

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 дуба з використанням нагріву в полі струмів високої частоти»

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

Магістр: Грицишин Дмитро Андрійович

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**

Грицишин Дмитро Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

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

керівник роботи

Грицак С.А., к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий сту-

пень, 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 методику досліджень з врахуванням наявних доступних засобів та обладнання.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити). 1. Аналіз стану проблеми, мета та завдання дослідження, 2. Методика проведення експериментальних досліджень, 3. Результати експериментальних досліджень
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.	1. Стан питання, мета та завдання дослідження	02.09.2025	
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)

Грицишин Д.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Грицак С.А.

(прізвище та ініціали)

Анотація

У магістерській роботі на тему **«Дослідження процесу гнуття деревини дуба з використанням нагріву в полі струмів високої частоти»**, виконаній за спеціальністю 187 «Деревообробні та меблеві технології», досліджено комплекс теоретичних і прикладних питань, пов'язаних із технологією гнуття деревини.

У роботі здійснено аналіз основних способів отримання криволінійних деталей із деревини та деревинних матеріалів, розглянуто вплив температури, вологості й навантаження на реологічні властивості деревини, а також узагальнено сучасні методи її пластифікації та стабілізації форми під час гнуття.

Обґрунтовано методика експериментальних досліджень, розроблено математичні моделі процесів пластифікації та гнуття деревини. Проведено багатокритеріальну оптимізацію режимів гнуття деревини осики. Запропоновано ескіз промислової СВЧ-установки для пластифікації деревини перед гнуттям і сформовано структуру технологічного процесу виготовлення гнутих виробів із масивної деревини осики з використанням нагріву в полі струмів високої частоти.

Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 58 сторінок, вона містить 16 рисунків і 14 таблиць. Список використаних джерел налічує 41 найменування, з яких 38 — іноземні.

Зміст	5
Вступ	6
Розділ 1. Аналіз стану проблеми, мета та завдання дослідження	9
1.1. Аналіз технологій виготовлення криволінійних елементів із деревини та деревних матеріалів	9
1.2. Вплив температурно-вологісних чинників і механічного навантаження на реологічну поведінку деревини	10
1.3. Сучасні підходи до пластифікації та стабілізації форми деревини	18
1.4. Удосконалення існуючих методів і розроблення нового обладнання для гнуття заготовок	20
1.5. Висновки до розділу	23
1.6. Формулювання мети та завдань дослідження	23
Розділ 2. Методика проведення експериментальних досліджень	25
2.1. Обґрунтування вибору породи деревини та підготовка зразків для експериментів	25
2.2. Опис експериментальної установки для пластифікації деревини та методика СВЧ-нагрівання	26
2.3. Методика дослідження стабільності форми деревини за різних температурно-вологісних режимів	29
2.4. Установка для гнуття деревини з різними радіусами кривизни та методика оцінювання здатності до гнуття	32
2.5. Розроблення регресійних математичних моделей процесів пластифікації та гнуття деревини	34
2.6. Висновки до розділу	39
Розділ 3. Результати експериментальних досліджень	40
3.1. Побудова математичних моделей процесу пластифікації деревини	40
3.2. Моделювання технологічного процесу гнуття деревини	45
3.3. Моделювання технологічного процесу фіксації форми деревини	47
3.4. Багатокритеріальна оптимізація параметрів процесу гнуття	49
3.5. Розроблення конструктивної схеми промислової СВЧ-установки для пластифікації деревини	51
3.6. Технологічна схема промислового виробництва гнутих виробів із масивної деревини	51
3.7. Висновки до розділу	54
Список використаних джерел	55
Додатки	59

ВСТУП

Актуальність теми.

Деревина є унікальним природним композитним матеріалом, головними перевагами якого виступають її поновлюваність і екологічна безпечність. Проте, незважаючи на здатність до відновлення, обсяги лісових ресурсів у світі невинно скорочуються. Це актуалізує одну з ключових проблем сучасності — забезпечення максимально ефективного використання деревини шляхом удосконалення процесів розкрою, переробки відходів, застосування конструкцій із низькою матеріаломісткістю та впровадження новітніх ресурсозберігаючих технологій. Особливо гостро ця проблема проявляється під час виготовлення криволінійних меблевих елементів та аркових складових столярно-будівельних виробів.

З метою зниження витрат деревини такі елементи нерідко виготовляють із коротких прямих заготовок або формують зі шпону в прес-формах. Однак подібні методи, окрім значних енерговитрат та трудомісткості, суттєво обмежують дизайнерські можливості у створенні високохудожніх виробів.

Гнуття масивної деревини дає змогу значно ефективніше використовувати цінну сировину та розширює спектр конструктивних і дизайнерських рішень. Проте традиційні технології гнуття вирізняються високою трудомісткістю й енергоємністю, що практично призвело до згортання виробництва гнутих меблів. У той же час за кордоном удосконалення технологій гнуття активно триває, а на міжнародних виставках регулярно демонструються зразки високоякісних виробів зі складними гнутими формами.

Усе це засвідчує, що розроблення нової ресурсо- та енергозберігаючої технології гнуття масивної деревини є важливим і актуальним науковим і практичним завданням.

Мета дослідження

Створення технології гнуття напівсухих масивних дубових заготовок на основі застосування СВЧ-нагріву.

Об'єкт дослідження

Процес СВЧ-нагрівання та гнуття масивної деревини дуба.

Методика досліджень

Поставлені завдання реалізовувалися на основі поєднання теоретичних і експериментальних досліджень. Методика виконання робіт відповідає загальноприйнятим вимогам деревообробної галузі та здійснювалася з дотриманням чинних стандартів (ГОСТ). Експериментальні дані опрацьовувалися методами математичної статистики із застосуванням стандартного програмного забезпечення на персональному комп'ютері.

