігається після термічної обробки, може бути також пояснене тим, що використовуються для визначення її щільності. Внаслідок термічної обробки також може відбуватися зниження стійкості клітинних стінок, що може спричинити деформацію їх мікропорожнин.

Такі зміни в структурі можуть впливати на параметри, виміряні під час лабораторних вимірювань щільності деревини, і тому потребують додаткового розгляду для повнішого розуміння впливу термічної обробки на властивості деревини.

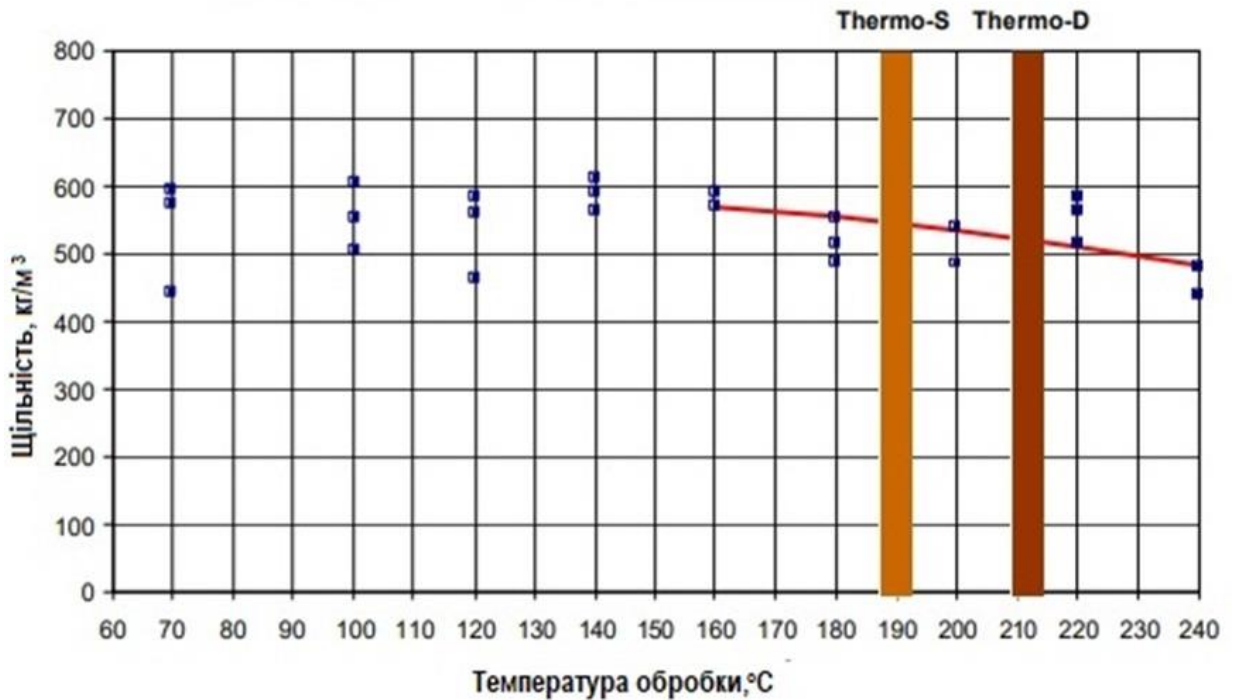


Рисунок 3.8. Вплив термообробки на щільність деревини сосни [30]

Зменшення рівноважної вологості впливає на її набрякання і водопоглинання. Термічне модифікування значно зменшує тангентальне і радіальне *набрякання* деревини. Завдяки зменшеному набряканню та всиханню термічно модифікована деревина має більш стабільні розміри, ніж стандартна деревина. Добре зберігає свої розміри навіть без опорядження поверхні.

Механічні властивості

Термічне модифікування при високих температурах призводить до зниження міцності на статичний згин (Chang and Keith 1978) на це можуть впливати різні методи термообробки та атмосферні умови рис. 3.9 []. Наприклад, було виявлено, що міцність ялини зменшилася на 44-50% при підвищенні температури обробки від 100-200 °C, але це не впливатиме на модуль пружності. Було визначено, що міцність на згин була найкращою під час нагрівання за температури 100°C.

