

**Національний лісотехнічний університет України**

Інститут деревообробних технологій і дизайну  
Кафедра технологій меблів та виробів з деревини

Освітньо-кваліфікаційний рівень - магістр

**Пояснювальна записка**

до магістерської роботи

на тему: «Дослідження процесу гнуття деревини осики з використанням нагріву в полі струмів високої частоти»

**Виконав:** студент VI курсу, групи ТМД-62м  
спеціальності: 187 «Деревообробні та  
меблеві технології»

**Магістр:** Сеньків Богдан Іванович

**Керівник:** Грицак Степан Андрійович, к.т.н., доцент.  
(ПІБ, науковий ступінь та вчене звання)

**Рецензент:** Сторожук В.М., к.т.н., доцент  
(ПІБ, науковий ступінь та вчене звання)

**м. Львів – 2025 рік**

Державний вищий навчальний заклад  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Інститут

Деревообробних та комп'ютерних  
технологій і дизайну

Кафедра

Технології меблів та виробів з деревини

Освітньо-кваліфікаційний рівень Магістр

Спеціальність

187 «Деревообробні та меблеві технології»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри, проф.

Кійко О.А.

“10” 06 2025 року

**ЗАВДАННЯ  
НА ДИПЛОМ/РОБОТУ МАГІСТРА СТУДЕНТУ**

Сеньків Богдан Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження процесу гнуття деревини осики з використанням нагріву в полі струмів високої частоти.»

керівник роботи Грицак С.А., к.т.н., доцент

( прізвище, ім'я, по батькові, науковий

ступінь, вчене звання)

затверджена наказом вищого навчального закладу від “10” 06 2025 року

№ С-344.

2. Строк подання студентом роботи 15.12.2025

3. Вихідні дані до роботи: Заготовити зразки і необхідні матеріали. Провести аналіз стану питання. Розробити методика досліджень з врахуванням наявних доступних засобів та обладнання.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити). 1. Стан питання, мета та завдання дослідження, 2. Методика експерименту, 3. Результати експериментів, Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Презентація

6. Консультанти розділів роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 04.09.2025

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Літературний огляд	20.09.2025	
2.	Методика проведення досліджень	01.10.2025	
3.	Реалізація експериментів	15.11.2025	
4.	Обробка результатів експериментів	01.12.2025	
5.	Оформлення пояснювальної записки	15.12.2025	

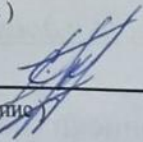
Студент

  
(підпис)

Сеньків Б.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

  
(підпис)

Грицак С.А.

(прізвище та ініціали)

## Анотація

В даній магістерській роботі на тему «Дослідження процесу гнуття деревини осики з використанням нагріву в полі струмів високої частоти.» за спеціальністю 187 «Деревообробні та меблеві технології» розглянуто наступні питання. Зокрема проаналізовано:

- способи отримання криволінійних деталей із деревини. та деревних матеріалів;
- вплив температури, вологості та навантаження на реологічні властивості деревини;
- способи пластифікації та стабілізації деревини при гнутті.

Розроблена і обґрунтована методика проведення досліджень. Побудовано математичні моделі процесу пластифікації деревини та математичні моделі технологічного процесу гнуття. Здійснено багатокритеріальну оптимізацію процесу гнуття деревини осики. Розроблено ескіз конструкції промислової СВЧ-установки для пластифікації деревини перед гнуттям. Запропоновано структуру технологічного процесу виробництва гнутих виробів із масивної деревини осики із застосуванням нагріву в полі струмів високої частоти.

### **Обсяг і структура роботи**

Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Зміст роботи викладено на 64 сторінках тексту, містить 18 рисунків та 20 таблиць. Список використаних джерел включає 46 найменувань, з них 43 іноземних.

Зміст	
Вступ	6
1. СТАН ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	9
1.1. Огляд способів отримання криволінійних деталей із деревини та деревних матеріалів	9
1.2. Вплив температури, вологості та навантаження на реологічні властивості деревини	14
1.3. Огляд способів пластифікації та стабілізації деревини	19
1.4. Удосконалення способів і розробка нового обладнання для гнуття заготовок	21
1.5. Теоретичні та прикладні аспекти промислового виробництва гнутої деревини	24
1.6. Висновки	28
1.7. Мета та завдання дослідження	29
2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	30
2.1. Обґрунтування вибору породи деревини для проведення досліджень та методика підготовки зразків	30
2.2. Експериментальна установка для пластифікації деревини перед гнуттям і методика СВЧ-нагрівання	31
2.3. Методика дослідження стабілізації форми деревини залежно від різних температурно-вологісних умов	35
2.4. Експериментальна установка для гнуття деревини на різний радіус кривизни та методика дослідження здатності деревини до гнуття	38
2.5. Розробка математичних регресійних моделей для процесів пластифікації та гнуття деревини	40
2.6. Висновки	44
3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	45
3.1. Побудова математичних моделей процесу пластифікації деревини	45
3.2. Математичні моделі технологічного процесу гнуття	49
3.3. Багатокритеріальна оптимізація процесу гнуття	55
3.4. Розробка конструкції промислової СВЧ-установки для пластифікації деревини перед гнуттям	57
3.5. Промислова технологія виробництва гнутих виробів із масивної деревини	58
3.6. Висновки	60
Список використаних джерел	62
Додатки	

## ВСТУП

**Актуальність теми..** Деревина є унікальним природним армованим матеріалом, головними перевагами якого виступають її відновлюваність та екологічність. Проте, попри здатність до відновлення, запаси деревини повсюдно зменшуються. Це висуває на перший план одну з найважливіших проблем сучасності — підвищення ефективності її використання шляхом раціонального розкорою, утилізації відходів, застосування конструкцій із низькою матеріалоємністю та впровадження нових ресурсозберігаючих технологій. Особливо гостро ця проблема проявляється під час виготовлення криволінійних меблевих деталей та аркових елементів столярно-будівельних виробів.

Щоб зменшити витрати деревини при виробництві таких елементів, їх нерідко роблять складеними з коротких прямолінійних заготовок або формують зі шпону у спеціальних прес-формах. Однак подібні методи, окрім високої трудомісткості та енерговитрат, обмежують дизайнерські можливості при створенні високохудожніх виробів.

Виготовлення криволінійних деталей шляхом гнуття масивної деревини дає змогу ефективно використовувати цінну сировину і значно розширює потенціал дизайнерських рішень. Та традиційна технологія гнуття вирізняється надзвичайно великими трудовими та енергетичними затратами, що фактично спричинило згортання виробництва гнутої дерев'яної меблі. Водночас за кордоном дослідження з удосконалення технології гнуття тривають досі, і на міжнародних меблевих виставках регулярно презентуються високохудожні вироби з гнутих елементів.

З огляду на викладене можна дійти висновку, що створення нової ресурсо- та енергозберігаючої технології гнуття масивної деревини є надзвичайно актуальним теоретичним і практичним завданням.

**Об'єктом дослідження** в цій роботі є осика (*Populus tremula* L.)

**Метою даного дослідження** є створення технології гнуття заготовок із масивної деревини з низьким вмістом вологи із застосуванням СВЧ-нагріву.

**Об'єктом дослідження** виступає процес СВЧ-нагрівання та гнуття масивної деревини.

**Методика досліджень.** Поставлені завдання виконувалися шляхом проведення теоретичних і експериментальних робіт. Методика досліджень відповідала загальноприйнятим підходам у деревообробці й здійснювалася згідно з чинними ГОСТами. Отримані результати оброблялися методами математичної статистики із застосуванням стандартних програмних пакетів на сучасному персональному комп'ютері.

**Наукова новизна роботи полягає в наступному:**

1. Визначено залежність стабільності форми гнутих елементів від різних температурно-вологісних умов у процесі гнуття.
2. Розроблено математичні моделі процесу гнуття, які враховують технологічні режимні параметри.
3. Створено технологію гнуття масивної деревини, що базується на використанні заготовок зі зниженою вологістю.
4. Запропоновано модель потокової лінії для гнуття масивної деревини. Її особливістю є наявність накопичувального пристрою з обігрівом після СВЧ-установки прохідного типу з живильником, а також конвеєра для повернення оснастки до гнутарного станка. Для стабілізації форми застосовується прохідна камера кондиціонування, що здійснює охолодження або підсушування з наступним охолодженням вигнутих заготовок.

**Теоретична та практична значущість** полягає у можливості використання таких положень:

- математичних моделей, що описують нагрівання деревних заготовок в об'ємному резонаторі;
- встановленої залежності стабільності форми гнутих деталей від температурно-вологісних умов, що дозволяє визначати оптимальні параметри гнуття деревини низької вологості;
- математичних моделей процесу гнуття, що забезпечують розробку раціональних режимів для масивної деревини осики
- технології гнуття масивної деревини, яка забезпечує можливість гнути заготовки з низьким рівнем вологості;

- моделі потокової лінії для гнуття масивної деревини, що дає змогу скоротити тривалість усього технологічного процесу, зменшити споживання електроенергії та кількість необхідної оснастки.

**Положення, що виносяться на захист:**

1. Математичні моделі, які визначають процес нагрівання деревинних заготовок у об'ємному резонаторі;
2. Математична модель, що характеризує стабільність форми гнутих деталей залежно від різних температурно-вологісних умов під час гнуття;
3. Математичні моделі процесу гнуття, що враховують режимні параметри процесу;
4. Технологія гнуття заготовок із низькою вологістю;
5. Модель потокової лінії для гнуття масивної деревини.

Достовірність наукових положень і висновків підтверджується адекватністю регресійних рівнянь, відносною похибкою результатів експерименту, що не перевищує допустиме для деревообробки значення 5%, а також математичною обробкою результатів експериментальних досліджень із застосуванням ЕОМ.

# 1. СТАН ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

## 1.1. Огляд способів отримання криволінійних деталей з деревини та деревинних матеріалів

Криволінійні елементи широко використовуються у виробництві меблів, спортивного інвентарю, човнів і катерів, бочок, а також у будівельних конструкціях — наприклад, у аркових фермах мостів, ангарах, складських і сільськогосподарських спорудах. Їх також застосовують під час виготовлення планерів і навчальних літаків, корпусів телевізорів і радіоприймачів, фанерних труб, профільованої фанери, фанерних бочок, піддонів та багатьох інших виробів.

На сьогодні використовують такі основні технології виготовлення криволінійних деталей [1, 2]:

1. Випилювання з масивних заготовок;
2. Створення аркових елементів шляхом торцевого з'єднання коротких прямолінійних брусків по дузі кола;
3. Склеювання шпону з одночасним гнуттям;
4. Гнуття попередньо пластифікованих масивних заготовок з подальшою стабілізацією форми.

Основні недоліки першого способу: неможливість отримання тонких замкнених елементів з великим радіусом кривизни; знижена вигинальна міцність через перерізання волокон під час розкрою; низький вихід придатних заготовок. Збільшити вихід можна шляхом попереднього склеювання заготовок у щити та подальшого розкрою за шаблонами, однак це значно підвищує трудомісткість.

Другий спосіб забезпечує більш раціональне використання деревини та прийнятну міцність виробів, але наявність стиків робить його непридатним для виготовлення виробів високого художнього рівня, наприклад, елітних меблів.

Третій спосіб також дозволяє економно витратити деревину, включаючи маловартісні породи. Він дає змогу отримувати деталі з малими радіусами кривизни та достатньо високою міцністю [3]. Однак клеєві шви обмежують сферу застосування, дозволяючи використовувати цей метод переважно для продукції середнього класу. Крім того, до недоліків належать висока вартість матеріалів (шпону й клею) та їх підвищена токсичність.

Четвертий спосіб — гнуття пластифікованих масивних заготовок — є найбільш перспективним, оскільки позбавлений недоліків, властивих першим трьома методам. Водночас його істотними мінусами залишаються висока енергоємність (через необхідність пластифікації традиційними способами), тривалий технологічний цикл і складність стабілізації форми.

У таблиці 1.1 наведено порівняльний аналіз різних технологій отримання криволінійних деталей.

У промисловому виробництві криволінійних елементів із масивної деревини найбільшого поширення отримали два способи — випилювання (фрезерування) та гнуття. Їхні основні переваги й недоліки наведені в таблиці 1.2 [4].

Таблиця 1.2. Переваги та недоліки способів виготовлення криволінійних деталей

Гнуття	Випилювання (фрезерування)
<b>Переваги</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Забезпечує високу міцність виробів та дає змогу виготовляти криволінійні елементи з тонких заготовок.</li> <li>• Має високий відсоток виходу готових деталей.</li> <li>• Є екологічно безпечним технологічним процесом.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Використовується універсальне, доступне обладнання.</li> <li>• Відзначається високою швидкістю виконання операцій.</li> </ul>
<b>Недоліки</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Потребує застосування спеціального устаткування.</li> <li>• Вимагає тривалого технологічного циклу через необхідність пропарювання та сушіння</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Низький вихід придатних заготовок.</li> <li>• Зменшення міцності деталей через перерізання волокон.</li> <li>• Неможливість отримати тонкі криволінійні елементи з малими радіусами кривизни (наприклад, як у стилія Тонета).</li> <li>• Підвищене споживання лакофарбових матеріалів через високу поглинальну здатність торцевих поверхонь.</li> <li>• Ускладнення процесу фрезерування внаслідок наявності торців після випилювання.</li> </ul>

Таблиця 1.1. Порівняльний аналіз технологічних схем способів виготовлення криволінійних деталей

Найменування способу виготовлення криволінійних деталей	Структура технологічного процесу																		
	Розкрій круглих сортиментів	Розкрій пиломатеріалів на заготовки	Гідротермічна обробка	Лущення шпону	Розкрій шпону	Сушіння	Первинна механічна обробка заготовок	Сортування шпону	Починка шпону	Приготування клею	СВЧ-нагрів	Пропарювання заготовок	Гнуття	Сушіння в шаблонах	Охолодження шаблонів	Склеювання	Калібрування щита	Розкрій на заготовки	Кінцева механічна обробка
1. Спосіб випилювання з масивної деревини	●	●				●	●			●						●	●	●	●
2. Склеювання з одночасним гнуттям	●		●	●	●	●		●	●	●						●		●	●
3. Гнуття масивної деревини (традиційне)	●	●				●	●					●	●	●					●
4. Запропонована технологія гнуття	●	●				●	●				●		●		●				●

Як свідчать дані таблиці 1.2, переваг у технології гнуття значно більше, ніж недоліків. До того ж у багатьох випадках випилювання не може замінити гнуття, зокрема при виробництві гнутих стільців із масивної деревини.