Наукова новизна дослідження полягає в такому:

1. Установлено закономірності впливу температурно-вологісних режимів гнуття на стабільність геометричної форми гнутих деревинних елементів.
2. Розроблено математичні моделі процесу гнуття заготовок із масивної деревини дуба з урахуванням ключових технологічних параметрів.
3. Запропоновано технологічний підхід до гнуття масивної деревини за умов попередньо зниженої вологості заготовок.
4. Сформовано модель потокової лінії для гнуття масивної деревини, що включає накопичувальний пристрій із підгрівом після прохідної СВЧ-установки та конвеєр повернення оснастки до гнутарного верстата. Стабілізація форми реалізується у прохідній камері кондиціонування шляхом охолодження або підсушування з наступним охолодженням гнутих заготовок.

Теоретична та практична значущість роботи

Отримані результати можуть бути використані для:

- застосування математичних моделей, що описують процес СВЧ-нагрівання деревинних заготовок в об'ємному резонаторі;
- обґрунтування та вибору раціональних режимів гнуття масивної деревини дуба;
- впровадження технології гнуття заготовок із пониженим рівнем вологості;
- проектування поточкових ліній гнуття масивної деревини з метою скорочення тривалості технологічного циклу, зменшення енерговитрат та кількості необхідної технологічної оснастки

Положення, що виносяться на захист:

1. Запропонована модель, яка встановлює залежність стабільності форми гнутих виробів від температурно-вологісних умов під час гнуття.

2. Сформовані математичні моделі процесу гнуття, у яких враховано основні режимні параметри технології.

3. Обґрунтовано технологію гнуття заготовок з пониженою вологістю.

4. Розроблено модель потокової лінії для гнуття масивної деревини.

Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Зміст роботи викладено на 63 сторінках тексту, містить 16 рисунків та 15 таблиць. Список використаних джерел включає 41 найменувань, з них 38 іноземних.

1. Аналіз стану проблеми, мета та завдання дослідження

1.1. Аналіз технологій виготовлення криволінійних елементів із деревини та деревних матеріалів

Криволінійні деревинні деталі широко застосовуються в меблевій, будівельній, транспортній та інших галузях промисловості. Основними технологіями їх виготовлення є: механічне формоутворення, торцеве склеювання брусків, гнуття зі склеюванням шарів шпону та гнуття масивних заготовок після пластифікації [1].

Механічне вирізання з масиву має низький вихід придатної продукції, супроводжується перерізанням волокон і зниженням міцності деталей. Торцеве склеювання забезпечує кращу економію матеріалу, однак численні клейові шви погіршують естетичні властивості виробів. Гнуття зі склеюванням шпону є матеріалоощадним і дозволяє отримувати малі радіуси кривизни, проте обмежується вартістю та експлуатаційними властивостями клейових з'єднань.

Найбільш перспективним є гнуття масивної деревини після попередньої пластифікації, оскільки воно забезпечує збереження безперервності волокон, високі показники міцності та якісні декоративні властивості виробів. Основними недоліками цього методу залишаються висока енергоємність, тривалість технологічного циклу та складність стабілізації форми.

Традиційна пластифікація пропарюванням потребує значних витрат часу й енергії, тоді як застосування СВЧ-нагрівання дозволяє суттєво скоротити тривалість процесу (до 1–2 хв порівняно з 30–35 хв у пропарювальних котлах) і спростити виробничу інфраструктуру [1]. Перспективним напрямом удосконалення технології є також гнуття заготовок із пониженою вологістю, що зменшує кількість шаблонів і тривалість стабілізаційного сушіння.

Таким чином, подальший розвиток технології гнуття масивної деревини пов'язаний з оптимізацією режимів пластифікації, зниженням енерговитрат і скороченням виробничого циклу, зокрема шляхом використання СВЧ-нагрівання та гнуття заготовок з меншою початковою вологістю.

Традиційна технологія гнуття масивної деревини передбачає послідовне сушіння пиломатеріалів до вологості 25–30%, розкрій на заготовки,

пластифікацію, гнуття та подальшу стабілізацію форми [2]. Найбільш сприятливою для гнуття є вологість, близька до межі гігроскопічності. Досушування до експлуатаційної вологості 6–8% здійснюють уже в шаблонах, коли деталь зафіксована у зігнутому стані. Такий підхід зумовлює низьку ефективність використання сушильного обладнання, підвищені енерго- і трудовитрати, а також потребу у значній кількості формоутворювальної оснастки, що подовжує виробничий цикл.

Проблеми вдосконалення технології гнуття широко висвітлені в наукових дослідженнях, які зосереджені на вивченні реологічних властивостей деревини за різних температурно-вологісних умов і навантажень, оптимізації способів пластифікації та фіксації форми, а також на розробленні нових методів гнуття й удосконаленні технологічного обладнання

1.2. Вплив температурно-вологісних чинників і механічного навантаження на реологічну поведінку деревини

Зміна вологості та температури в поєднанні з механічним навантаженням призводить до складних деформаційних процесів у деревині. У таких умовах одні види деформацій можуть переходити в інші, або ж виникають нові форми деформацій.

Характер деформування деревини визначається її будовою на макро-, мезо-, мікро- та нано-рівнях, а також хімічною структурою її компонентів і особливостями їх надмолекулярної організації.

Підвищення температури спричиняє істотні зміни у структурних компонентах деревини. У роботах Лагергрена, Райдхолма та Стокмана [3] доведено, що зменшення міцності деревини при нагріванні пов'язане з руйнуванням зв'язків між волокнами та всередині них, зокрема між шарами клітинних стінок. Автори зазначають, що при температурах до 75 °C руйнування переважно відбувається поперек волокон, а вищі температури сприяють інтенсивнішому розпаду цих зв'язків, особливо в межах 150–170 °C. У березової деревини зміни проявляються слабше, ніж у ялини, проте при 190 °C в обох породах

фіксуються незворотні структурні перетворення. Розрив зв'язків у зоні 160–180 °С автори пояснюють розм'якшенням лігніну.

Згідно з даними Бйоркмана [3], лігнін починає розм'якшуватися при 165–175 °С, причому наявність води знижує та розширює межі цього діапазону.

Себорг, Тарков і Штамм [3] вивчали вплив нагрівання на об'ємну стабільність деревини за температур, що перевищують температуру сушіння, і виявили зменшення міцності та опору вигину.