Коли температуру термічної обробки підняти вище 100°C, як міцність на згин, так і модуль пружності зменшилися. Також визначено, що листяна

деревина демонструє більшу втрату міцності, ніж хвойна деревина при обробці таким же чином.

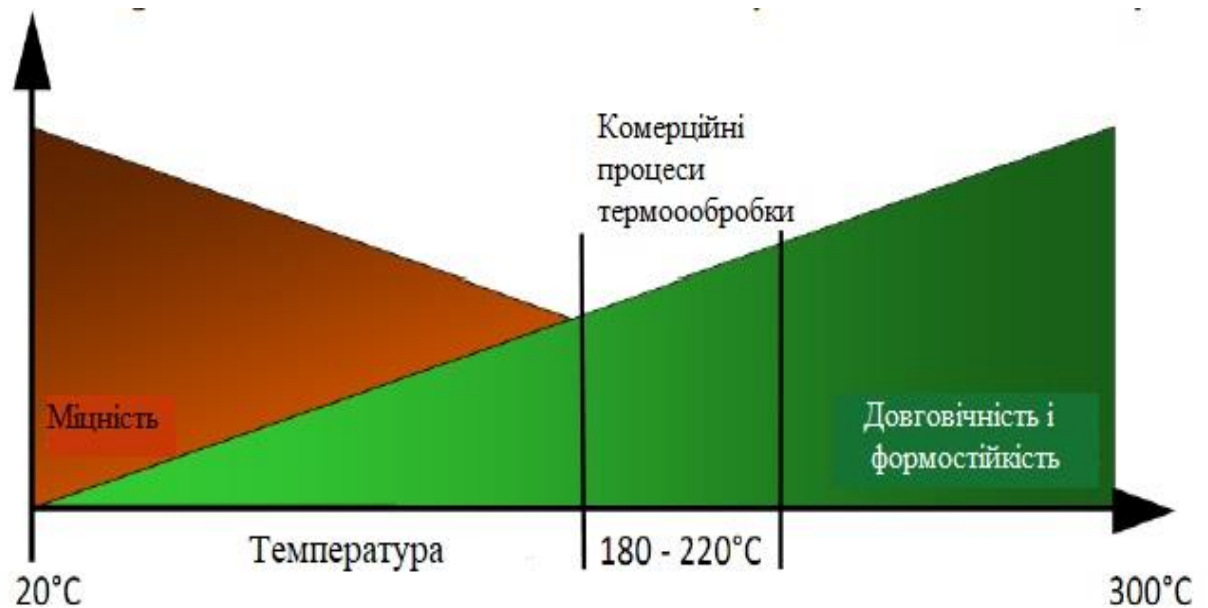


Рисунок 3.9. Зміна властивостей деревини під дією термообробки [41]

Досі більшість випробувань на міцність проводилися із використанням невеликих, бездефектних пробних зразків. Потрібно подальші дослідження та випробування із більшими пробними зразками та різною кількістю вад і різними типами з'єднань. Через недостатню інформацію не рекомендується поки що використовувати термічно модифіковану деревину для конструкцій, що несуть навантаження.

Виявлено, що в'яз і бук більш сприйнятливі до термічної деградації порівняно з осикою та кленом, як було визначено за допомогою вимірювань міцності термічно модифікованих зразків. Ще одна властивість, яка проявляється від термічного модифікування - це підвищена твердість (рис.3.10). Твердість термічно модифікованої деревини залежить від температури обробки. Відповідно із збільшенням температури обробки, твердість буде зростати.

Даний фактор є важливим під час визначення термічно обробленої деревини, у якості підлоги та терасних дощок.