Подальше розширення можливостей застосування гнуття можливе за умови усунення недоліків, притаманних цьому методу.

Спеціальне обладнання для такого процесу включає пропарювальні котли, гнударні верстати та шаблони.

Використання пропарювальних котлів пов'язане з потребою в парі, що вимагає функціонування котельні. Заміна таких котлів на СВЧ-нагрівачі дозволяє усунути цю проблему, оскільки електроенергія є доступною практично повсюдно.

Зменшення кількості шаблонів, що використовуються у виробництві, можливе за рахунок зниження вологості заготовок під час гнуття [5], що, у свою чергу, скорочує тривалість стабілізаційного сушіння.

Гнударні верстати не відносяться до складного обладнання й можуть виготовлятися на замовлення за наявними кресленнями.

Тривалість усього технологічного циклу визначається часом пропарювання та сушіння. На сучасному етапі розвитку виробництва доцільно замінити малопродуктивні пропарювальні котли СВЧ-установками. Це дасть змогу не лише значно зменшити інерційність процесу пластифікації, а й створити сприятливі умови для гнуття масивної деревини.

Наприклад, для нагрівання заготовки задньої ніжки стільця розмірами  $40 \times 40 \times 1020$  мм до температури близько  $100$  °С у пропарювальному котлі потрібно приблизно 35 хвилин. За допомогою СВЧ-нагрівання на це достатньо 1–2 хвилин. Крім того, за початкової вологості нижче 25% час пропарювання збільшується на 5 хвилин за кожен відсоток вологості, що нижчий від зазначеного значення [6]. Це суттєво ускладнює можливість зниження вологості під час гнуття.

Для забезпечення необхідної міцності при випилюванні поперечний переріз заготовки доводиться збільшувати, оскільки перерізання волокон значно

послаблює матеріал. Збільшення перерізу, однак, призводить до зменшення виходу готових виробів з одного й того ж об'єму деревини.

Норми витрат пиломатеріалів хвойних і листяних порід на виготовлення гнутого й столярного стільця згідно з [7] наведені у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3. Норми витрати пиломатеріалів хвойних і листяних порід на виробництво стільців

Пиломатеріал	Норма витрати на виріб, м <sup>3</sup>	
	Гнутий стілець	Столярний стілець
Пиломатеріал листяний	0,024–0,03	0,034–0,038
Пиломатеріал хвойний	---	0,002–0,003

Як видно з таблиці 1.3, для виготовлення столярного стільця потрібно приблизно у 1,4–1,5 рази більше пиломатеріалів.

Традиційна технологія гнуття заготовок із масивної деревини включає такі етапи:

- сушіння пиломатеріалів до вологості 25–30%;
- розкрій матеріалу на заготовки;
- пластифікацію деревини;
- власне гнуття;
- стабілізацію отриманої форми.

Оптимальною для процесу гнуття вважають вологість, яка наближається до межі гігроскопічності (25–30%). Досушування до кінцевої вологості (6–8%) виконують безпосередньо в шаблонах, коли деталь вже перебуває у зігнутому стані. Така технологічна особливість значно знижує коефіцієнт використання сушильних камер, потребує великих трудових та енергетичних витрат, а також великої кількості оснастки (шин, шаблонів тощо), що збільшує тривалість усього циклу.

Питання вдосконалення технології гнуття було предметом досліджень багатьох учених. Проведені роботи можна умовно поділити на такі напрями:

- вивчення реологічних властивостей деревини під впливом температури, вологості та навантаження;
- удосконалення методів пластифікації та стабілізації вигнутої форми;
- розробка нових способів гнуття та створення сучасного обладнання.

## **1.2. Вплив температури, вологості та навантаження на реологічні властивості деревини**

Зміна температури та вологості навантаженої деревини супроводжується складними деформаційними процесами, що проявляються трансформацією наявних і виникненням нових видів деформацій. Особливості такої поведінки зумовлені ієрархічною будовою деревини (від макро- до нанорівня), а також хімічною природою її компонентів і їх надмолекулярною організацією.

Підвищення температури призводить до істотних змін у структурі деревини. Дослідження [8] показують, що зниження міцності при нагріванні обумовлене руйнуванням міжволоконних зв'язків і розшаруванням клітинних стінок. За температур до 75 °С переважають поперечні розриви волокон, тоді як у діапазоні 150–170 °С інтенсифікуються внутрішньостінкові порушення, пов'язані з переходом лігніну у розм'якшений стан. За температур близько 190 °С ці зміни стають необоротними для більшості порід.

Встановлено, що лігнін переходить у термопластичний стан приблизно при 165–175 °С, причому наявність вологи знижує температуру його розм'якшення та розширює відповідний інтервал. Нагрівання деревини за температур, вищих за температуру сушіння, сприяє об'ємній стабілізації, але супроводжується зменшенням міцності та опору вигину.

Результати численних досліджень свідчать, що тривале нагрівання за відносно низьких температур викликає глибші структурні зміни, ніж короточасний вплив високих температур. При цьому зростає частка лігніноподібних сполук, що утворюються внаслідок термічного розкладу вуглеводів, передусім геміцелюлоз. У діапазоні 70–100 °С починається їх деструкція, тоді як за температур нижчих за 70 °С термічний розклад компонентів деревини практично не відбувається.

Вплив температури та вологовмісту на механічні властивості деревини, а також на температуру склування її полімерних компонентів, детально досліджено в працях вітчизняних і зарубіжних авторів [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]. Узагальнення цих результатів наведено в таблиці 1.4 авторів [16]

Таблиця 1.4. Зміни в сухій деревині, зумовлені впливом температури в інертній атмосфері

Температура, °С	Зміни, що відбуваються в деревині
55	У природному лігніні починають відбуватися структурні зміни, а геміцелюлози піддаються початковому розкладанню
70	Деревина починає зазнавати поперечної усушки
110	Спостерігається поступове зменшення маси лігніну
120	Кількість геміцелюлоз зменшується, тоді як частка $\alpha$ -целюлози зростає; лігнін переходить у розм'якшений стан
140	З деревини виходить зв'язана волога
160	Розм'якшений лігнін знову починає твердіти
180	Після втрати приблизно 4% геміцелюлози починають інтенсивно втрачати масу
200	Маса деревини помітно зменшується
210	Вище цього порогу целюлоза втрачає воду, лігнін переходить у твердий стан, а сама целюлоза — розм'якшується й зазнає деполімеризації; ендотермічні процеси змінюються екзотермічними
225	Кристалічна структура целюлози спершу порушується, а згодом відновлюється
280	Лігнін втрачає близько 10% маси, а целюлоза починає зменшувати свою масу
288	Орієнтовна температура, за якої деревина починає обвуглюватися
320	Геміцелюлози повністю розкладаються
370	Целюлоза втрачає 83% початкової маси
400	Деревина повністю карбонізована

Однак Faix та його колеги [17] зазначають, що термічна поведінка лігніну має певні особливості. Зокрема, структура лігніну може почати змінюватися вже при 47 °С, а втрата маси спостерігається в інтервалі 180–200 °С.

За даними Irvine [18], у зоні вільної води температура склування лігніну становить 60–90 °С. Back і Salmén [10] вказують, що у висушеному стані склування деревних полімерів відбувається за значно вищих температур, коли швидкість їхнього розкладання вже помітно зростає. Температура склування целюлози становить 200–250 °С, а геміцелюлоз — у межах 150–220 °С.

Fujita і Kishimoto [19] проаналізували вплив вологості на температуру склування аморфних полімерів і встановили, що збільшення вологості знижує температуру їхнього склування, оскільки вода з низькою молекулярною масою діє як пластифікатор.

Було проведено дослідження впливу температури та вологості на модуль пружності дуба під час статичного вигину [20]. Встановлено, що підвищення температури за одночасного зниження вологості сприяє збільшенню еластичності деревини під час гнуття. З отриманих залежностей видно, що модуль пружності при  $T = 180$  °С і  $W = 10\%$  дорівнює модулю при  $W = 25\%$  і  $T = 100$  °С. Якщо вологість зразка становить 12%, то температуру нагрівання можна зменшити до 170 °С.

Т. П. Хмелідзе та колеги [21] досліджували, як змінюється модуль пружності деревини сосни й модрина під час стискання вздовж волокон **при нагріванні**. З'ясовано, що в інтервалі температур 20–100 °С значення короткочасного модуля пружності залишаються майже незмінними. Проте за температур понад 100 °С вони різко зменшуються і при 230 °С становлять лише 34% для сосни та 38% для модрина від показників контрольних зразків.

У роботі Т. П. Хмелідзе та ін. [22] було проаналізовано вплив температури на міцність і деформаційні властивості деревини сосни та модрина в широкому діапазоні — від 20 до 230 °С. Результати випробувань свідчать, що зі зростанням температури деформації зразків збільшуються незалежно від типу напруженого стану

В. Н. Волинський [23] отримав єдину залежність міцності (при розтягу, стиску, сколюванні та вигині) і модуля пружності при вигині від комплексу температурно-вологісних факторів.

Для точного опису напружено-деформованого стану деревини, зокрема під час гнуття, необхідно мати дані про її деформативність і міцність з урахуванням часу — тобто про її реологічні властивості. Структура основних компонентів деревини, полімерної природи з довгими й гнучкими макромолекулами, зумовлює специфічний характер деформування під дією навантаження в часі.

Під прикладеним навантаженням у полімерів виникають три типи деформацій: миттєві пружні ( $\epsilon_{\text{п}}$ ), високоеластичні ( $\epsilon_{\text{вe}}$ ) та в'язкотекучі або деформації повзучості ( $\epsilon_{\text{в}}$ ). Пружна деформація проявляється миттєво як оборотна зміна середніх відстаней між частинками. Високоеластична деформація пов'язана з оборотним перегрупуванням ланок полімерних ланцюгів. В'язкотекуча деформація є результатом незворотного зсуву макромолекулярних ланцюгів [9].

У полімерів, зокрема при підвищених температурах, високоеластична деформація майже завжди супроводжується течією, тобто формуванням незворотних деформацій [24]. Пружна складова зникає з часом, тоді як необоротні деформації залишаються після зняття навантаження.

Деформування полімерів є релаксаційним процесом, швидкість якого характеризується часом релаксації — величиною, постійною для даної системи і такою, що визначає темп експоненціального згасання напружень. Для різних полімерів час релаксації різниться. Невеликі значення відповідають рухам сегментів макромолекул, великі — зміні їх конформації або взаємному переміщенню цілих макромолекул. Підвищення температури зменшує часи релаксації, хоча різниця між ними залишається значною.

Час, потрібний для повного зникнення еластичної деформації й завершення релаксаційних процесів, визначається тривалістю прикладеного навантаження. Величина незворотної деформації залежить від рівня та тривалості дії навантаження, а також від вологості та температури деревини. Зі збільшенням часу навантаження частка залишкової деформації зростає, накопичуються необоротні зміни.

За вологості вище межі насичення клітинних стінок і за кімнатної температури не лише геміцелюлози, а й усі аморфні ділянки целюлози перебувають у високоеластичному стані [25], що пояснює появу значних деформацій, частина

яких є незворотною. За вологості 7% ці компоненти переважно перебувають у склоподібному стані, тому навіть збільшення напружень не викликає великих залишкових деформацій.

Особливий інтерес під час згинання деревини становлять два ефекти: «пам'яті» та механо-сорбційний.

Наприкінці 1970-х років Б. Н. Угольов і Е. Б. Щедріна [26, 27] експериментально встановили наявність у деревини ефекту «пам'яті» щодо температури, за якої вона перебувала під навантаженням. Це явище пов'язане з переходом частини пружно-еластичних деформацій у квазі-залишкові, які згодом отримали назву «заморожених». Такі деформації не є повністю необоротними: при повторному нагріванні або зволоженні вони зникають. Їх величина визначається різницею між деформаціями у пластифікованому та стабілізованому станах деревини.

Ефект «пам'яті» форми відомий для різних матеріалів, зокрема деяких металів та їхніх сплавів.

У деревині цей ефект виникає внаслідок тимчасових змін у надмолекулярній структурі її складників. У роботах [26, 27] докладно досліджено, як змінюються напруження під час зміни температури при фіксованих деформаціях. Під час випробувань на розтяг і стиск кедра та дуба вивчали, як поведуться напруження в навантаженій деревині та як вони проявляються у розвантажених зразках, де заморожені деформації намагаються повернутися. Було встановлено, що деревина зберігає інформацію про температуру навантаження. Якщо її нагріти вище цієї температури, характер зміни напружень змінюється, зокрема спостерігається різке зниження напруження, пов'язане зі спадом модуля пружності.

У 1970-х роках [28] Б. Н. Угольов запропонував модель гігро-термомеханічних деформацій, яка враховує, що під час зміни вологості та температури в навантаженій деревині виникають не лише зворотні пружні  $\epsilon_e$  й еластичні  $\epsilon_v$  деформації та незворотні деформації повзучості, але й квазі-необоротні заморожені деформації. Ця модель дозволяє описати поведінку деревини за різних історій навантаження, нагрівання, охолодження і зволоження.

Упродовж останніх п'ятдесяти років зарубіжні дослідники запропонували багато моделей деформування деревини, здебільшого спрямованих на опис напружено-деформованого стану під час сушіння [9]. У таких моделях силові складові деформації поділяють на пружні, еластичні та механо-сорбційні.

У практиці згинання масивної деревини найбільше значення має повзучість, тоді як релаксація відіграє другорядну роль. Повзучість різко зростає, якщо вологість деревини змінюється, поки вона перебуває під навантаженням. Це пов'язано з механо-сорбційним ефектом [9].

Механо-сорбційні деформації виникають тоді, коли деревина зазнає навантаження за умов, коли її вологість змінюється. L. D. Armstrong і R. S. Kingston [29] встановили, що під час згину деформації дерев'яних балок різко збільшуються, якщо вологість циклічно змінюється: після 50 циклів загальна деформація збільшилася в 11 разів. Це явище отримало назву механо-сорбційної повзучості.