Дослідження Рункеля, Госса, Голдшмита, Мітчелла, Клаудітца та інших [3], проведені у 1950–1960-х роках, дали змогу встановити характер теплових змін у деревині. Основні їхні висновки:

- тривале прогрівання за нижчих температур викликає глибші структурні зміни, ніж короточасне нагрівання за високих;
- із підвищенням температури збільшується частка лігніну;
- за даними Меріта та Уайта [3], зростання частки лігніну триває до 260 °С;
- формуються лігноподібні речовини внаслідок часткового розкладу вуглеводів.

Кратцль і Зільбернагель [3] досліджували зміну протолігніну в буку та хвойних породах при нагріванні у воді та повітрі до 200 °С. Виявлено, що процеси модифікації лігніну починаються вже при 100 °С і різко посилюються зі зростанням температури, особливо при водяному нагріванні. За 200 °С до половини речовин переходить у водний розчин. Автори наголошують, що лігнін у складі лігно-вуглеводного комплексу менше схильний до конденсації, тоді як після його руйнування процес конденсації відбувається швидко, що характерно для гідротермічної обробки.

Кюршнер і Мелцерова [4] досліджуючи букову деревину при 80–160 °С упродовж 1–28 днів, встановили, що до 130 °С лігнін деполімеризується, а при 160 °С зазнає глибокої деструкції.

Коллман і Фенгель [4] під час експериментів із сосною та дубом при 180 °С підтвердили, що вміст лігніну зростає головним чином через продукти розкладу пентозанів.

У працях F. Kollmann, A. Schneider, B. Hinterstoisser та ін. [4] показано, що термічне руйнування компонентів деревини не починається нижче 70 °С, а у проміжку 70–100 °С найбільш чутливими до нагрівання є геміцелюлози.

Schaffer [5] узагальнив дані різних авторів, систематизувавши їх у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. 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 α -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 обуглюватися
320	Геміцелюлози повністю розкладаються
370	Целюлоза втрачає 83% початкової маси
400	Деревина повністю карбонізована

Дослідження термічної поведінки лігніну свідчать, що структурні зміни можуть розпочинатися вже за відносно низьких температур, тоді як інтенсивна втрата маси спостерігається при 180–200 °С [6]. У присутності вологи температура склування лігніну знижується до 60–90 °С, тоді як у сухому стані склування деревних полімерів відбувається за значно вищих температур: для

целюлози — 200–250 °С, для геміцелюлоз — 150–220 °С [7-94]. Зменшення температури склування аморфних компонентів пояснюється пластифікувальною дією води, яка знижує міжмолекулярні взаємодії [8].

Дослідження термічної поведінки деревних полімерів показують, що лігнін є чутливим до нагрівання: структурні зміни можуть розпочинатися вже за температур близько 50 °С, тоді як помітна втрата маси спостерігається при 180–200 °С [6]. У присутності вільної води температура склування лігніну знижується до 60–90 °С, тоді як у сухому стані склування основних деревних полімерів відбувається за значно вищих температур (для целюлози — 200–250 °С, для геміцелюлоз — 150–220 °С) [7]. Зменшення температури склування зі зростанням вологості пояснюється пластифікувальною дією води.

Експериментальні дані свідчать, що зі зростанням температури механічні характеристики деревини загалом знижуються. Для соснової деревини модуль пружності при вигині дещо зростає до 100 °С внаслідок усушки, однак за подальшого нагрівання зменшується через розм'якшення та деградацію полімерної матриці, досягаючи 61–87% від початкового значення при 200–250 °С [8]. Аналогічні закономірності встановлено й для дуба: поєднання підвищеної температури зі зниженою вологістю під час гнуття сприяє зростанню еластичності деревини, що дозволяє оптимізувати режими нагрівання. За температур понад 100 °С модуль пружності при стисканні вздовж волокон різко зменшується і при 230 °С становить близько 34–38% від початкового рівня для хвойних порід [9].

Полімерна природа деревини зумовлює її реологічну поведінку, що проявляється у поєднанні миттєвих пружних, високоеластичних та в'язкотекучих деформацій. За підвищених температур і вологості високоеластичні деформації супроводжуються повзучістю, що призводить до появи залишкових деформацій після зняття навантаження. Інтенсивність цих процесів визначається рівнем і тривалістю навантаження, а також температурно-вологісним станом деревини.

Для опису деформування деревини запропоновано низку реологічних моделей (Максвелла, Бюргерса, стандартного пружно-в'язкого тіла), які дозволяють адекватно враховувати часову залежність деформацій. У процесі гнуття

особливого значення набувають ефект «пам'яті» форми та механо-сорбційний ефект, які суттєво впливають на стабільність отриманої криволінійної конфігурації.

Наприкінці 1970-х років Б. Н. Уголев і Е. Б. Щедріна експериментально зафіксували ефект «пам'яті» деревини щодо температури, за якої на неї діяв силовий вплив. Це пояснюється перетворенням частини пружно-еластичних деформацій у залишкові. Б. І. Огарков, проводячи розрахунки напружень, урахував цей ефект і визначив такі деформації як вологообернені та затримані. Пізніше було введено термін «заморожені» деформації, який використовується й нині. Вони є квазізалишковими: при нагріванні або зволоженні зникають. Їхню величину визначають як різницю пружно-еластичних деформацій у початковому (нагрітому або зволоженому) та кінцевому (охолодженому або висушеному) станах

Упродовж останніх п'ятдесяти років іноземні науковці розробили багато моделей деформування деревини, здебільшого для опису напружено-деформованого стану під час сушіння [4]. У таких моделях силові деформації представляють пружна, еластична та механо-сорбційна складові повзучості.

Під час згинання масивної деревини особливе практичне значення мають явища повзучості, а релаксація відіграє другорядну роль. Повзучість істотно зростає, якщо вологість деревини змінюється під час перебування під вигинальним навантаженням. Це є наслідком механо-сорбційного ефекту [4].

Різноманіття методик і умов експериментів значно ускладнює порівняння результатів. Дослідники одностайні лише в тому, що зі зростанням напружень, вологості та температури збільшується величина деформацій повзучості. Однак щодо порівняння деформацій при розтязі та стиску єдиного висновку немає.