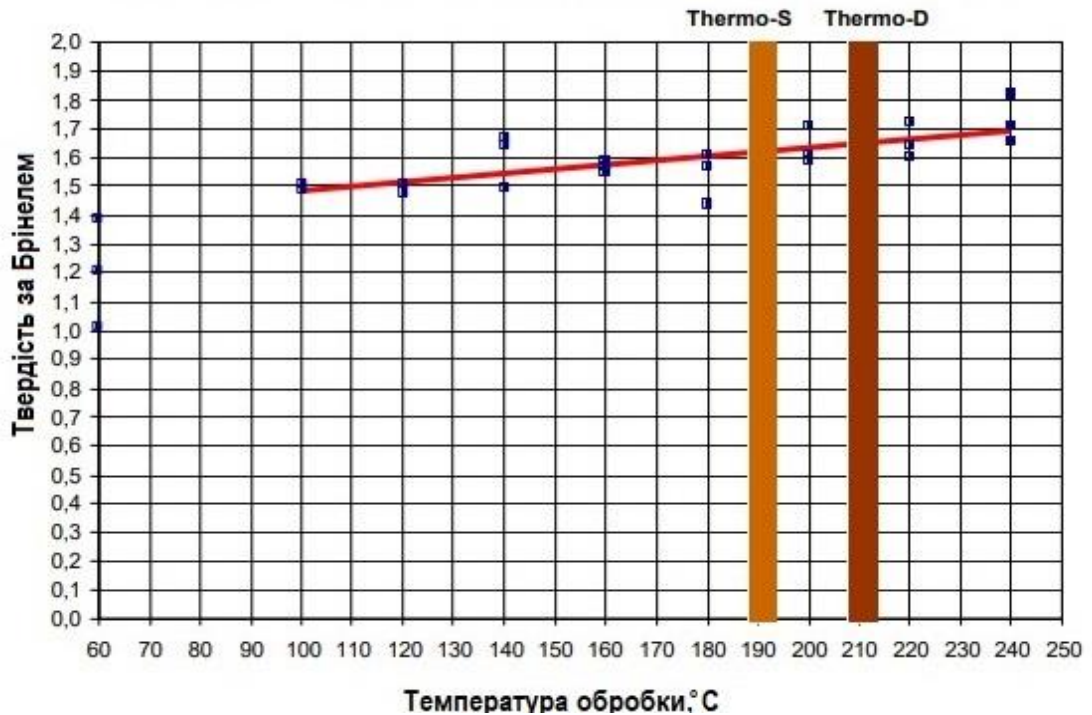


Рисунок 3.10. Залежність твердості деревини від температури термічної обробки

Твердість деревини – це властивість, яка зазвичай необхідна деревині, яка використовується для обшивки панелей, меблів, підлоги, настилів, виробів, для яких потрібна стійкість деревини до стирання (Leitch 2008). Підвищена твердість була обумовлена стисненням клітинної стінки.

Термічно оброблена деревина - це продукт з натуральної деревини без будь-яких хімічних речовин. Якщо дана деревина не склеєна та не пофарбована, то її можна використовувати як будь-які інші необроблену деревину. Термічно оброблювальну деревину можна спалювати. Вона виробляє приблизно на 30% менше енергії, ніж необроблена деревина, оскільки більша частина енергії, що містить екстрактивні речовини, вже видалена в процесі термічної обробки. Термічна деревина горить за допомогою меншого полум'я та утворює менше диму та шкідливих газів через фактори, згадані вище. Займистість зазвичай краща завдяки нижчому рівноважному вмісту вологи в деревині; тобто деревина більш суха.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Найважливішою характеристикою модифікованої деревини шляхом термічної обробки є той факт, що це фізичний процес, який хімічно модифікує структуру клітинної стінки, уникаючи використання хімічних речовин під час процесу, таким чином сприяючи сталому розвитку нових матеріалів на основі деревини для промислового застосування.

Термічну обробку можна проводити за допомогою процесів піролізу та гідролізу. У процесі піролізу системи відкриті і підтримуються при атмосферному тиску і високих температурах; крім того, деревину потрібно висушити, а цикли тривають довго, створюють викиди в атмосферу та значне споживання енергії. У процесі гідролізу системи замкнуті й демонструють високий тиск і низькі температури; крім того, деревину не потрібно сушити, цикли короткі, а викиди та споживання енергії низькі. Під час термічної обробки деревина нагрівається до температур, близьких до температури піролізу в інертних середовищах (без або з невеликим вмістом кисню), щоб уникнути горіння. Далі температура підтримується постійною протягом заданого періоду, далі виконується кондиціонування (контрольоване охолодження).

Реакції поліконденсації, що відбуваються в деревній матриці, призводять до зшивання лігніну та деполімеризації найбільш гідрофільних сполук. Загалом, усі зміни спричинені різними хімічними реакціями, що відбуваються одночасно, які посилюються з температурою обробки (від Thermo-S до Thermo-D), але також залежать від породи деревини. Однак неможливо передбачити ефект обробки лише за допомогою температури.