Grossman [30] систематизував ключові особливості механо-сорбційного ефекту. Серед них:

- механо-сорбційні деформації не пов'язані з часом;
- прогини зростають як при зволоженні, так і при висиханні;
- максимальна деформація зберігається після зняття навантаження, якщо вологість стала; при повторному зволоженні частина деформації повертається;
- перший цикл зволоження або висушування збільшує прогин, але наступні цикли дають менший ефект;
- багаторазові цикли зміни вологості призводять до руйнування зразків.

Як і у випадку звичайної повзучості, зростання напружень, вологості, температури та ширини коливань цих параметрів збільшує величину механо-сорбційних деформацій.

Експериментально також підтверджено наявність синергетичного ефекту [9], за якого одночасна дія температури та вологості спричиняє значно більшу зміну величини «заморожених» деформацій, ніж окремий вплив цих факторів. Подібне явище спостерігається і при сумісній зміні вологості та температури, що впливає на міцність деревини, яка тісно пов'язана з її жорсткістю.

У роботі R. W. Rice та ін. [31] продемонстровано, що зменшення вологості та швидкості згинання призводить до зниження роботи (енергії). Експерименти проводилися на зразках червоного дуба при температурі 180–190°F. Вологість змінювали під час навантаження, щоб спричинити розвиток механо-сорбційної повзучості. Підвищення швидкості навантаження від 0,2 до 1,0 дюйм/хв збільшило роботу на 41%, а від 1,0 до 5,0 дюйм/хв — ще на 32%. Зростання вологості з 12 до 15% спричинило зниження витраченої роботи на 32%.

### 1.3. Огляд способів пластифікації та стабілізації деревини

Більшість відомих способів підвищення пластичності деревини базуються на частковому руйнуванні сітчастої структури її матриці [32]. Найпоширенішим методом пластифікації є **гідротермообробка** [1]. Під час **пропарювання** відбувається деструкція водневих зв'язків, що зменшує жорсткість деревини та дає змогу ущільнювати її з невеликими енергозатратами. Проте виникаючі деформації є зворотними, і зберегти їх можливо лише **шляхом висушування**, яке відновлює та зміцнює водневу сітку. Якщо під час повторної обробки пластифікатором (яка супроводжується релаксацією напружень) відбувається настільки ж глибоке порушення водневих зв'язків, як і під час первинної обробки, деформації повертаються до початкового стану.

Фізична природа розм'якшення деревини під дією гідротермічної обробки полягає у тимчасовому переведенні її зі «склоподібного» стану, характерного для нормальних температур і вологостей, у стан вимушеної еластичності. У цьому стані деревина здатна витримувати значні пружні деформації без руйнування за дії порівняно невеликих навантажень [33].

Обробка 25%-м розчином **аміаку** спричиняє втрату маси 4% у сосни та 6% у берези. Аміак ефективно пластифікує переважно листяні породи. Додавання 1% ПАР на основі поліоксіетилену істотно підсилює його дію та розширює застосування на хвойні породи [32]. Пластифікація деревини аміаком — це не лише фізичний, а й хімічний процес, оскільки аміак взаємодіє з компонентами деревини, утворюючи продукти амінування. За даними Шоригіної та

співавт. [34], під час амінування лігніну водними розчинами аміаку в лігнін можна ввести до 18% азоту.

Пластифікувальні властивості **карбаміду** використовувалися під час гнуття деревини [35]. В основу робіт, проведених у США та Англії, було покладено спостереження Лафборо, який установив, що повітряно-суха деревина, просочена карбамідом, за температури 373 К розм'якшується і після охолодження до кімнатної температури повертається до властивих їй твердості та жорсткості. Для цього деревину у вигляді брусків просочують 40% водним розчином карбаміду методом холодної ванни до повного насичення та висушують при температурі не вище 333 К, оскільки за вищих температур карбамід розкладається і втрачає свої пластифікувальні властивості.

Водночас із літературних даних відомо [35], що при нагріванні вище 406 К карбамід перетворюється на біурет, а при нагріванні понад 436 К відбувається утворення амеліду та ціанурової кислоти. Останні є гідрофобними продуктами, здатними надавати деревині водо- та вологостійкість.

Ефективним **способом стабілізації форми** та розмірів деревини є **блокування функціональних груп**, відповідальних за набухання, насамперед гідроксильних груп вуглеводної складової. Для цього деревину просочують дибутилфталатом, азотовмісними сполуками, амінами, гліфталем, окисами алкіленів та іншими хімічними сполуками.

Найбільшого поширення для стабілізації деревини набули способи введення в неї синтетичних мономерів, олігомерів і полімерів [36]. При цьому використовують переважно три види смол:

- а) фенолоформальдегідні смоли (фенолоспирти, СБС тощо);
- б) смоли фуранового ряду;
- в) поліефірні смоли.

Одним із найефективніших методів стабілізації розмірів і форми деревини є її ацетилювання. Цей спосіб хімічної модифікації розроблений К. П. Швальбе. Його сутність полягає в тому, що під час ацетилювання більш гідрофільні ОН-групи компонентів деревини заміщуються менш гідрофільними ацетильними групами, утворюючи складний ефір оцтової кислоти й деревини, що

значно покращує гідрофобні властивості. Отримують практично формостійку деревину [37].

За результатами М. Makinaga та ін. [38], повна фіксація деформації можлива також шляхом пропарювання в автоклаві при близько 180°C.

Перспективним методом є **технологія «термодеревини»** [39], унаслідок якої частково розкладаються геміцелюлози, активізується лігнін, утворюються термореактивні смоли, що зміцнюють структуру деревини. Така обробка зменшує розбухання та усадку на 20–50%, підвищує стійкість до гниття й дозволяє застосовувати матеріал без додаткового захисту в зовнішніх умовах.

Суть методу полягає в тому, що під дією тривалого гідротермічного впливу геміцелюлоза розкладається на дрібніші реакційно здатні молекули, аналогічним чином активізується й лігнін. Унаслідок взаємодії цих компонентів утворюються термореактивні смоли, які вкривають волокнисту структуру целюлози, формуючи матеріал із підвищеною жорсткістю. Така модифікована деревина відзначається високою стійкістю до гниття та може застосовуватися для зовнішніх робіт без додаткового захисту.

#### **1.4. Удосконалення способів і розробка нового обладнання для гнуття заготовок**

Гнуття масивної деревини здійснюють за холодною або гарячою технологією. За холодного способу заготовки деформують без попередньої гідротермічної чи термічної підготовки, тобто без зниження їх природної пружності. Гарячі методи передбачають гідротермічну (пропарювання) або термічну обробку (зокрема СВЧ-нагрів), метою яких є тимчасове зменшення модуля пружності деревини при вигині приблизно на 50–60 %, що підвищує її пластичність у процесі гнуття. Водночас такі технології супроводжуються додатковими енергетичними та виробничими витратами порівняно з холодним способом.

За даними [1], заготовки з бука доцільно гнути за початкової вологості 30–33 % після рівномірного прогрівання до 100 °C; за цих умов можливе співвідношення товщини заготовки до радіуса вигину на рівні 1–1,5. Результати досліджень Братиславського НДІ деревини [40] визначають оптимальні параметри

гнуття: температура пари — 100 °С, температура деревини після пропарювання — близько 70 °С, торцевий тиск — 15–30 МН/м<sup>2</sup>, вологість заготовок — 30–32 %, швидкість гнуття — 30–60 град/с, допустимий косошар — не більше 4°.

Альтернативним і перспективним підходом є гнуття з використанням мікрохвильового нагріву. Як показано в роботах [41], СВЧ-обробка є особливо ефективною для вологої деревини, оскільки енергія поглинається переважно водою. До основних переваг цього методу належать рівномірний розподіл вологи по перерізу, інтенсивний і однорідний прогрів, суттєве скорочення тривалості підготовки (нагрів заготовки товщиною 20 мм до 100 °С триває близько 1 хв), підвищення продуктивності процесу та розширення переліку порід, придатних до гнуття. Крім того, температурний режим легко піддається регулюванню, що спрощує оптимізацію технологічного процесу.

Дослідження свідчать, що для досягнення значних деформацій доцільно здійснювати СВЧ-нагрів вологої деревини з одночасним гнуттям у процесі сушіння, що забезпечує підвищену пластичність і кращу фіксацію наданої форми.

У патенті М. Norimoto [42] описано спосіб формування деревини та деревних матеріалів (фанера, ДВП, ДСП тощо) у задану форму: зволожена заготовка піддається одночасному згинанню й сушінню під дією мікрохвиль. Оскільки за підвищеної вологості деревина має високу пластичність і значні деформації повзучості, а нагрівання та переміщення вологи збільшують цей ефект, метод виявляється економічним та ефективним.

У Румунії запатентовано спосіб [43] надання деревині пластичності за допомогою ультразвукових коливань. Біля гнутарного верстата з горизонтально обертовим шаблоном встановлюється магнітострикційний ультразвуковий передавач потужністю 25 Вт/см<sup>2</sup> на частоті 18 кГц. УЗ-обробка зменшує модуль пружності й жорсткість деревини, а зі збільшенням амплітуди вібрацій опір вигину знижується приблизно на 23 %.

У США запатентовано спосіб гнуття деревини [43], який передбачає заповнення тріщин на опуклому боці заготовки з одночасним нанесенням декоративного покриття шляхом введення в прес-форму синтетичних смол (епоксидних, поліефірних, фенолформальдегідних, акрилатних або нейлонових). Такий

підхід поєднує зміцнення та оздоблення деталі безпосередньо в процесі гнуття. Водночас його застосування обмежене: ефективність досягається лише за вологості заготовок 8–10 % і порівняно великих радіусів вигину (близько 1,2 м при товщині 30 мм), що не відповідає оптимальним умовам гнуття масивної деревини ( $W \approx 30\%$ ).

Окремий інтерес становить **технологія виготовлення компресійної деревини** (Compwood), запатентована компанією *Compwood Machines Ltd* [44]. Листяні пиломатеріали з вологістю близько 20 % піддають пропарюванню в автоклаві, після чого стискають уздовж волокон у спеціальному пресі на 20–25 %. У результаті після розвантаження деревина скорочується в довжині на 5–6 % і зберігає підвищену пластичність протягом тривалого часу за умови герметичного та холодного зберігання.

Компресійна деревина придатна до холодного гнуття, при цьому без ускладнень досягається співвідношення  $h/R \approx 1/6$ , а за використання спеціальної оснастки — і більші значення. Матеріал застосовується у виробництві меблів, сходів та декоративних виробів, не призначених для зовнішньої експлуатації, і особливо перспективний для виготовлення індивідуальної та дизайнерської продукції.

Разом з тим технологія Compwood має низку обмежень, зокрема незначне зниження міцності (на 5–10 %), потребу в спеціалізованому пресовому обладнанні та відносно тривалий виробничий цикл

Виробництво Compwood є дуже обмеженим і мало відомим. Воно налагоджене в Європі (*Compwood Machines Ltd*), Північній Америці (*Bethel Furniture Stock, Fluted Beam*) та Азії. Основними споживачами цієї технології є меблеві підприємства.

У патенті Thomassen та ін. [43] описано спосіб і обладнання (прес) для стискання дерев'яних заготовок уздовж волокон. Запропонований горизонтальний прес складається з трьох модулів: стискального вузла, гідросистеми та електронно-обчислювального блоку. Конструкція забезпечує однаковий ступінь ущільнення по всій довжині заготовки.

У колишній Чехословаччині було запатентовано [43] конструкцію високопродуктивного **верстата** для гнуття ніжок стільців. Верстат працює автоматично, обладнаний нагрівальними елементами та гнучкою металевою стрічкою. Передбачено можливість регулювання величини вигину. Контроль форми здійснюється кінцевими вимикачами. Після висихання зігнуті деталі автоматично виймаються.

На основі теоретичних досліджень розподілу деформацій і напружень по товщині зігнутих брусків Л. А. Манкевич [431] запропонував удосконалену схему напівавтомата ротаційної дії для гнуття деталей замкнутого контуру.

Для збільшення площі контакту при складному гнутті та запобігання вдавлюванню ролика в розтягнуту сторону заготовки, ролик замінюють пресувальною площиною — балкою. Тиск передається через балку, тому деформація виникає лише зі сторони шаблону, а з боку балки волокна не подовжуються.

У сфері механічного гнуття клепок для бондарного виробництва було створено пристрій [45] для безперервного гнуття. Метою розробки є підвищення ефективності процесу. Установка являє собою конвеєр, який складається з двох нагрітих металевих корпусів із формою поверхні дерев'яних бочок. Вони оснащені системою гнучких сталевих стрічок — шин.

### **1.5. Теоретичні та прикладні аспекти промислового виробництва гнутої деревини**

Процеси гнуття деревини характеризуються складним напружено-деформованим станом матеріалу. Під час згину в поперечному перерізі виникають нормальні напруження: розтягувальні на опуклій стороні та стискувальні на увігнутій, між якими розташований нейтральний шар із нульовими напруженнями. Нерівномірність їх розподілу зумовлює появу зсувних напружень, тому згинання завжди супроводжується розтягуванням зовнішніх і стисканням внутрішніх шарів заготовки.

Деформація деревини є неоднорідною через її анізотропну та структурно різнорідну будову. У практичних розрахунках міцність оцінюють за середніми напруженнями, хоча локальні істинні деформації можуть у кілька разів

перевищувати середні значення. В окремих зонах виникають перевантаження, що визначає небезпеку руйнування, тому доцільно розрізняти середні та максимальні деформації.

Здатність деревини до гнуття визначається граничною деформацією зовнішнього шару без руйнування. Під час гнуття навіть вологої або пропареної деревини реалізуються не лише пружні, а й пластичні деформації, які переважно формуються в зоні стискання у вигляді незворотних складок. Після гідро-термічної обробки глибина пластичних зон зростає, що підвищує ризик пошкоджень у місцях максимального стиску.

Величина деформацій розтягування і стискання залежить від товщини бруска та радіуса вигину. Співвідношення  $h/R$  визначає межу згинання деревини:

$$h/R = (\varepsilon_z + \varepsilon_d) / (1 - \varepsilon_d), \quad (1.1)$$

де:  $h$  — товщина заготовки, мм;

$R$  — мінімально можливий радіус згину, мм;

$\varepsilon_p$  і  $\varepsilon_c$  — граничні відносні деформації під час розтягування та стискання відповідно.