Механо-сорбційні деформації виникають у деревині, що перебуває під навантаженням за умов змінної вологості. Вперше це явище описав у 1951 р. Т. Perkitny. У 1960 р. L. D. Armstrong і R. S. Kingston [4] під час випробувань на згин зафіксували значне збільшення деформацій після багаторазових циклів

зміни вологості дерев'яних балок — загальна деформація зросла в 11 разів після 50 циклів. Це явище отримало назву механо-сорбційної повзучості.

Armstrong і Christensen [4] встановили, що при змінній вологості прогини під час згину значно більші, ніж за сталих умов. Величина деформацій відповідала сумарній зміні вологості і не залежала від тривалості її змін.

Grossman [4] навів огляд основних особливостей механо-сорбційного ефекту, серед яких:

- деформації механо-сорбційної природи не залежать від часу;
- прогини збільшуються як під час зростання, так і під час зниження вологості;
- найбільші деформації зберігаються після зняття навантаження, якщо вологість залишається сталою; при наступному циклі зволоження значна частина деформацій стає зворотною;
- під час першого циклу зволоження чи висушування прогини зростають, але повторні цикли можуть дещо зменшувати деформації;
- навантажені зразки, піддані таким циклам, з часом руйнуються.

У 1971 році R. Leicester запропонував першу модель, що враховує механо-сорбційну повзучість, а P. U. A. Grossman визначив основні вимоги до таких моделей.

Як і у випадку звичайної повзучості, збільшення рівня напружень, вологості та температури, а також розширення амплітуди їх змін сприяє зростанню механо-сорбційних деформацій.

У роботі [17] зазначено, що явище механо-сорбції під час одиничного циклу сушіння—зволоження зумовлене тимчасовою структурною перебудовою компонентів деревини під впливом зміни вологості; ці зміни оборотні. Аналогічно пояснюється і поява «заморожених» деформацій, що виникають як під час сушіння, так і під час охолодження. Тому в контексті сушіння термін «механо-сорбційна повзучість» не є цілком коректним.

У разі циклічної зміни вологості навантаженої деревини виникнення механо-сорбційних деформацій можна пояснити з позицій механіки твердого тіла. Як показано в [4], різке збільшення деформацій при циклічних змінах вологості

є наслідком гігро-втоми деревини — явища, подібного до механічної втоми. Також було встановлено, що збільшення амплітуди зміни вологості інтенсифікує руйнування структури деревини та знижує її міцність

У дослідженні Г. А. Горбачової [4] встановлено, що частка замороженої деформації в загальній деформації змінюється лінійно залежно від величини температурного перепаду. Подібну лінійну залежність заморожених деформацій від зниження вологості раніше зафіксовано в роботі [11], проте вона проявлялася лише за напружень, що не перевищували межу пропорційності. Тому подальшого вивчення потребує поведінка частки заморожених деформацій у зоні надпропорційних напружень.

Дослідження також підтвердили, що волога та температура по-різному впливають на заморожені деформації залежно від того, за яких умов вони сформувалися [4]. Під час зволоження усуваються ті компоненти деформації, що виникли в процесі сушіння під навантаженням, тоді як нагрівання впливає на деформації, «застиглі» під час охолодження. Таким чином, деревина здатна «пам'ятати» не лише характер прикладеного навантаження, а й тип зовнішнього впливу, який сприяв підвищенню її жорсткості.

Під час згинання деревини вирішальну роль відіграють два явища — ефект «пам'яті» та механо-сорбційний ефект. Наприкінці 1970-х Б. Н. Угольов і Е. Б. Щедріна експериментально довели, що деревина зберігає інформацію про температуру, за якої вона перебувала під навантаженням. Це пояснюється частковим переходом пружно-еластичних деформацій у залишкові. В подальших дослідженнях Б. І. Огарков позначив ці деформації як вологообернені або затримані. Пізніше закріпився термін «заморожені» деформації, який використовують і нині. Такі деформації не є остаточними: вони повністю або частково зникають після зволоження чи нагрівання. Їхній рівень визначається різницею між пружно-еластичними деформаціями в умовах нагрівання чи зволоження та відповідними деформаціями під час охолодження або висушування.

Ефект «пам'яті» форми відомий і для інших матеріалів, наприклад для деяких металів і сплавів. У деревині він пов'язаний з тимчасовою перебудовою надмолекулярної структури її компонентів. У роботах [12] детально вивчено

зміну напружень при коливаннях температури за умови фіксованих деформацій. Під час випробувань на розтяг і стиск кедр та дуба аналізували, як змінюються напруження в навантажених зразках та у зразках, які розвантажені, але зберігають заморожені деформації. Виявлено, що деревина зберігає температуру, за якої до неї було прикладено навантаження: під час нагрівання вище цієї температури відбувається зміна характеру напружень, зокрема помітне їх зниження через зменшення модуля пружності.

У 1980-х роках Б. Н. Угольов [13] розробив модель гігро-термомеханічних деформацій, у якій враховано, що зміни вологості й температури в навантаженій деревині викликають не тільки оборотні пружні та еластичні деформації й незворотні деформації повзучості, але й квазі-необоротні заморожені деформації. Ця модель дозволяє пояснити поведінку деревини за різних передісторій навантаження, що охоплюють нагрівання, охолодження та зміну вологості. Її ключові положення підтверджені у працях [14].

За останні пів століття іноземні дослідники запропонували велику кількість моделей деформування деревини, призначених переважно для аналізу напружено-деформованого стану під час сушіння [4]. У цих моделях деформації поділяють на пружні, еластичні та механо-сорбційні.

У практиці згинання масивної деревини найбільше значення має повзучість, тоді як релаксація відіграє меншу роль. Повзучість різко збільшується, якщо вологість деревини змінюється під час дії навантаження — це явище відоме як механо-сорбційний ефект [4].

Через різні типи методик порівняння їхніх результатів є складним. Проте всі дослідники відзначають зростання повзучості зі збільшенням напружень, вологості та температури. Єдності щодо різниці повзучості під час розтягу та стиску немає.