Використання знань про хімічну будову деревини та зміну її під час термообробки, може бути використане для створення моделей, які швидко надають інформацію про ймовірно отримані властивості деревини.

Наведено основні промислові методи термомодифікування деревини, які можуть різнитися вибором вологості деревини перед модифікуванням, середовищем (пара, азоту, вуглекислого газу) у якому відбувається обробка.

Спільним є те, що деревина повинна оброблятися без доступу кисню.

Термічна обробка деревини, яка проводиться за високих температур від 160 до 240°C, призводить до незворотніх біологічних змін у її структурі. Ці зміни покращують стійкість деревини до грибкових уражень та зменшують її водопоглинання в декілька разів. При цьому, такий метод захисту не вимагає використання хімічних речовин, які можуть мати токсичний вплив на навколишнє середовище та здоров'я людини.

Термічна обробка деревини може змінити її зовнішній вигляд, при цьому відтінок стає більш інтенсивним і темнішим. Цей ефект може бути використаний для покращення зовнішнього вигляду менш якісних сортів деревини, надаючи їм вигляд сортів більш вартісних чи екзотичних порід. Це дає можливість "ушляхетнювати" і підвищувати цінність менш цінних порід деревини.

Процес термічного модифікування є екологічно чистою альтернативою обробки деревини.

Завдяки високогігієнічності, кольору та зниженій теплопровідності термічно оброблена деревина добре підходить для виготовлення лавок для саун. Однак швидкі цикли змочування та висихання в середовищі з високою температурою можуть призвести до того, що деревина може розколюватися на кінцях. Щоб уникнути цього, рекомендується обробити їх кінці олією, воском або лаком.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Sandak A. et al. Quality control of vacuum thermally modified wood with near infrared spectroscopy. *Vacuum* , 2015.
2. Srinivas K. et al. Photodegradation of thermally modified wood J. *Photochem. Photobiol. B*, 2012.
3. Huang X. et al. Study of the degradation behavior of heat-treated jack pine (*Pinus banksiana*) under artificial sunlight irradiation *Polym. Degrad. Stabil.* 2012.
4. Yildiz S. et al. Effect of artificial weathering on the properties of heat treated wood *Polym. Degrad. Stabil.* 2013.
5. Militz H, Altgen M. Processes and Properties of Thermally Modified Wood Manufactured in Europe In *Deterioration and Protection of Sustainable Biomaterials*. Am Chem Soc 2014. 16:269–285
6. Hill C., Altgen M., Rautkari L. Thermal modification of wood—a review: chemical changes and hygroscopicity *J Mater Sci*, 2021, 56:6581–6614.
7. Zhang J. et al. Weathering of copper-amine treated wood *Appl. Surf. Sci.*, 2009.
8. <https://www.essshelf.com/what-is-thermally-modified-wood/>
9. <https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/uutiset/Productionstatistics2022>.
10. <https://www.thermowood.fi/>
11. Tomak E.D., Ustaomer D., Mahmut A., Yildiz S. An investigation of surface properties of thermally modified wood during natural weathering for 48 months *Measurement*. Volume 127, October 2018, Pages 187-197.
12. https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/wood/structure_wood_pt2.php
13. https://woodexpert.net.ua/budova-derevyny-vlastyvosti-osoblyvosti-himichnogo-skladu-foto-z-opysom-mikrostruktury-ta-makrostruktury-dereva/#google_vignette
14. Божок О.П., Вінтонів І.С. *Деревинознавство з основами лісового товарознавства: Навчальний посібник*. – К.: НМК ВО, 1992. – 320с.