Допустимий радіус шаблону при гнутті без шини визначають за нерівністю:

$$[R] \geq 2h \eta / \varepsilon_p (\eta + 1)^2, \quad (1.2)$$

де:  $\eta = \sigma_p / \sigma_c$ ;

$\sigma_p$  і  $\sigma_c$  — межа міцності деревини на розтяг і стиск уздовж волокон, МПа.

Якщо застосовується шина, мінімальний радіус форми визначають за формулою:

$$R_{\min} = h(1/\varepsilon_p - 1) \quad (1.3)$$

Бездефектне гнуття можливе лише доти, доки відносне видовження зовнішніх шарів або відносне стискання внутрішніх не перевищує допустимі значення для конкретного матеріалу.

Нейтральна лінія у деревини зміщується в бік опуклої частини. Під час вільного гнуття руйнування зазвичай відбувається через розрив зовнішніх розтягнутих шарів.

При згині бруска робота деформацій розтягування в момент руйнування має дорівнювати роботі деформацій стискання (див. рис. 1.1). Ці роботи

зображені заштрихованими областями на діаграмі [1]. Порівняння площ показує, що повністю використати здатність пропареної деревини до стискання без додаткових технологічних заходів неможливо



Рисунок 1.1. Графіки залежності напружень від деформацій пропареної деревини бука під час гнуття: I — розтягування; II — стискання

Можливості гнуття пропареної деревини обмежуються незначною величиною допустимих деформацій розтягування, які фактично не дозволяють перевищувати відношення  $h/R=1/30$ .

Застосування шини у вигляді сталевий стрічки, накладеної на опуклу частину заготовки й обладнаної упорами для торців бруска, суттєво розширює можливості гнуття. Така конструкція зміщує нейтральний шар до зовнішньої сторони заготовки, завдяки чому під час гнуття деревина працює переважно на стискання, а деформації розтягування залишаються в допустимих межах.

Теоретичний аналіз, наведений у [43], показує, що нейтральна вісь ненагрітої заготовки при роботі системи «брусок—шина» розташована на відстані  $0,3h$  від опуклої поверхні — зони розтягування. За експериментальними даними, у нагрітій деревині вона зміщується до  $0,28h$ .

Товщину шини визначають за формулою [41]:

$$S=h(\sigma_p/\sigma_c-1)/2(m \sigma_p/\sigma_c-1), \quad (1.4)$$

де:  $\sigma_p$  і  $\sigma_c$  - нормальні напруження розтягування та стискання, МПа;

$m$  — відношення модуля пружності сталі до модуля пружності деревини.

Розрахунок шини таким способом дозволяє врахувати фізико-механічні властивості деревини та її пружно-пластичний стан.

Щоб запобігти відриву та розриву волокон на опуклій стороні заготовки на початковій стадії гнуття, шині надають попереднього натягу, стискаючи брусок упорами, розташованими на її кінцях.

Попереднє натягування визначається співвідношенням [43]:

$$e = h^2 \rho + h^2 2E \rho^2, \quad (1.5)$$

де:  $\rho$  - радіус нейтральної осі, мм;

$E$  - модуль пружності, МПа.

Постійне натягнення шини є необхідною умовою для забезпечення максимального допустимого розтягування зовнішніх волокон під час гнуття. У міру збільшення їхньої довжини натяг автоматично зменшується завдяки переміщенню рухомого упора.

Мінімальні радіуси бездефектного гнуття досягаються за умови, коли робота деформацій стискання врівноважує сумарну роботу деформацій розтягування деревини та шини. Це забезпечується відповідним регулюванням положення упорів і геометрії гнутарного пристрою.

Через значні зсувні напруження, що можуть спричинити сколювання вздовж волокон, гнуття не доводять до торців заготовки. Для хвойних і м'яких листяних порід обов'язковим є застосування шини з рухомим упором і шаблону з насічкою, нахиленою у бік заднього упора, що запобігає зсуву внутрішніх шарів і утворенню складок. Такий підхід дає змогу гнути заготовки навіть із сучками на опуклій стороні.

Величина поперечного стискання при складному гнутті залежить від породи і в середньому становить: для сосни та ялини — 30–35%, ялиці — до 50%, модрина — близько 20%, берези — приблизно 25%. При цьому необхідно передбачати збільшений припуск по довжині заготовок

Практичні дослідження свідчать, що найкращі результати забезпечує гнуття деревини з вологістю **25–30%**.

Гідротермічна підготовка зазвичай включає **пропарювання** або **прова-рювання** в гарячій воді. Для пропарювання найчастіше використовують

насичену пару низького тиску 0,02–0,05 МПа (102–105°C). Проварювання застосовують тоді, коли пропарювання з технологічних причин ускладнене.

Для масивних заготовок використовують два типи гнударних верстатів:

- для неповної окружності,
- для повної окружності.

Під час гнуття важливо, щоб у твердих листяних породах (дуб, ясен, граб, ільм) річні шари були паралельними площині згину — інакше на ввігнутій стороні можуть з'являтися складки. У розсіяно-судинних листяних породах (бук, береза) та у хвойних, гнутих з пресуванням, річні шари повинні бути перпендикулярні площині згину.

При гнутті без пресування і особливо без шини найбільш чистою має бути поверхня, що розтягується, оскільки навіть незначні дефекти можуть стати причиною розривів і відщепів волокон.

## **1.6. Висновки**

1. Криволінійні деталі знаходять широке застосування у виробництві виробів із деревини.
2. Найбільш перспективним способом отримання криволінійних деталей є гнуття заготовок із масивної деревини.
3. Існуюча технологія гнуття не відповідає сучасному рівню виробництва.
4. Вузьким місцем традиційної технології є необхідність пропарювання та подальшого тривалого сушіння заготовок у шаблонах.
5. Традиційні способи пластифікації та стабілізації форми відрізняються або високими виробничими витратами, або не відповідають екологічним вимогам.
6. Еластичність деревини може бути підвищена завдяки термообробці без збільшення вологості, що створює передумови для гнуття заготовок у висушеному стані.
7. Технологічний цикл гнуття може бути скорочений за рахунок нагрівання заготовок у печах надвисокої частоти (СВЧ).

## 1.7. Мета та завдання дослідження

Проведений аналіз наявних літературних джерел показав, що значні досягнення, отримані в галузі гнуття масивної деревини в минулому, часто залишаються невикористаними. Основними причинами цього є високі енерговитрати, тривалість технологічного процесу гнуття, потреба у спеціалізованому обладнанні, а також необхідність у великій кількості різноманітних пристроїв.

Водночас метод гнуття має низку переваг, що роблять його важливим і затребуваним при виготовленні криволінійних деталей для меблів, столярних виробів, спортивного інвентарю, бондарних виробів, гнутих елементів суднобудування, музичних інструментів та ін.

З огляду на це, **метою дослідження** є розроблення — на основі теоретичних та експериментальних досліджень — технологічних режимів і обладнання для гнуття масивної деревини із застосуванням СВЧ-нагрівання. Це сприятиме ширшому впровадженню технології гнуття в деревообробній промисловості та дозволить вирішити актуальну проблему ефективного використання деревини й енергетичних ресурсів під час виготовлення криволінійних деталей.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати **такі завдання**:

- розробити режими нагрівання заготовок різної вологості до визначених температурно-вологісних станів у полі СВЧ;
- дослідити здатність деревини утримувати надану форму залежно від температурно-вологісних умов під час гнуття;
- сформулювати математичні моделі, які адекватно відтворюють процес гнуття деревини, і на їх основі розробити оптимальні технологічні режими;
- розробити технологію гнуття масивної деревини з низьким вмістом вологи;
- створити модель промислової лінії для гнуття масивної деревини та виконати розрахунок її основних параметрів

## 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

### 2.1. Обґрунтування вибору деревних порід для проведення досліджень та методика підготовки зразків

Для розроблення технології гнуття масивної деревини із застосуванням СВЧ-нагрівання обрали осику.

Осика (*Populus tremula* L.) — листяна порода родини вербових. Широко трапляється в Україні та Європі; швидкоросла, невибаглива до ґрунтів. Щільність низька — у середньому 430–470 кг/м<sup>3</sup> за вологості 12%. Деревина світла (білувато-сіра), однорідна, з дрібною текстурою, без вираженого річного шару. Механічні властивості невисокі: м'яка, помірно міцна, з невисокою жорсткістю; добре піддається різанню та обробці. Легко сушиться, має малу схильність до розтріскування; добре гнеться після гідротермічної обробки. Має низьку природну біостійкість, потребує захисту від гниття при зовнішньому використанні. Застосовують для внутрішніх оздоблювальних елементів, фанера, сірники, тара, столярні вироби, деталі меблів, а також у банях і саунах (через низьку теплопровідність і відсутність смол).

Щільність деревини осики залежить від вологості та умов зростання. Орієнтовні значення такі: у повітряно-сухому стані ( $W \approx 12\%$ ) — 400–450 кг/м<sup>3</sup>; абсолютно суха — 370–400 кг/м<sup>3</sup>; свіжозрубана — 700–800 кг/м<sup>3</sup>

Разом із тим, придатність осики до гнуття оцінюється як обмежено задовільна. Порода має порівняно низьку міцність при стисканні та розтягуванні вздовж волокон, а також невисокий опір поперечному стиску, що підвищує ризик утворення складок на увігнутій стороні та розривів на опуклій при малих радіусах кривизни. У холодному стані осика гнеться погано.

Застосування **гідротермічної обробки (пропарювання)** або інших методів пластифікації істотно підвищує її гнучкість і знижує модуль пружності, що дозволяє використовувати осику для гнуття за умови:

- достатньої початкової вологості заготовок;
- використання шини (металевої стрічки) з торцевими упорами;
- обмеження ступеня гнуття (помірні радіуси);
- відсутності значних дефектів будови (сучків, косошару).

Отже, осика може застосовуватися для виготовлення гнутих деталей простої форми та з відносно великими радіусами кривизни, переважно у внутрішніх елементах меблів або декоративних виробів, за умови правильно підбраного режиму пластифікації та гнуття.

Для виконання експериментальних досліджень використано деревину осики, заготовлену на території Львівської області. Основні випробування проводили на зразках двох типорозмірів —  $10 \times 20 \times 350$  мм і  $20 \times 20 \times 350$  мм, виготовлених відповідно до вимог ГОСТ 16483.21 (перший розмір відповідає радіальному напрямку, останній — напрямку вздовж волокон).

Під час підготовки зразків здійснювали контроль якості згідно з нормативними вимогами: зразки з тріщинами, сучками, гниллю та іншими дефектами до досліджень не допускалися. Кожен зразок маркували. Виготовлення зразків здійснювали за вологості деревини близько 12 %, яку визначали ваговим методом.

Геометричні розміри зразків вимірювали штангенциркулем за ГОСТ 166-89 з похибкою 0,025 мм та лінійкою за ГОСТ 17435-72. Температуру в сушильній шафі контролювали термометром відповідно до ГОСТ 2823-73. Густину деревини визначали згідно з ГОСТ 21523.11-79. Для доведення зразків до заданої вологості використовували кліматичну камеру СМ-70/180-80 ТХВО.

## **2.2. Експериментальна установка для пластифікації деревини перед гнуттям і методика СВЧ-нагрівання**

Рівні варіювання вхідних параметрів процесу нагріву наведені в таблицях 2.1–2.2.

Таблиця 2.1. Значення та рівні факторів УРП для зразків із деревини осики розміром  $20 \times 20 \times 350$  мм

Найменування фактора	Рівні варіювання				
	-1,41	-1	0	+1	+1,41
Початкова вологість, ( $W_H$ ), %	10	14	25	36	40
Тривалість нагріву (t), с	60	140	330	520	600

Таблиця 2.2. Значення та рівні факторів УРП для зразків з осики розміром 10×20×350 мм

Найменування фактора	Рівні варіювання				
	-1,41	-1	0	+1	+1,41
Початкова вологість, %	10	14	25	36	40
Тривалість нагріву (t), с	60	110	240	370	420

Під час експериментальних досліджень як основне обладнання застосовувалася мікрохвильова піч моделі NN-020038, технічні характеристики якої наведено в табл. 2.3. Для забезпечення рівномірного опромінення зразків піч оснащена обертовим столиком. Це зумовлено тим, що в робочій камері формується стояча електромагнітна хвиля, внаслідок чого окремі ділянки зразка можуть опинитися в зонах підвищеної або зниженої інтенсивності випромінювання. Додатково на зразки впливає хвиля, відбита від внутрішніх поверхонь камери та від самої деревини

Таблиця 2.3. Технічна характеристика мікрохвильової печі

Найменування показника	Значення
Джерело електроенергії	220 В, 50 Гц
Споживання електроенергії	
Мікрохвильовий режим	5,9 ампер, 1220 Вт
Максимум	8,2 ампер, 1800 Вт
Вихідна потужність:	
Мікрохвильовий режим	1000 Вт
Нагрівач	1800 Вт
Габаритні розміри	376 (Г) × 611 (Ш) × 490 (В) мм
Розміри камери печі:	242 (Г) × 412 (Ш) × 426 (В) мм
Комплект для внутрішнього оснащення:	МИ-ТК953Р
Робоча частота	2450 МГц

З метою перевірки величини енергії, що надходить у резонатор, визначалася уявна потужність випромінювання за методикою, описаною в роботі [50], яка ґрунтується на припущенні, що більша частина потужності, що потрапляє в СВЧ-резонатор, поглинається достатньо великим об'ємом діелектрика (див. формулу (2.1)).

Для зниження потужності, що підводиться до дерев'яного зразка, використовувалась вода у двох склянках із хімічного скла (кожна — по одному літру води). Схема розміщення зразка та склянок із водою показана на рисунку 2.1.

Таке розташування води в камері дозволило уникнути двох точок максимального підвищення температури вздовж довжини зразка через виникнення стоячих хвиль.



Рисунок 2.1. Розміщення зразка та склянок з водою в мікрохвильовій печі

Температура вимірювалася за допомогою термопар, що входять до комплекту приладів мультиметрів РТ-838. Для цього в зразку висвердлювалися отвори у двох перерізах (1 — посередині довжини, 2 — на відстані від торця зразка), по два в кожному перерізі (1 — на осі зразка, 2 — на відстані 1 мм від поверхні). Глибина свердління становила 10 мм. Процес вимірювання температури записувався на відеокамеру. Таким чином здійснювався безперервний контроль показань чотирьох мультиметрів одночасно.