У дослідженні R.W. Rice та ін. [15] показано, що зменшення вологості та швидкості згинання знижує величину роботи (енергії), витраченої на деформацію. Досліди проводили на зразках червоного дуба при температурі 180–190 °F, змінюючи вологість під час навантаження для стимулювання механо-сорбційної повзучості. Підвищення швидкості навантаження з 0,2 до 1,0 дюйм/хв

збільшувало роботу на 41%, а подальше зростання до 5,0 дюйм/хв — ще на 32%. Підвищення вологості від 12% до 15% призводило до зменшення витраченої роботи на 32%.

1.3. Сучасні підходи до пластифікації та стабілізації форми деревини

Найпоширенішим способом пластифікації є гідротермообробка [1]. Механізм розм'якшення деревини під дією гідротермічної обробки заснований на тимчасовому переході матеріалу зі «склоподібного» стану, характерного для звичайних умов, у стан вимушеної еластичності. У цьому стані деревина може витримувати значні пружні деформації без руйнування навіть за порівняно невеликих навантажень.

Серед інших пластифікаторів застосовують аміни, гліцерин [15], етиленгліколь, дибутилфталат, диметилсульфоксид [16], фтористий водень, поліоксіетилен [17], луи й низку органічних розчинників [18].

Найширше практичне використання має пластифікація **аміаком**. У дослідженнях Шуеча та Стамма [19] показано, що рідкий аміак, будучи сильним розчинником, утворює інтенсивні водневі зв'язки з компонентами деревини. Він проникає як у аморфні, так і в кристалічні області целюлози й лігніну, руйнуючи міжмолекулярні зв'язки та забезпечуючи пом'якшення структури. Після випаровування аміаку формуються нові водневі зв'язки, і матеріал повертає жорсткість.

Пластифікаційні властивості **карбаміду** також використовувалися для гнуття деревини [20]. Дослідження показали, що карбамід спричиняє набрякання деревини, активізує її структурні компоненти та розриває внутрішньомолекулярні водневі зв'язки. Максимальний ефект забезпечує застосування його розчину, проте це значно знижує волого- й водостійкість матеріалу.

Механізм пластифікації деревини карбамідом більшість дослідників [21] пояснюють тим, що карбамід викликає набухання деревини та активізує компоненти деревного комплексу. Шарков і Суворова встановили [21], що карбамід збільшує ступінь набухання целюлози. У повідомленні Чупки зазначено [22], що карбамід спричиняє набухання лігніну та розриває внутрішньомолекулярні

водневі зв'язки, вивільняючи гідроксильні групи. За даними Солечника, карбамід пластифікує високомолекулярні компоненти деревини, а в роботах Христова [23] наведено відомості, що 20%-й розчин карбаміду активізує структурні елементи деревного комплексу, насамперед целюлозу.

Ефективним способом **стабілізації форми та розмірів деревини** є сушіння деревини до експлуатаційної вологи [1], а також блокування функціональних груп, відповідальних за набухання, у першу чергу гідроксильних груп вуглеводної частини. Для цього деревину просочують дибутилфталатом [24], азотвмісними сполуками [25], амінами [26], гліфталем, оксидами алкіленів [27].

У роботі М. Norimoto та ін. [19] показано, що стабілізація деформації після гнуття може бути досягнута термічною обробкою. Майже повна фіксація форми спостерігається після витримування зразків близько 30 год при 160 °С або 12 год при 180 °С. Закріплення деформації автори пов'язують зі зняттям внутрішніх напружень у мікрофібрилах і полімерній матриці деревини.

М. Makinaga та ін. [28] встановили, що деформації, отримані під час гнуття, повністю фіксуються внаслідок пропарювання в автоклаві за температури близько 180 °С. При цьому визначено взаємозв'язок між температурою та тривалістю обробки, необхідною для стабілізації форми.

Одним із перспективних напрямів термічної стабілізації є технологія термодеревини [29], яка забезпечує зменшення усушки й набухання на 20–50%. Під час тривалої гідротермічної обробки відбувається розклад геміцелюлоз і активізація лігніну з утворенням термореактивних сполук, що формують жорстку й стабільну структуру матеріалу. Така деревина характеризується підвищеною біостійкістю та придатна для зовнішнього застосування без додаткового захисту.

1.4. Удосконалення існуючих методів і розроблення нового обладнання для гнуття заготовок

Гнуття масивної деревини може виконуватися гарячим і холодним методами. За холодного способу заготовки вигинають без попередньої гідротермічної (пропарювання) чи термічної (СВЧ) обробки, тобто без зниження їхньої пружності.

Гідротермічна або термічна обробка цільних заготовок перед гнуттям проводиться з метою тимчасового (на період вигинання) зменшення модуля пружності деревини при згині приблизно на 50–60%.

Процеси надання деревині пластичності під час підготовки її до гнуття викликають додаткові виробничі витрати порівняно з холодним способом вигинання.

У роботі [30] описано режим, згідно з яким заготовки з бука рекомендується гнути за початкової вологості 30–33%, рівномірно нагріваючи їх до 100 °С. У цьому випадку відношення товщини до радіуса вигину може досягати 1/1,5.

За даними Братиславського науково-дослідного інституту деревини [31], оптимальні параметри гнуття такі: температура пари — 100 °С; температура деревини після пропарювання — 70 °С; торцевий тиск на вигинану заготовку — 15,0–30,0 МН/м²; вологість заготовки — 30–32%; швидкість гнуття — 30–60°/с; косошар у заготовках — <4°.

Відомі способи гнуття деревини з використанням мікрохвильового нагріву. Так, у роботі [32] зазначено, що СВЧ-нагрів є ефективним для вологої деревини, оскільки більша частина енергії поглинається водою. Автори робіт визначили низку переваг мікрохвильового прогріву:

- створюються умови для оптимального розподілу вологи по перерізу заготовки;
- продуктивність процесу гнуття можна значно збільшити;
- з'являється можливість використання для гнуття порід деревини, які раніше не піддавалися вигину;

- рівномірний прогрів за товщиною — повне розм'якшення досягається дуже швидко, особливо для масивних заготовок (2-сантиметрова заготовка прогрівається до 100 °С за 1 хвилину);

- легкий контроль температури, що забезпечує оптимізацію всього процесу.