15. Вінтонів І.С., Сопушинський І.М., Тайшінгер А. Деревинознавство: Навчальний посібник: 2-е вид., доповн. – Львів: 2007. – 312 с.
16. Brostow W/, Tea Datashvili T. Harrison H. Wood and Wood derived materials. *Journal of Materials Education* Vol. 32 (3-4): 125 - 138 (2010).
17. Гупало О. П. Хімія деревини: підручник / О. П. Гупало, О. П. Тушницький ; Національний лісотехнічний ун-т України. — 2-ге вид., виправ. і доп. — К. : Знання, 2008. — 276 с. — Бібліогр.: с. 274–276.
18. Білей П.В., Павлюст В.М. Сушіння деревини. Навчальний посібник. – Л.: Ліга-Прес, 2003. – 240 с.
19. Стерлин Д.М. Сушка в производстве фанери и древесностружечных плит. «Лесная промышленность», 1977, 384 с.
20. Finnish Thermowood Association, *Termowood Handbook*, Finlandia, 2003. (Finnish Thermowood Association).
21. Rapp A (2001) Review on heat treatment of wood. In *Proceedings of COST E22 special seminar*, February 9th, Antibes, France.
22. Hill C.A.S. *Wood Modification –Chemical, Thermal and Other Processes*. John Wiley and Sons Ltd., Chichester, UK, 2006.
23. Sandberg D., Kutnar A. Thermally modified timber: recent developments in Europe and North America *Wood and fiber science*, 48(2015 convention, special issue), 2016, pp. 28-39.
24. Acosta-Acosta R., Montoya-Arango J. A., Joma E. *Technologies Applied to Wood Heat Treatments, a Review Scientia et Technica Año XXVI*, Vol. 26, No. 02, junio de 2021. Universidad Tecnológica de Pere P. 127-136.
25. Презентація Plato® technology A thermal modification process by Prof. George Mantanis.
26. Sandberg D., Kutnar A. Recent Progress in the Industrial Implementation of Thermo-Hydro (TH) and Thermo-Hydro-Mechanical (THM) Processes // Nunes, L., Jones, D., Hill, C. & Militz, H. (Eds.) *The seventh European Conference on Wood Modification (ECWM7)*, (abstract p. 91-92), March 10-11, Lisbon, Portugal, 2014.

27. Bernon J. P., Robert B., Robert F., Drevet J., “Apparatus and Method for The Treatment of Lignocellulosic Material”. USA Patente WO2004/045815A2, 3 june 2004.

28. Josset M., Masson E., “Le traitement haute température du bois,” de Ressources Transferts Technologiques, France, 2015.

27. Rapp O., Michael y S. Heat treatment of wood in Germany-state of the art, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft.

28. Danchenko I.A. “Method for wood heat treatment and a device for carrying out said method”.Estados Unidos Patente US 20110020568A1 , 27 junio 2011.

29. Review on heat tratments of wood. Proceedings of Special Seminar held in Antibes, France on 9 February 2001 (COST ACTION E22 Environmental optimisation of wood protection) Edited by A.O. Rapp.

30. Finnish Thermowood Association, Termowood Handbook, Finlandia, 2021. (Finnish Thermowood Association).

31. Esteves BM, Pereira HM (2009) Wood modification by heat treatment: a review. BioResources 4:370–404.

32. <http://www.lunawood>.

33. Navi P., Sandberg D. Thermo-hydro-mechanical processing of wood engineering sciences. EPFL Press, Lausanne, 2012

34. Hill C., Altgen M., Rautkari L. Thermal modification of wood—a review: chemical changes and hygroscopicity J Mater Sci (2021) 56:6581–6614.

35. Abe K, Yamamoto H (2005) Mechanical interaction between cellulose microfibril and matrix substance in wood cell wall determined by X-ray diffraction. J Wood Sci 51:334–338. <https://doi.org/10.1007/s10086-004-0667-6>.

36. Militz H, Altgen M (2014) Processes and Properties of Thermally Modified Wood Manufactured in Europe In Deterioration and Protection of Sustainable Biomaterials. Am Chem Soc 16:269–285.

37. Bekhta P, Niemz P (2003) Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood.

Holzforschung 57:539–546.

38. Stamm AJ, Hansen LA (1937) Minimizing Wood Shrinkage and Swelling: Effect of Heating in Various Gases. *Ind Eng Chem* 29:831–833.
<https://doi.org/10.1021/ie50331a021>

39. Chaouch M, Dumarcay S, Pe'trissans A et al (2013) Effect of heat treatment intensity on some conferred properties of different European softwood and hardwood species. *Wood Sci Technol* 47:663–673.
<https://doi.org/10.1007/s00226-013-0533-z>

40. Презентація Thermal Modification of Wood Presented by Jieying Wang
Supervised by Dr. P. Cooper Faculty of Forestry University of Toronto

41. Презентація Modification of wood by Michael Altgen, 21 march 2021.

Д о д а т к и