Такий спосіб вимірювання температури був обраний як найбільш простий серед існуючих [50] і не потребував внесення змін у конструкцію мікрохвильової печі.

Температура заготовки, виміряна на відстані  $\frac{1}{2}b$  від торця зразка (середнє арифметичне двох вимірів), є середньою температурою зразка, що було підтверджено попередніми експериментами.

Час нагріву задавався таймером, яким оснащена піч. Суть експериментів полягала в наступному: зразок зважувався на вагах ВК-300 та розміщувався в печі. Після закінчення нагріву він діставався з камери, і в нього одночасно вводилися чотири термопари. Під час обробки відеозаписів визначалась максимальна температура, що відображалася на табло кожного з мультиметрів. Також вимірювалася температура води в склянках і маса зразка після нагріву.

Теоретичне визначення потужності, що йде на нагрів зразка до заданої температури, є складною задачею, оскільки температурне поле нерівномірне, і важко розрахувати потужність, що витрачається на теплові втрати. Проте ця задача значно спрощується, якщо нагрівати зразок разом з іншим матеріалом, у якому температура розподілена рівномірно.

Як поглинач енергії, що випромінюється магнетроном і надходить у резонатор, використовувалась вода. Потужність, що виділялася у воді, визначалась калориметричним методом і розраховувалась за формулою [50]:

$$P_{\text{погл}} = K \cdot C_p \cdot m \cdot \Delta T / t \quad (2.1)$$

де:  $P_{\text{погл}}$  — уявна потужність, поглинута речовиною, Вт;

$K$  — коефіцієнт перерахунку теплових кал/с у Вт ( $4,184 \text{ Дж} \cdot \text{кал}^{-1}$ );

$C_p$  — питома теплоємність,  $\text{кал} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{°C}$ ;

$m$  — маса речовини, г;

$\Delta T$  — різниця між кінцевою та початковою температурою,  $\text{°C}$ ;

$t$  — час, с.

У дослідах використовувалося 2 кг води. За такої великої маси вважається, що майже вся енергія поглинається. Проте уявна потужність зменшується зі збільшенням часу нагріву через теплові втрати.

Під час спільного нагрівання дерев'яного зразка та води частина енергії, що зазвичай поглинається водою, витрачається на нагрів зразка. Відповідно, зменшення потужності, що виділяється у воді, еквівалентне потужності, поглинутій деревиною.

Залежність, наведена на рисунку 2.2, є коректною за умови, що перед кожним дослідом мікрохвильова піч охолоджується до початкової температури. З цією метою після кожного експерименту охолодження установки здійснювали примусовою вентиляцією за допомогою офісного вентилятора.

Вологість зразків визначали ваговим методом відповідно до ГОСТ 16483.7–71 «Деревина. Метод визначення вологості» з точністю до 0,1 %. Розрахунок проводили за формулою:

$$W=100(m-m_0)/m_0 \quad (2.2)$$

де:  $W$  — вологість зразка, %;

$m$  — маса зразка у вологому стані, г;

$m_0$  — маса зразка в абсолютно сухому стані, г.

### 2.3. Методика дослідження стабілізації форми деревини залежно від різних температурно-вологісних умов

Зразки осики розміром 10×20×350 мм розмічалися (як показано на рисунку 2.2) та нагрівалися в СВЧ-печі для отримання заданого температурно-вологісного стану. Рівні варіювання вхідних параметрів наведені в таблиці 2.4.

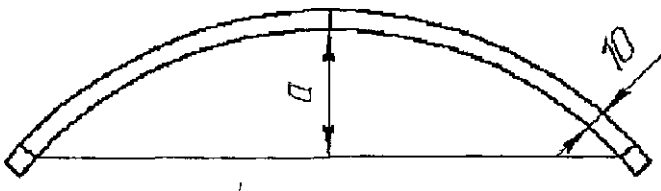


Рисунок 2.2 — Схема визначення прогину зразка

Таблиця 2.4. Значення та рівні факторів УРП

Найменування фактора	Рівні варіювання				
	-1,41	-1	0	+1	+1,41
Вологість, %	8	10	14	18	20
Температура ( $T_{sr}$ ), °C	80	86	100	114	120

Експерименти виконувалися на спеціально виготовленому стенді, зображеному на рисунку 2.3.

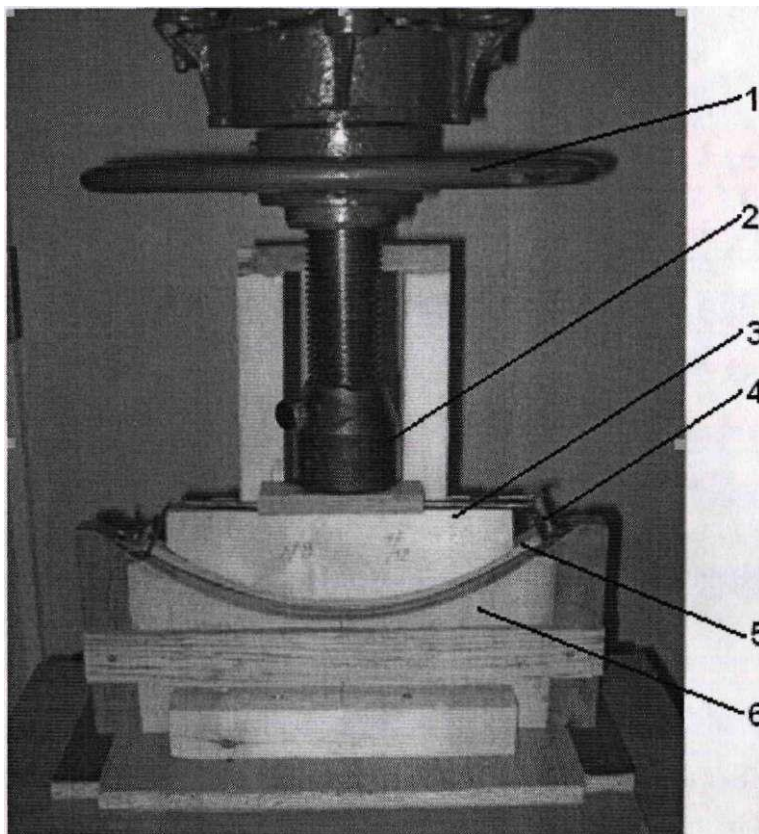


Рисунок 2.3. Лабораторний стенд і оснащення для згинання:

1 – колесо гвинтового преса; 2 – притискна головка гвинта; 3 – шаблон (пуансон); 4 – шина з торцевими упорами; 5 – випробуваний зразок; 6 – матриця.

Шаблон (пуансон) виготовлено з деревини дуба таким чином, що навантаження він сприймає в напрямку вздовж волокон. Для запобігання можливим сколам шаблон був облицьований березовим шпоном з двох боків. Матрицю виготовлено з фанерної плити.

З метою забезпечення однакової структури деформацій для зразків з різним гігро-термічним станом у всіх дослідах використовувалася сталева шина завтовшки 1,1 мм. Попередні розрахунки показують, що за такої товщини весь переріз зразка перебуватиме під дією стискальних напружень.

Алгоритм випробувань був таким. Одразу після нагрівання заготовка укладалася на шину. Навантаження здійснювалося за допомогою гвинтового преса. У результаті згинання досягалося співвідношення  $k/R = 1/24$ . Надана форма фіксувалася за допомогою металевої стяжки. Зігнутий зразок у зафіксованому стані зображений на рисунку 2.4.

Далі виконувалося сушіння в сушильній шафі за температури 100 °С до кінцевої вологості 8 %. Контроль вологості здійснювався ваговим методом на електронних вагах ВК-300.

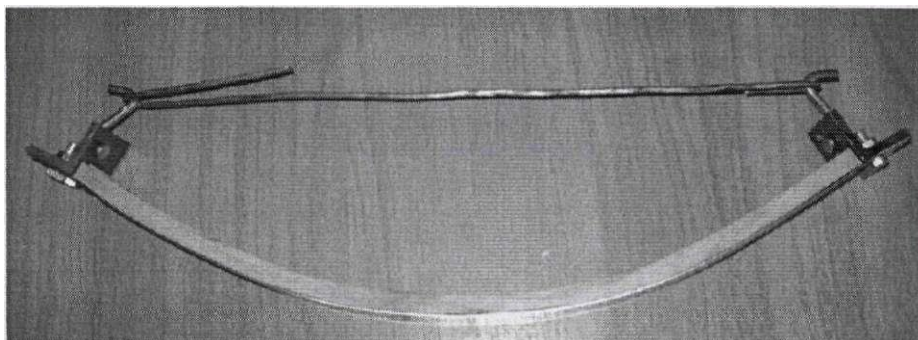


Рисунок 2.4. Зразок у зафіксованому стані

Після сушіння зразок охолоджувався до кімнатної температури, знімався з шаблону та відразу герметично пакувався в поліетиленовий пакет. У такому стані зразки витримувалися протягом одного місяця.

Для контролю стабільності наданої форми протягом періоду витримки проводилися вимірювання стріли прогину через 5, 15 та 30 днів. Вимірювання стріли прогину здійснювалося за допомогою лінійки.

Відносне значення зміни стріли прогину у %, обчислювалося за формулою:

$$f = (a_0 - a_1) / a_0 \quad (2.3)$$

де:  $a_0$  – прогин зразка на шині в зафіксованому стані, мм;

$a_1$  – прогин після зняття зразка з шини та витримки, мм.

Залишкова деформація після зникнення пружної складової складається з квазі-остаточних заморожених деформацій та власне істинної залишкової деформації.

Визначити частку термозамороженої деформації неможливо, оскільки для цього потрібно нагріти деревину до температури, яка була під час згинання. Це можна зробити лише за умови зволоження зразків до початкової вологості, яка була перед нагрівом, і повторного нагрівання за тими ж режимами (при конвективному нагріві жорсткість деревини зростатиме через її підсихання). Внаслідок же зволоження неминуче зникне влагозаморожена деформація.

Тому визначалася частка вологозамороженої деформації в загальній деформації шляхом вимочування зразків у воді до вологості, яка була в момент згинання, та подальшої витримки (в герметичному стані) протягом місяця.

Частка вологозамороженої деформації у % обчислювалася за формулою:

$$f = (a_0 - a_2) / a_0 \quad (2.4)$$

де:  $a_2$  – стріла прогину після вимочування у воді та витримки, мм.

## 2.4. Експериментальна установка для гнуття деревини на різний радіус кривизни та методика дослідження здатності деревини до гнуття

Здатність деревини до гнуття характеризується відношенням  $h/R$  (див.

1.1). Експерименти з визначення  $h/R$  проводилися на зразках розміром  $20 \times 20 \times 350$  мм. Рівні варіювання вхідних факторів наведено в таблицях 2.5.

Таблиця 2.5. Значення та рівні факторів УРП для деревини осики

Найменування фактора	Рівні варіювання				
	-1,682	-1	0	+1	+1,682
Вологість, (WK), %	8	11	14	17	20
Температура ( $T_{cp}$ ), °C	80	86	95	104	110
Упресування (s), %	30	34	40	46	50

Для визначення залежності  $h/R$  від температури та вологості була виготовлена установка, фото якої наведено на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5. Установка для гнуття на різний радіус кривизни:

1 – каркас гнутаючого пристрою; 2 – важіль; 3 – деталь; 4 – диск з шиною на установці; 5 – диски з шиною різних діаметрів.

Для отримання різних відношень  $h/R$  передбачено 15 шаблонів із різними радіусами. Налаштування здійснювалося шляхом встановлення потрібного шаблону та перестановки балки з роликком на необхідну відстань, після чого проводилося тонке регулювання ступеня пресування.

Для визначення крутного моменту був виготовлений динамометричний ключ на базі динамометра з межею вимірювань 0,05 тс. Довжина важеля прийнята 1 м.

Дубові зразки згинали із використанням 5% підпресування; для гібрида воно змінювалося в межах 30–50%.

Алгоритм проведення експериментів включав:

- укладання нагрітої заготовки в шину;
- вигин зразка шляхом навантаження динамометра;
- фіксацію форми стяжкою;
- охолодження до 25–30 °С;
- сушіння до 8% вологості;
- місячну витримку в герметичному пакеті;
- контроль зміни стріли прогину.

Розгин при зволоженні визначали після вимочування зразків у воді при температурі 20°C до вологості 30 % та обчислювали відносне зміщення стріли прогину в % за формулою, аналогічною формулі (2.3).

## **2.5. Розробка математичних регресійних моделей для процесів пластифікації та гнуття деревини**

Основою експериментальних досліджень є математична теорія планування експерименту, що ґрунтується на положеннях математичної статистики [5, 46].

Під плануванням активного експерименту розуміють сукупність прийомів, які забезпечують проведення експерименту, у якому рівні факторів у

кожному досліді задаються дослідником відповідно до певного плану. Для проведення активного експерименту фактори мають бути керованими.

Для отримання математичних моделей, адекватних реальному процесу гнуття деревини, була проведена серія експериментів, що надали кількісну та якісну інформацію про процес гнуття.

Фактори, що визначають процес гнуття деревини, змінювалися відповідно до встановлених вимог; результати експерименту представлялися у вигляді таблиць і оброблялися статистичними методами [5, 24].

Було визначено вхідні та вихідні фактори. **Вхідні фактори**  $X_i$  визначають стан об'єкта. Основна вимога - керованість, тобто можливість встановлення фактора на потрібному рівні та підтримання його протягом експерименту.

**Вихідні величини**  $Y_i$  — це параметри, за якими оцінюють зміну об'єкта.

На об'єкт дослідження також впливають некеровані фактори  $F_i$ . Схематично об'єкт можна подати як «чорний ящик» [46].

Вибір математичної моделі залежить від наявних знань про об'єкт.

Експерименти дозволяють виявити закономірності зміни цільових функцій від вхідних параметрів технологічного процесу.

Отже, мета експериментів - зібрати вихідні дані для отримання точної інформації про вплив вхідних величин на зміну вихідних та встановлення відповідних закономірностей, що дає змогу створити математичні моделі, які адекватно описують процес гнуття деревини.

Активний експеримент дозволяє обрати параметр оптимізації і розробити оптимальні режими технологічного процесу. У процесі проведення активного експерименту здійснювався контроль вхідних величин.