Також наведено результати, які свідчать, що для отримання великих деформацій необхідно застосовувати мікрохвильове опромінення сирової деревини з одночасним деформуванням під час сушіння.

У науково-технічній літературі запропоновано низку альтернативних способів підвищення пластичності деревини під час гнуття. Так, у патенті М. Морімото [33] описано метод формування деревини та деревинних матеріалів (фанери, ДВП, ДСП тощо), за якого зволожену заготовку одночасно гнуть і сушать у полі СВЧ. Метод ґрунтується на високій пластичності деревини за вологості, вищої за рівноважну, а також на посиленні повзучих деформацій унаслідок одночасного нагрівання та переміщення вологи. Такий підхід відзначається технологічною простотою, ефективністю та низькими енерговитратами.

У Румунії запатентовано спосіб гнуття меблевих заготовок із використанням ультразвукової обробки [30], яка знижує модуль пружності деревини. Застосування ультразвукових коливань частотою близько 18 кГц дає змогу зменшити опір згину до 23%, що покращує умови формування деталей.

На практиці гнуття зазвичай здійснюють при співвідношенні товщини заготовки до радіуса вигину близько 1:3. Водночас хвойні та частина м'яких листяних порід обмежено придатні для гнуття з малими радіусами через утворення складок на увігнутій поверхні. Цей недолік усувається шляхом обмеження деформацій стиску, застосування шаблонів з насічками та підпресування заготовок у процесі гнуття [1].

Експериментальні дослідження [34] підтвердили можливість використання модрина для виготовлення гнутопресованих меблевих деталей, що рекомендовано для промислового впровадження в регіонах її поширення. Роботи, виконані в ЦНДІМОД під керівництвом І. І. Леонтєва [35], показали

принципову можливість виготовлення гнутих стільців із масивної деревини різних порід, зокрема сосни, ялини, модрина, берези, вільхи та осики.

У США запатентовано спосіб [30] гнуття деталей, наприклад криволінійних задніх ніжок крісла. Щоб запобігти розривам на опуклій стороні бруска та одночасно створити декоративне покриття, у прес-форму впорскують епоксидну, поліефірну, фенолформальдегідну, ПВХ, акрилатну смолу або нейлоновий пластик. Спосіб поєднує гнуття, зміцнення та оздоблення, але можливий лише за вологості деталей 8–10% і радіуса вигину близько 1,2 м ($h = 30$ мм). Відомо, що оптимальна початкова вологість деревини для гнуття становить 30%, а кінцева — 6%.

Цікавою є технологія виробництва так званої «компресійної деревини» (Comrwood), запатентована данською компанією Comrwood Machines Ltd [36]. Пиломатеріал з листяних порід (бук, ясен, дуб, вишня, клен, горіх тощо) із вологістю близько 20% пропарюється 1–2 години, після чого у пресі стискається вздовж волокон на 20–25%. Після розвантаження довжина заготовки стає меншою на 5–6%. Comrwood зберігає здатність до гнуття понад рік за умови зберігання в холоді та герметичності.

Comrwood може гнутися холодним методом: відношення $h/R = 1/6$ легко досягне, а з використанням шини — ще більше. Матеріал використовують для виробництва меблів, сходів та авторських виробів; він може гнутися вручну і навіть зав'язуватися у вузол [37]. Підходить і для малих виробників. Недоліки Comrwood: велика деформація знижує міцність на 5–10%; потреба у спеціальному горизонтальному пресі; тривалий технологічний цикл.

На Майкопському ДОКу розроблено пневматичні гнутарні верстати для виготовлення елементів гнутих стільців (підлокітників, брусів, задніх ніжок), продуктивність яких становить 2–5 тис. деталей за зміну [38]. Подальший розвиток автоматизації реалізовано у верстаті І. Ф. Чернюка [39], де застосовано магазинне завантаження та формування царг у знімних касетах, що підвищило продуктивність у 5–6 разів порівняно з традиційними рішеннями.

1.5. Висновки до розділу

Криволінійні деталі є важливою складовою дерев'яних виробів, і найбільш раціональним способом їх отримання є гнуття масивної деревини.

Однак традиційні технології вже не відповідають сучасним вимогам, оскільки потребують тривалого пропарювання та сушіння заготовок у шаблонах.

Існуючі методи пластифікації та фіксування форми або занадто дорогі, або екологічно недоцільні.

Еластичність деревини можна підвищити термічною обробкою без збільшення вологості, що відкриває можливість гнуття сухих заготовок.

Використання СВЧ-нагрівання дозволяє суттєво скоротити технологічний цикл завдяки швидкому прогріванню матеріалу по всій товщині.

1.6. Формулювання мети та завдань дослідження

Аналіз літератури свідчить, що багато результатів, отриманих у минулі роки в галузі гнуття масивної деревини, нині недостатньо застосовуються. Основними перешкодами є високі енерговитрати, значна тривалість процесу, потреба у спеціальних верстатах і великій кількості допоміжних пристроїв.

Попри це, технологія гнуття має важливі переваги, що роблять її актуальною для виготовлення вигнутих деталей меблів, столярних конструкцій, спортивного інвентарю, бондарних виробів, елементів суднобудування, музичних інструментів тощо.

Метою дослідження є розроблення на основі теоретичних та експериментальних результатів технологічних режимів і обладнання для гнуття масивної деревини дуба з використанням СВЧ-нагрівання. Це дозволить активізувати впровадження технології гнуття у виробництво й забезпечить ефективніше використання деревини та енергії.

Для досягнення цієї мети потрібно виконати такі **завдання**:

- розробити режими СВЧ-нагрівання дубових заготовок різної вологості до необхідних температурно-вологісних станів;

- дослідити здатність деревини утримувати надану форму залежно від умов гнуття;
- побудувати математичні моделі процесу гнуття та визначити на їх основі оптимальні режими;
- створити технологію гнуття маловологих заготовок;
- запропонувати модель промислової лінії гнуття деревини.

2. Методика проведення експериментальних досліджень

2.1. Обґрунтування вибору породи деревини та підготовка зразків для експериментів

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

Дуб черешчатий є добре гнучкою породою (під час гнуття досягається співвідношення, рівне 1:4). Існують численні дані про його здатність до гнуття, що є корисним для порівняння можливостей традиційної технології та технології, що розробляється. Крім того, дуб є представником кільцевосудинних порід.

Густина деревини дуба за нормалізованої вологості становить 690 кг/м³. У наших експериментах вона дорівнювала 722 кг/м³.

Анатомічна будова та технологічні властивості деревини дуба добре відомі. Для проведення експериментів була використана деревина дуба черешчатого, заготовлена на території Львівської області.

Основні експерименти виконувалися на зразках відповідно до ГОСТ 16483.21 двох типорозмірів: **10×20×350 мм** і **20×20×350 мм** (перший розмір — у радіальному напрямку, останній — уздовж волокон).

Додаткові досліді проводилися лише на дубових зразках з перерізом **20×20 мм** і довжиною **87; 175; 250 мм**, а також зразки розміром **40×40×350 мм** при вологості **11%**.

Згідно з ГОСТом під час підготовки зразків здійснювався контроль їхньої якості. Не допускалися до використання зразки з тріщинами, сучками, гниллю та іншими дефектами. Кожен зразок було промарковано. Зразки виготовлялися при вологості деревини близько **12%**, яка визначалась ваговим методом.

Для вимірювання розмірів зразків використовувався штангенциркуль, що відповідає вимогам ГОСТ 166-89, з похибкою вимірювання **0,025 мм**, та лінійка (ГОСТ 17435-72). Температура всередині сушильної шафи вимірювалася термометром, що відповідає вимогам ГОСТ 2823-73. Густина деревини визначалась за ГОСТ 21523.11-79.

Для доведення зразків до необхідної вологості використовувалась кліматична камера моделі СМ-70/180-80 ТХВО.

2.2. Опис експериментальної установки для пластифікації деревини та методика СВЧ-нагрівання

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

Таблиця 2.1 — Значення та рівні факторів уніформ-ротатбельного плану (УРП) для дубових зразків розміром 10×20×350 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	90	180	270	300

Таблиця 2.2 — Значення та рівні факторів УРП для зразків із деревини дуба розміром 20×20×350 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

Як основне обладнання під час проведення експериментів використовувалась мікрохвильова піч (модель NN-020038). Мікрохвильова піч живиться від мережі змінного струму напругою 220 В і частотою 50 Гц. Споживана потужність у мікрохвильовому режимі становить 1220 Вт за струму 5,9 А, а в режимі максимальної потужності — 1800 Вт за струму 8,2 А. Вихідна потужність у мікрохвильовому режимі складає 1000 Вт, у режимі нагрівача — 1800 Вт.

Габаритні розміри печі становлять 376 × 611 × 490 мм, а робочої камери — 242 × 412 × 426 мм. Піч укомплектована внутрішнім оснащенням типу МИ-ТК953Р і працює на робочій частоті 2450 МГц.

Піч оснащена обертовим столиком для забезпечення рівномірності впливу випромінювання на зразок. Це важливо, оскільки в робочому об'ємі печі виникає стаціонарна хвиля, і окремі частини зразка можуть потрапити в зону максимуму інтенсивності хвилі, а інші — у зону мінімуму. Крім того, на зразок

діє випромінювання, відбите від внутрішніх поверхонь печі та від поверхні самого зразка.

Для оцінювання кількості енергії, що надходить у резонатор, визначалася уявна потужність мікрохвильового випромінювання за методикою [41]. Метод базується на припущенні, що основна частина підведеної потужності поглинається достатньо великим об'ємом діелектричного матеріалу.

З метою зменшення питомої потужності, що передавалася дерев'яному зразку, у робочу камеру додатково розміщували дві склянки з хімічного скла, заповнені водою об'ємом по 1 л кожна. Схему розташування зразка та поглиначів енергії наведено на рисунку 2.1



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

Таке розміщення ємностей з водою в робочій камері забезпечило зменшення впливу стоячих хвиль і запобігло локальним максимумам температури вздовж довжини зразка.

Вимірювання температури здійснювали за допомогою термопар, підключених до мультиметрів РТ-838. У зразках виконували отвори у двох перерізах: у середині довжини та на заданій відстані від торця. У кожному перерізі розміщували по дві термопари — на осі зразка та на відстані 1 мм від поверхні; глибина отворів становила 10 мм. Реєстрація показань проводилась у безперервному режимі з відеофіксацією, що дозволяло одночасно контролювати температуру в чотирьох точках.

Обраний метод вимірювання є технічно простим і не потребує конструктивних змін мікрохвильової печі, що підтверджено попередніми дослідженнями. Середню температуру зразка визначали за середнім значенням температур, виміряних на відстані $\frac{1}{2}b$ від торця, що узгоджується з експериментальними даними.

Час нагрівання задавали штатним таймером печі. Перед дослідом зразок зважували на вагах ВК-300 і розміщували в камері. Після завершення нагріву в зразок оперативно встановлювали термопари та фіксували максимальні значення температур. Додатково вимірювали температуру води в склянках і масу зразка після обробки.

Аналітичне визначення потужності, витраченої безпосередньо на нагрів деревини, ускладнюється нерівномірністю температурного поля та тепловими втратами. Тому для спрощення розрахунків застосовано сумісний нагрів зразка з матеріалом, у якому температура розподіляється рівномірно. Як поглинач мікрохвильової енергії використовувалась вода, а виділена в ній потужність визначалася калориметричним методом відповідно до залежності, наведеної в [41]:

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

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

K — коефіцієнт перерахунку теплових кал/с у Вт (4,184 Дж·кал⁻¹);

C_p — питома теплоємність, кал·г⁻¹·°С;

m — маса речовини, г;

ΔT — різниця між кінцевою та початковою температурою, °С;

t — час, с.