У загальному вигляді математичну модель гнуття можна подати так [46]:

$$Y_i = f_i(X_1, \dots, X_n) \quad (2.5)$$

де:  $f_i(X_1, \dots, X_n)$  — функція відгуку.

Поведінка вихідних показників залежить від змінюваних вхідних параметрів. Проте на процес гнуття впливають і випадкові фактори, такі як вади деревини.

Тому модель можна записати так [46]:

$$Y_i = f_i(X_1, \dots, X_n) + \zeta \quad 2.6)$$

де:  $Y_i = f_i(X_1, \dots, X_n)$  — детермінована складова, яка встановлюється впливом і зміною факторів  $X_1, \dots, X_n$ ;

$\zeta$  — випадкова величина з нормальним розподілом і нульовим математичним сподіванням.

Підвищення якості й ефективності процесу гнуття можливе за рахунок сучасних методів математичного моделювання з урахуванням особливостей керування технологічним процесом.

У результаті системного аналізу було визначено різноманіття факторів, що впливають на процес гнуття масивної деревини, а також показники процесу [23], які наведено в таблицях 2.7–2.10.

Таблиця 2.7. Фактори, прийняті як константи

№	Назва фактора
1	Порода
2	Розміри та форма поперечного перерізу заготовки
3	Напрямок річних шарів відносно площини вигину
4	Якість деревини: штучний косошар (перерізання волокон), природний косошар, наявність сучків
5	Тиск торцевого упора

Таблиця 2.8. Змінні (варійовані) фактори

№	Назва фактора	Позначення
1	Вологість заготовки перед гнуттям	$X_1$
2	Температура заготовки перед гнуттям	$X_2$
3	Тривалість нагрівання до заданої температури	$X_3$
4	Шорсткість поверхні заготовки	$X_4$
5	Ступінь підпресування в поперечному напрямку	$X_5$
6	Швидкість гнуття	$X_6$

Таблиця 2.9. Збурювальні впливи

№	Назва фактора	Позначення
1	Вологість заготовок перед прогрівом	$F_1$
2	Температура в приміщенні	$F_2$
3	Час витримки заготовки від моменту вилучення після прогріву до гнуття	$F_3$
4	Щільність	$F_4$
5	Наявність прихованих вад	$F_5$

Таблиця 2.10. Функції відгуку

№	Назва функції	Позначення
1	2	3
1	Відношення під час гнуття	$Y_1$
2	Момент при вигині	$Y_2$
3	Розгин при зволоженні	$Y_3$
4	Розпресування при зволоженні	$Y_4$
5	Стабільність наданої форми	$Y_5$

Для перевірки значущості обраних вхідних і вихідних факторів було проведено їх експертне оцінювання методом рангової кореляції. Об'єктом керування є технологічний процес гнуття деревини.

Під час формування мети та завдань експертної оцінки враховувалися чинники, що якісно й кількісно характеризують процес гнуття масивної деревини. Для отримання експертної інформації та її опрацювання застосовано метод анкетування з використанням групового експертного оцінювання.

Опитування здійснювалося за допомогою анкет, які були надіслані провідним фахівцям у галузі оброблення деревини (отримано 10 відповідей).

Значущість кожного критерію визначали за сумою рангів, присвоєних цьому критерію всіма учасниками експерименту.

Після цього виконано обробку та аналіз результатів. Узагальнені результати анкетного опитування для вхідних і вихідних показників подано в таблицях.

Функцію відгуку апроксимували поліномом:

$$Y = A_0 + A_1 X_1 + \dots + A_m X_m = \sum_{k=0}^m A_i X_i \quad (2.7)$$

Регресійний аналіз необхідний для експериментального визначення коефіцієнтів регресії  $A_i$ , що встановлюють залежність вихідного параметра  $Y_i$  від вхідних змінних  $X_i$ .

Найбільш зручною моделлю для процесу гнуття є рівняння у вигляді ряду Тейлора з урахуванням квадратів та парних взаємодій:

$$Y_1 = A_0 X_0 + A_1 X_1 + \dots + A_m X_m + A_{11} X_1^2 + A_{mm} X_m^2 + A_{12} X_1 X_2 + \dots + A_{m-1} X_{m-1} X_m \quad (2.8)$$

Коефіцієнти  $A_0 \dots A_m$  визначаються на ЕОМ за стандартною програмою методом найменших квадратів.

Число дослідів ( $N$ ) для одночасного вимірювання величин повинно бути більшим за кількість невідомих коефіцієнтів ( $p$ ).

Для отримання математичних моделей, адекватних процесу, була проведена серія експериментів.

Математичне планування експерименту виконували за методикою [5, 24]. Побудова моделей здійснювалася з використанням уніформ-ротатабельного плану (УРП).

Необхідний обсяг вибірки, з урахуванням раніше проведених досліджень, визначався за формулою [40]:

$$n = \frac{t s}{\Delta} \quad (2.9)$$

де:  $t$  — критерій Стюдента;

$s^2$  — оцінка дисперсії;

$\Delta$  — величина максимальної похибки.

Статистична обробка результатів експериментів здійснюється на ЕОМ.

Під час первинної обробки експериментальних даних вибірки обсягом  $n$  зі випадкових спостережень  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , визначали такі статистичні характеристики: вибіркове середнє  $\bar{X}$ , вибіркову дисперсію  $S^2$ , середнє квадратичне відхилення  $S$ , коефіцієнт варіації  $V$ , похибку середнього  $S(\bar{X})$ , показник точності середнього  $\xi$  [46]:

$$\bar{X} = 1/n \sum_{i=1}^n X_i \quad (2.10)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (2.11)$$

$$S = \sqrt{S^2} \quad (2.12)$$

$$V = \frac{S \cdot 100\%}{\bar{X}} \quad (2.13)$$

$$S(\bar{X}) = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (2.14)$$

$$\xi = \frac{S(\bar{X})}{\bar{X}} \times 100\% \quad (2.15)$$

В процесі реалізації матриці були отримані результати досліджень. Після відсіювання грубих відхилень (промахів) з використанням  $t$ -критерію

Стьюдента за критерієм Кохрена  $G$  перевірялася гіпотеза про однорідність дисперсій дослідів [46]:

$$G_P = \frac{S_{max}^2}{S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_M^2} \quad (2.16)$$

де:  $S_{max}^2$  — найбільша з розглянутих дисперсій;

$S_1^2 + S_2^2 + S_M^2$  — сума всіх дисперсій.

За таблицею розподілу Кохрена при рівні значущості  $q = 0,05$ , числу ступенів свободи вибірки  $f = n - 1$  та кількості вибірок  $m$  визначають  $G_{табл}$

Якщо  $G_{розрах} < G_{табл}$ , то гіпотезу про однорідність дисперсій можна прийняти.

Результати експериментів оброблялися за допомогою стандартного пакета STATISTICA 6.0.

## 2.6. Висновки

1. Для реалізації поставлених завдань було спроектовано та виготовлено обладнання, а також розроблено методики проведення експериментів, які дають змогу досліджувати процеси пластифікації, гнуття та стабілізації форми масивної деревини залежно від різних технологічних параметрів.

2. Проведений системний аналіз виявив різноманіття факторів, що впливають на процес гнуття масивної деревини та показники процесу, що створює основу для розроблення математичних моделей, які дозволяють підвищити якість продукції та ефективність технології гнуття загалом.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

#### 3.1. Побудова математичних моделей процесу пластифікації дере-

#### вини

Результати основних експериментів наведені в таблицях 3.1–3.2.

Таблиця 3.1. Матриця планування експерименту під час дослідження середньої температури ( $T_c$ , °C) нагрівання зразків із осики розміром 10×20×350 мм у натуральних показниках з результатами її реалізації

№	$W_H$ , %	t, c	факт	розрахунок
1	2	3	4	5
1	36	370	108	108
2	14	370	133	135
3	36	110	77	77
4	14	110	92	95
5	40	240	92	93
6	10	240	127	124
7	25	420	125	124
8	25	60	77	75
9	25	240	103	103
10	25	240	102	103
11	25	240	104	103
12	25	240	103	103
13	25	240	105	103

Таблиця 3.2 .Матриця планування експерименту під час дослідження середньої температури ( $T_c$ , °C) нагрівання зразків із осики розміром 20×20×350 мм у натуральних показниках з результатами її реалізації

№	$W_H$ , %	t, c	факт	розрахунок
1	2	3	4	5
1	36	520	102	106
2	14	520	138	142
3	36	140	68	68
4	14	140	87	88
5	40	330	79	78
6	10	330	118	116
7	25	600	141	138
8	25	60	72	72
9	25	330	99	99
10	25	330	100	99
11	25	330	97	99
12	25	330	98	99
13	25	330	101	99

Математичні моделі процесу пластифікації осики подані рівняннями регресії 3.1–3.8 з обмеженнями.

**Рівняння регресії у натуральних показниках для деревини осики:**

1.  $h = 10$  мм:

$$T_c = 89,85 - 1,58W_{п} + 0,29t + 0,023W_{п}^2 - 0,00012t^2 - 0,002W_{п}t \quad (3.1)$$

$$W_k = 25,12 + 1,21W_{п} - 0,48T_c - 0,002W_{п}^2 + 0,0022T_c^2 - 0,006W_{п}T_c \quad (3.2)$$

$$P_{пит} = 1,56 + 0,04W_{п} - 0,02321T_c + 0,0001T_c^2 - 0,0003W_{п}T_c \quad (3.3)$$

Обмеження:  $10 \leq W_{п}; \% \leq 40; 60 \leq t, c \leq 420; 80 \leq T_c, ^\circ C \leq 120$ .

2.  $h = 20$  мм:

$$T_c = 74,47 - 0,059W_{п} + 0,123t - 0,012W_{п}^2 + 0,0001t^2 - 0,002W_{п}t \quad (3.4)$$

$$W_k = 17,32 + 0,99W_{п} - 0,248T_c - 0,0026W_{п}^2 + 0,001T_c^2 - 0,0049W_{п}T_c \quad (3.5)$$

$$P_{пит} = 0,889 + 0,0241W_{п} - 0,012T_c - 0,0001W_{п}^2 + 0,0001T_c^2 - 0,0001W_{п}T_c \quad (3.6)$$

Обмеження:  $10 \leq W_{п}; \% \leq 40; 60 \leq t, c \leq 600; 80 \leq T_c, ^\circ C \leq 120$ .

У наведених рівняннях регресії використано такі позначення вхідних та вихідних параметрів:

- $t$  — тривалість нагрівання, с;
- $W_{п}$  — початкова вологість зразка, %;
- $T_c$  — середня температура зразка,  $^\circ C$ ;
- $W_k$  — вологість зразка після нагрівання, %;
- $P_{пит}$  — питома потужність, поглинена зразком,  $Вт/см^3$ ;

Статистичний аналіз одержаних математичних моделей наведено в додатку А (таблиця 1).

Отримані за рівняннями регресії графічні залежності для деревини осики подано на рисунках 3.1–3.12.

За допомогою математичних моделей (3.1)–(3.6) можна розробляти режими нагрівання зразків до заданих температурно-вологісних станів.

Для цього необхідно використовувати систему графіків у такій послідовності:

1. За графіком залежності  $W_k = f_1(W_n, T_c)$  визначити початкову вологість зразка для отримання заданої кінцевої вологості та температури.
2. За графіком залежності  $T_c = f_2(W_n, t)$  знайти потрібний час нагрівання.
3. За графіком залежності  $P_{\text{пит}} = f_3(W_n, T_c)$  визначити питому потужність, яка потрібна для нагрівання зразка до заданого стану.

Середнє значення питомої потужності за період нагрівання розраховується як середнє арифметичне значень питомої потужності при 80 °С та при заданій температурі, припускаючи, що під час нагрівання до 80 °С вологість деревини суттєво не змінювалася

Зі зростанням температури нагрівання та зниженням початкової вологості деревини нерівномірність розподілу температурного поля в зразку збільшується (рис. 3.1, 3.2).

Ця різниця більш виражена для зразків із осики, що пояснюється їх нижчою теплоємністю.

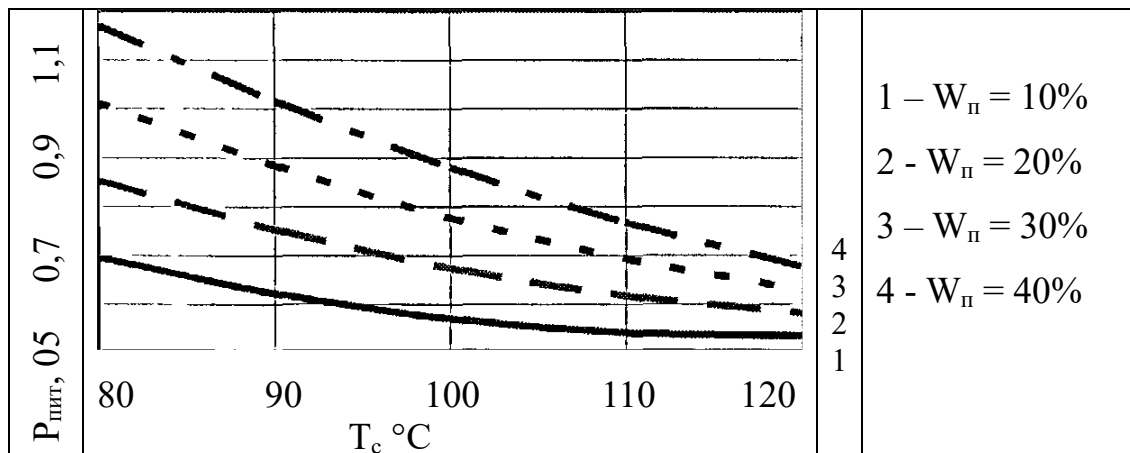


Рисунок 3.1. — Залежність питомої потужності, необхідної для нагрівання зразків із осики розміром 10×20×350 мм, від температури нагрівання

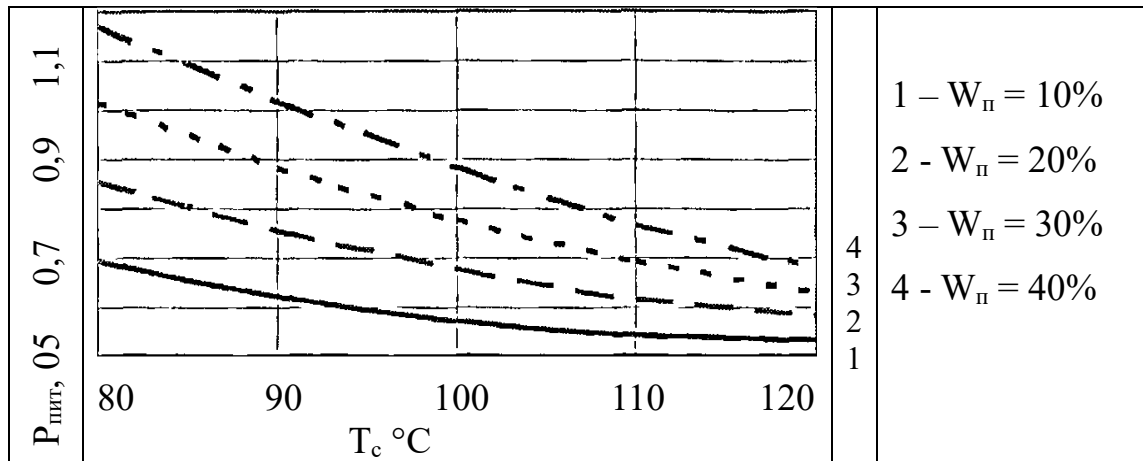


Рисунок 3.2. Залежність питомої потужності, необхідної для нагрівання зразків із осики розміром  $20 \times 20 \times 350$  мм, від температури нагрівання

Питома потужність, що витрачається на нагрівання деревних зразків, зменшується зі зростанням температури нагрівання за всіх рівнів початкової вологості. Це пояснюється поступовим зниженням вологості у процесі нагрівання.

Питома потужність, що витрачається на нагрівання деревних зразків поперечного перетину  $10 \times 20$  мм і  $20 \times 20$  мм практично однакова при всіх рівнях початкової вологості.

### 3.2. Математичні моделі технологічного процесу гнуття

До математичних моделей гнуття деревини доцільно включити такі вхідні й вихідні параметри:

#### Вхідні параметри процесу:

- вологість заготовки перед гнуттям;
- температура заготовки перед гнуттям;
- ступінь упресування в поперечному напрямку.

#### Показники процесу:

- здатність до гнуття;
- стабільність наданої форми;
- розгин при зволоженні;
- розпресовка при зволоженні;
- момент при згині.

Гнуття проводили в радіальній площині. Тиск на заготовку під час згину створювали нерегульованими торцевими упорами. Швидкість гнуття в експериментах становила приблизно  $45^\circ/\text{с}$ .

Матрицю планування експерименту з результатами наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Матриця планування експерименту в натуральних показниках для деревини осики

№	$W_K, \%$	$T_c, ^\circ\text{C}$	$\epsilon, \%$	факт	розрахунок
				R/h	R/h
1	2	3	4	5	6
1	12	86	34	23	23,1
2	18	86	34	17	16,8
3	12	104	34	27	26,9
4	18	104	34	21	20,6
5	12	86	46	20	20,3
6	18	86	46	14	14,1

7	12	104	46	24	24,1
8	18	104	46	18	17,9
9	10	95	40	24	23,7
10	20	95	40	13	13,3
11	15	80	40	19	18,8
12	15	110	40	25	25,2
13	15	95	30	23	23,3
14	15	95	50	19	18,7
15	15	95	40	21	21,0
16	15	95	40	21	21,0
17	15	95	40	21	21,0
18	15	95	40	21	21,0
19	15	95	40	21	21,0
20	15	95	40	21	21,0

Таблиця 3.3 містить дані лише щодо здатності до гнуття деревини осики, оскільки інші показники мали низьку відтворюваність результатів, імовірно через незрілість використаної деревини.

Математичні моделі процесу гнуття деревини осики представлені рівняннями регресії (3.7) з відповідними обмеженнями.

**Рівняння регресії для осики в натуральних показниках мають наступний вигляд:**

$$R/h=46,38+2,05W_k-0,69T_c-0,36\varepsilon-0,11W_k^2+0,005T_c^2+0,0002\varepsilon^2 \quad (3.7)$$

**Обмеження:**

$$8 \leq W_k \leq 20; \quad 80 \leq T_c; \quad 0 \leq T_c \leq 120; \quad 30 \leq \varepsilon; \quad \% \leq 50$$

На рисунку 3.3 подано графічну залежність для осики. Статистичний аналіз отриманих математичних моделей наведено в додатку А (таблиця 1).

Із рисунка 3.3 видно, що для всіх рівнів вологості зі зростанням температури здатність до гнуття погіршується, причому при високій вологості темпи зниження більші. Це пов'язано з тим, що висока температура в поєднанні з високою вологістю досягається за рахунок тривалого нагрівання вологих зразків,

що призводить до зниження міцності та втрати стійкості анатомічних елементів деревини.

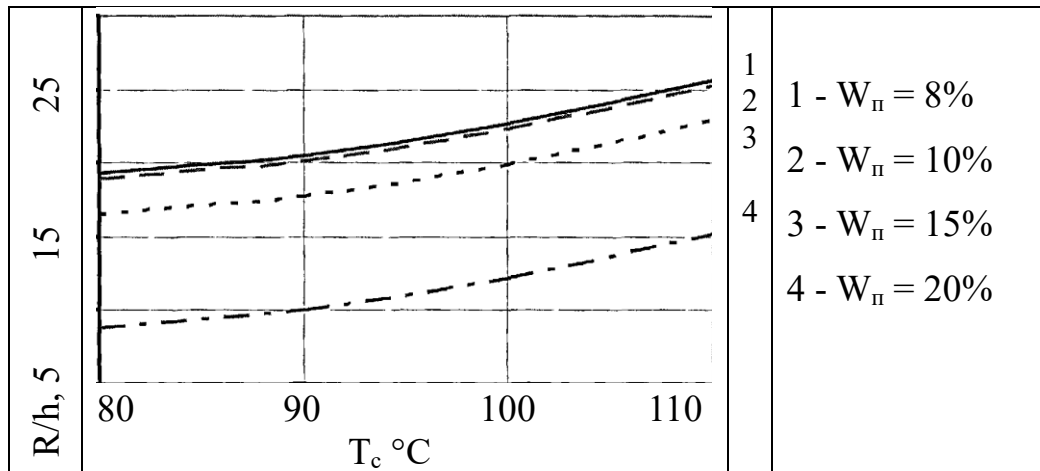


Рисунок 3.3. Залежність здатності до згинання деревини осики від температури нагрівання.

За отриманим рівнянням регресії для деревини осики була побудована залежність здатності до згинання від щільності (рисунок 3.4), а також від ступеня пресування (рисунок 3.5).

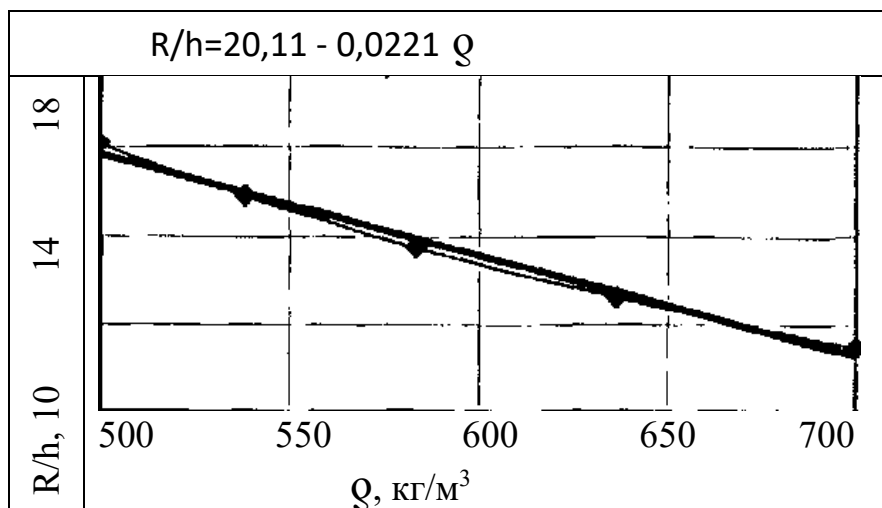


Рисунок 3.4. Залежність здатності до згинання деревини осики при  $W_k = 20\%$  і  $T_c = 97^\circ\text{C}$  від щільності

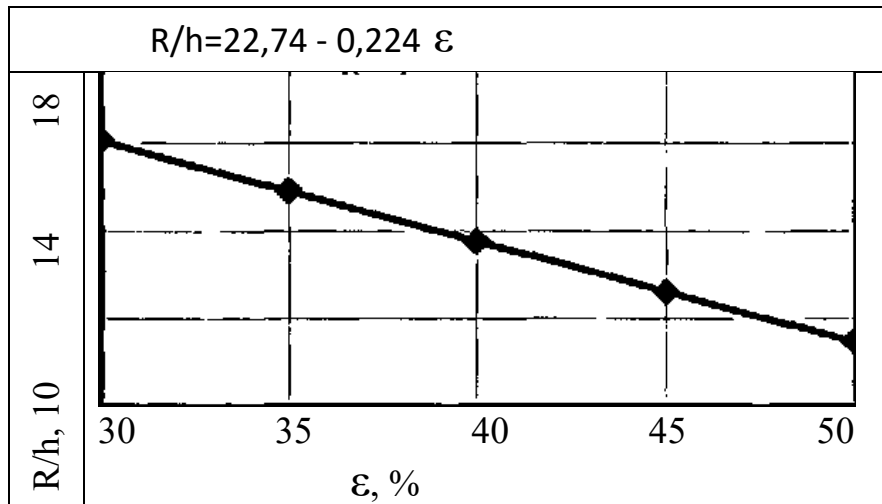


Рисунок 3.5. Залежність здатності до згинання деревини осики при  $W_k = 20\%$  і  $T_c = 97^\circ\text{C}$  від ступеня пресування

Отримані дані мають важливе практичне значення, оскільки дозволяють прогнозувати здатність до гнуття деревини різних порід у широкому діапазоні густини. Густина деревини є узагальненим показником, за величиною якого можна судити про здатність до згинання.

На основі отриманих даних щодо здатності досліджуваної деревини осики до згинання та стабільності наданої заготовкам форми можна рекомендувати такі режими гнуття. Деревину осики доцільно гнути за ступеня упресовки 5%. Вологість під час гнуття повинна становити 12–20%, а середня температура залежить від вологості:

- при  $W_k=12-15\%$   $T_{cp}=105-110^\circ\text{C}$ ;
- при  $W_k=16-20\%$   $T_{cp}=97-105^\circ\text{C}$ .

У цьому випадку стабілізація наданої заготовкам форми досягається за рахунок утворення термо- та вологозаморожених деформацій шляхом підсушування/сушіння та подальшого охолодження деревини.

Запропоновані режими гнуття заготовок є допустимими, оскільки їх реалізація дає змогу отримувати якісні гнуті заготовки з достатньою стабільністю наданої форми, які можуть без будь-яких обмежень експлуатуватися всередині приміщень.

### 3.3. Багатокритеріальна оптимізація процесу гнуття

З метою визначення оптимальних значень технологічних параметрів  $X_i$ , що забезпечують найкращі показники цільових функцій  $U$  у результаті гнуття масивної деревини, було проведено багатокритеріальну оптимізацію процесу [47, 46]. Для цього визначаємо напрямки оптимізації кожної функції. Напрями оптимізації досліджуваних функцій відгуку наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4. Напрями оптимізації показників властивостей гнуття деревини

Найменування показника	Умовне позначення	Напрямок оптимізації
1. Коефіцієнт при гнутті	$Y_1$	Min
2. Відносна величина зміни стріли прогину, %	$Y_2$	Min
3. Розгин при зволоженні, %	$Y_3$	Min

На вхідні контрольовані параметри накладалися обмеження:

Вологість:  $8 \leq W$ ;  $\% \leq 20$ ; Температура:  $80 \leq T, ^\circ\text{C} \leq 120$ .

Використовуючи для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації отримані узагальнені критерії та накладені обмеження на технологічні параметри, отримуємо оптимальні показники вхідних і вихідних величин.

Результати багатокритеріальної оптимізації наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5. Оптимальні значення параметрів і показників процесу гнуття

Найменування параметрів і показників		Оптимальне значення
$X_1$	Вологість заготовки перед гнуттям, $W_{п}, \%$	20
$X_2$	Температура заготовки перед гнуттям, $T, ^\circ\text{C}$	102
$Y_1$	Відношення при гнутті $h/R$	1/15,4
$Y_2$	Відносна величина зміни стріли прогину, %	0
$Y_3$	Розгин при зволоженні, %	16,7

Таким чином, проведена багатокритеріальна оптимізація технологічного процесу дала змогу визначити найбільш оптимальні режими гнуття деревини з метою забезпечення швидкості процесу та отримання гнутих деталей високої якості.

### 3.4. Розробка конструкції промислової СВЧ-установки для пластифікації деревини перед гнуттям

Запропонована конструкція СВЧ-установки для нагрівання заготовок являє собою тунель, що складається з модулів, кожен із яких містить 5 аплікаторів (рисунок 3.6). Кожен аплікатор має довжину 0,44 м і ширину 0,31 м.

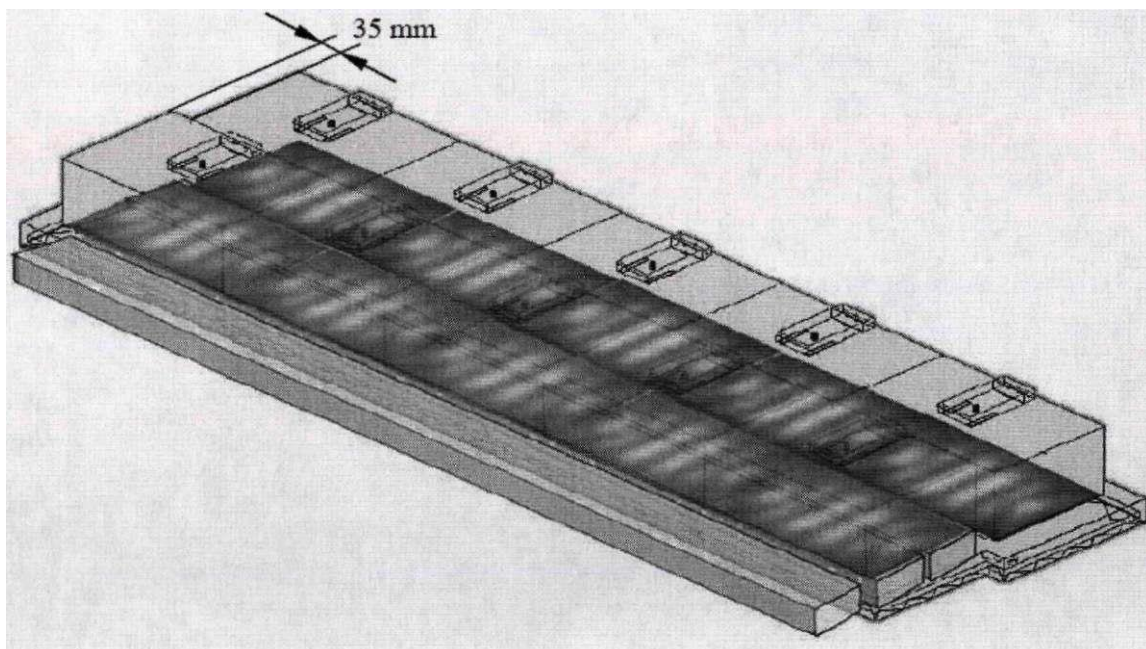


Рисунок 3.6. Конструкція тунелю конвеєрної СВЧ-установки для нагрівання заготовок

Подібного розподілу можна досягти, використовуючи спеціальні металеві смуги. У наших експериментах замість смуг використовувалися склянки з хімічного скла, наповнені водою, що дозволило уникнути утворення стоячих хвиль уздовж зразка та отримати подібний розподіл температури.

Кількість аплікаторів в одному модулі залежить від довжини матеріалу, що нагрівається. Аплікатори оснащені магнетронами номінальною потужністю 1 кВт, причому потужність кожного магнетрона може регулюватися в процесі нагрівання шляхом регулювання циклу. Товщина завантажуваного матеріалу може становити 15–55 мм. Оскільки тунель відкритий з обох торців, передбачені заслінки для запобігання витоку радіації з нього. Щоб уникнути утворення локальних перегрівів, модулі зміщені один відносно одного на 35 мм. Величина зміщення залежить від довжини хвилі. Швидкість подачі може бути встановлена в межах 5–500 мм/хв

### 3.5. Промислова технологія виробництва гнутих виробів із масивної деревини

Виробництво гнутих виробів із масивної деревини за пропонованою технологією включає такі етапи:

1. Розпилювання круглих лісоматеріалів на пиломатеріали;
2. Сушіння пиломатеріалів;
3. Поперечний розкрій дощок;
4. Поздовжній розкрій дощок по збігу;
5. Нагрів заготовок у полі СВЧ;
6. Гнуття на заданий радіус;
7. Охолодження або стабілізаційне сушіння та охолодження;
8. Звільнення гнутих заготовок від шин/шаблонів;
9. Технологічна витримка;
10. Остаточна механічна обробка.

Розпилювання круглих лісоматеріалів доцільно виконувати на стрічкопилкових верстатах по збігу, щоб уникнути перерізання волокон.

Сушіння пиломатеріалів до необхідної вологості здійснюється за типовими технологічними режимами в сушильних камерах. Вологість залежить від відношення  $h/R$  при гнутті та може змінюватися в межах від 9 до 30%.

Поперечний розкрій висушених пиломатеріалів виконується на торцювальних верстатах.

Поздовжній розкрій здійснюється на круглопилкових верстатах по збігу. Далі заготовки надходять на лінію для гнуття, яка зображена на рисунку 3.10.

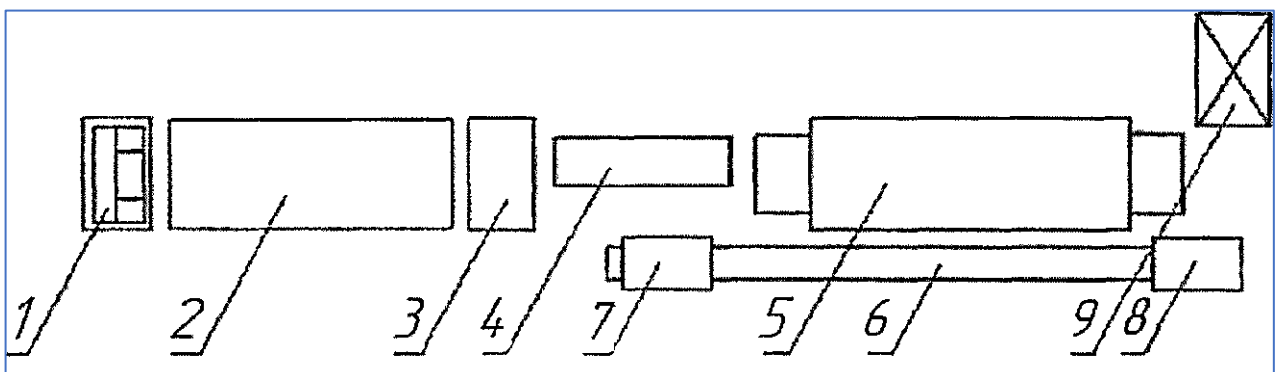


Рисунок 3.10. Потокова лінія для гнуття масивної деревини

Лінія включає послідовно розташовані: подавальний пристрій 1, СВЧ-установку прохідного типу 2, накопичувальний пристрій з обігрівом 3, гнударний верстат 4, камеру кондиціонування прохідного типу 5, конвеєр повернення 6, перший контейнер для оснастки 7, другий контейнер для оснастки 8, контейнер для гнутих заготовок 9.

Замість пропарювального котла пропонується використовувати СВЧ-установку прохідного типу, що складається з тунелю та рухомого конвеєра. Крім того, сушильна камера замінена прохідною камерою кондиціонування, яка дозволяє в одних випадках здійснювати лише охолодження матеріалу, а в інших — підсушування до потрібної кінцевої вологості та охолодження. Такі камери застосовують під час сушіння лакофарбових покриттів, а також у виробництві ДСтП для охолодження піддонів.

### **Робота установки**

Заготовки з подавального пристрою 1 надходять у СВЧ-установку прохідного типу 2, де під час їх переміщення відбувається нагрів до заданої температури (80–120 °С). Потім заготовка надходить до накопичувального пристрою з обігрівом 3, який виконує функцію акумулювання та підтримання заданої температури.

Далі заготовки послідовно гнуться на гнударному верстаті 4. Оснастка (шини, шаблони та стяжки) розміщена в першому контейнері 7.

Останньою операцією, що виконується на лінії, є охолодження заготовок до температури 25–30 °С або підсушування з подальшим охолодженням у камері кондиціонування прохідного типу 5. Підсушування застосовується у випадку гнуття заготовок із вологістю, що перевищує 8–10%. Після охолодження здійснюється звільнення заготовок від шин, які складаються у другий контейнер 8 і за конвеєром повернення 6 знову надходять до гнударного верстата. Гнуті заготовки накопичуються в контейнері 9.

Камера кондиціонування оснащена калориферами, що використовуються лише під час підсушування заготовок. Вона працює так: повітря, проходячи через калорифери, нагрівається, після чого обдуває заготовки, що рухаються

стрічковим конвеєром у тунелі камери. Під час охолодження калорифери не працюють.

Параметри процесів пластифікації та охолодження задаються залежно від температури поверхні заготовок, яка контролюється за допомогою лазерного радіаційного термометра.

Контроль за параметрами цих процесів і їхнє регулювання дає можливість здійснювати більш ефективно нагрівання й охолодження, а також скорочувати тривалість процесу загалом.

Після гнуття заготовки надходять на склад для витримки протягом 48 годин. За цей час у брусках відбувається вирівнювання внутрішніх напружень, що гарантує збереження їхньої форми після зняття поверхневих шарів під час подальшої обробки. Атмосферні умови на складі необхідно підтримувати на рівні, що відповідає рівноважній вологості деревини 10–12%.

Склад гнутих деталей доцільно організувати на рольгангах, а деталі зберігати відсортованими за типорозмірами в контейнерах.

Остаточна обробка полягає у чистовому фрезеруванні та торцюванні, після чого виконується шліфування криволінійних поверхонь на верстатах типу ШЛДБ і крайкошліфувальних за типовими режимами

### **3.6. Висновки**

1. У результаті дослідження процесу пластифікації, що полягає у СВЧ-нагріванні деревини за наявності джерела додаткових діелектричних втрат, отримано математичні моделі, які дають змогу розробляти технологічні режими нагрівання заготовок до заданих температурно-вологісних станів.
2. Отримано математичну модель, що характеризує здатність деревини осики фіксувати надану під час гнуття форму залежно від різних температурно-вологісних умов, і яка дає можливість розробляти режими гнуття заготовок з низькою вологістю.
3. Досліджено здатність деревини до гнуття залежно від різних технологічних параметрів; отримано математичні моделі, які дозволяють розробляти раціональні режими гнуття для виготовлення гнутих деталей із заданими

радіусами кривизни. Отримане для деревини осики рівняння регресії, що характеризує здатність до гнуття, може бути використане для прогнозування здатності до гнуття інших листяних порід у діапазоні щільності від 500 до 700 кг/м<sup>3</sup>.

4. Знайдено оптимальний режим гнуття осикових заготовок: вологість деревини — 20%, температура заготовки — 102 °С, відношення при гутті  $l/h=1/15,4$ .

5. Запропоновано технологію гнуття масивної деревини з використанням СВЧ-нагрівання, що дозволяє отримувати криволінійні деталі із заготовок з низькою вологістю.

6. Для реалізації запропонованої технології гнуття масивної деревини розроблено модель потокової лінії, яка відрізняється застосуванням накопичувального пристрою з обігрівом, розташованого після СВЧ-установки прохідного типу з живильником, а також конвеєра повернення оснастки до гнутарного верстата. Для стабілізації форми використано камеру кондиціонування прохідного типу шляхом охолодження або підсушування й охолодження зігнутих заготовок

## Список використаних джерел

1. Войтович І.Г. Основи технології виробів з деревини: підручник. – Львів: ТЗОВ «Країна ангелят», 2010. – 305 с.
2. Заяць І.М. Технологія виробів з деревини: Навч. Посібник/І.М. Заяць.- К.: ІСДО, 1993. -296 с.
3. Back, E. L. Glass transition of wood components hold implications for molding and pulping processes [Text]/ E. L. Back, N. L. Salmen// Tappi. - 1982.- 65.-P. 107-110.
4. Gerhards, C. C. 1982. Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects [Text]/ C. C. Gerhards// Wood and Fiber. - 1982. - 14. - P. 4-36.
5. Goring, D. A. I. Thermal softening of lignin, hemicellulose and cellulose [Text]/ D. A. I. Goring// Pulp and Paper Mag. - 1963. - P. 517-527.
6. Koura, A. Untersuchungen zur Holzplastifizierung mit waessringen Amrnoniak-loesungen unter Zusatz von Tensiden [Text] / A. Koura, B. Philipp // Holztechnologie. - 1975. - 16. - N 2. - S. 82-84.
7. Passard, J. Creep test under water saturated conditions: do the anisotropy ratios of wood change with temperature and time dependency [Text]/ J. Passard, P. Perre// Proc. 7th Int. Wood Drying Conference. - Tsukuba, 2001. - P. 230-237.
8. Schaffer, E. L. Effect of pyrolytic temperatures on the longitudinal strength of dry Douglas-fir [Text]/ E. L. Schaffer// J. Testing and Evaluation. - 1973. - 1.- P. 319-329.
9. Schuerch, C. Liquid ammonia solvent combinations in wood plastification. Chemical treatments [Text] / C Schuerch, M.P. Burdick, M. Mahdalik // Industr. and Engng. Chem. - 1966. - P. 101-105.
10. Faix, O. Study on low mass thermal degradation products of milled wood lignins by thermogravimetry-mass-spectrometry [Text]/ O. Faix, E. Jakab, F. Till, T. Szekely// Wood Sci. Technol. - 1988. - 22. - P. 323-334.
11. Irvine, G. 1984. The glass transitions of lignin and hemicellulose and their measurement by differential thermal analysis [Text]/ G. Irvine// Tappi. - 67. - P. 116-121.
12. Fujita, H. and A. Kishimoto. 1958. Diffusion-controlled stress relaxation in polymers. II. Stress relaxation in swollen polymers [Text]/ H. Fujita, A. Kishimoto// J. of Polymer Sci. - 1958. - XXVIII. - P. 547-567.
13. Ugolev, B. N. General laws of wood deformation and rheological properties of hardwood [Text]/ B. N. Ugolev // Wood Science and Technology. - 1976. — vol. 10(3).-P. 169-181.
14. Armstrong, L. D. Effect of Moisture content Changes on Creep of Wood [Text]/ L. D. Armstrong, R. S. T. Kingston // Nature. - 1960. - 185(4716). - P. 862-863.

15. Armstrong, L. D. Influence of moisture changes on deformation of wood under stress [Text]/ L. D. Armstrong, G. N. Christensen// Nature. — 1961. - 191(4791).-P. 869-870.
16. Rice, R. W. The effect of moisture content and bending rate on the work required to bend solid red oak [Text]/ R. W. Rice, J. Lucas// Forest Prod. J.- 2003.- 53, N2.-P. 71-77.
17. Makinaga, M. Permanent fixation of bending deformation of wood by steam treatment [Text]/ M. Makinaga, M. Norimoto, M. Inoue// Wood Res. - 1997, N84.-P. 39-41.
18. Norimoto, M. Permanent fixation of bending deformation in wood by heat treatment [Text]/ M. Norimoto, C. Ota, H. Akitsu, T. Yamada// Wood Res.- 1993,N79.-P.23-33.
19. Dankov, A. S. Compwood as a new exotic material for wood bending [Text] // Лес. Наука. Молодежь ВГЛТА - 2006 : Материалы по итогам научно-исследовательской работы молодых ученых ВГЛТА за 2007-2008 годы / Фед. агентство по образованию, ГОУ ВПО «ВГЛТА» «Воронеж», 2008. - С. 252-254.
20. Кійко О.А. Основи наукових досліджень. Львів: НЛТ України, 2010.- 180 с.

# ДОДАТКИ