У досліді 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 нагріву дерев'яного зразка разом з водою потужність, що виділяється у воді, зменшується на величину, яка дорівнює потужності, що виділилася у зразку.

Залежність, виконується лише в тому випадку, якщо після кожного експерименту мікрохвильова піч охолоджується до початкового стану. Тому після

кожного експерименту охолодження експериментальної установки здійснювалося за допомогою офісного вентилятора.

Вологість зразків визначалася ваговим способом за ГОСТ 16483.7-71 «Деревина. Метод визначення вологості» з похибкою до 0,1%. Використовувалася формула:

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

де: W — вологість зразка, %;

m — маса зразка у вологому стані, г;

m_0 — маса зразка в абсолютно сухому стані, г.

2.3. Методика дослідження стабільності форми деревини за різних температурно-вологісних режимів

Дубові зразки розміром $10 \times 20 \times 350$ мм розмічалися (як показано на рисунку 2.2) та нагрівалися в СВЧ-печі для отримання заданого температурно-вологісного стану [41]. Рівні варіювання вхідних параметрів наведені в таблиці 2.2.

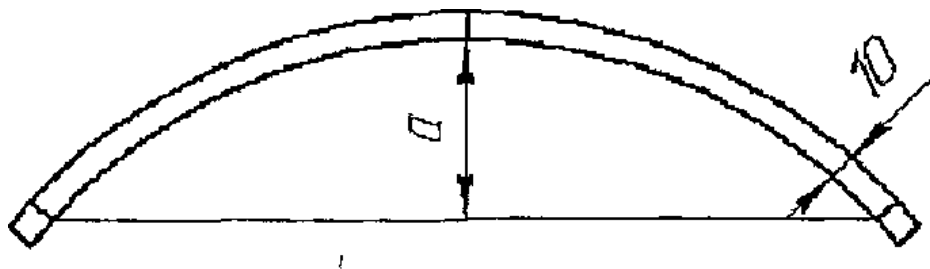


Рисунок 2.2. Схема визначення прогину зразка

Таблиця 2.3. 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.

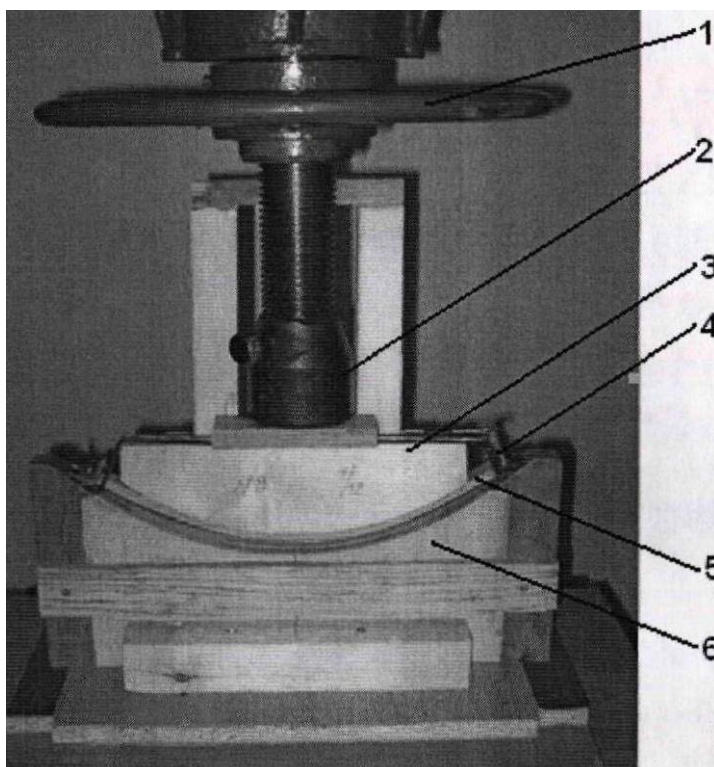


Рисунок 2.3. Лабораторний стенд і оснащення для згинання:

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 гігровологісним 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.

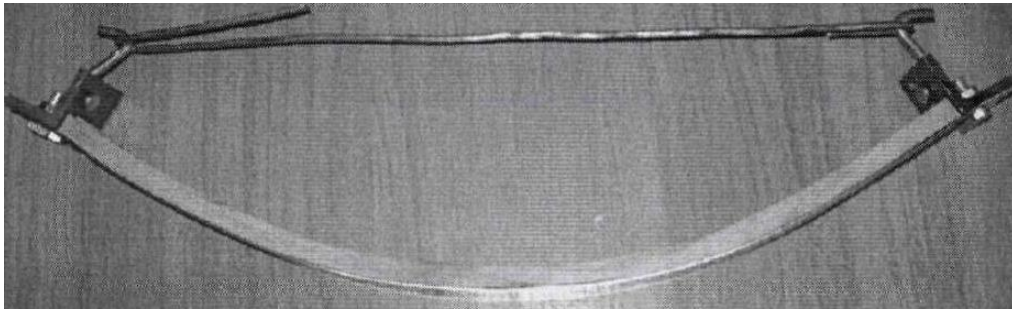


Рисунок 2.4. Зразок у зафіксованому стані

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 влагозамороженої 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 влагозамороженої деформації у % обчислювалася за формулою:

$$f = (a_0 - a_2) / a_0 \quad (3.4)$$

де: a_0 – стріла прогину перед вимочування у воді, мм

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

2.4. Установка для гнуття деревини з різними радіусами кривизни та методика оцінювання здатності до гнуття

Здатність деревини до гнуття характеризується відношенням h/R (див. 1.4). Експерименти з визначення h/R проводилися на зразках розміром $20 \times 20 \times 350$ мм. Рівні варіювання вхідних факторів наведено в таблицях 2.4 та 2.5.

Таблиця 2.4. Значення та рівні факторів УРП для деревини дуба

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

Таблиця 2.5. Значення та рівні факторів УРП для деревини осики

Найменування фактора	Рівні варіювання				
	-1,682	-1	0	+1	+1,682
Вологість, (W_K), %	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.

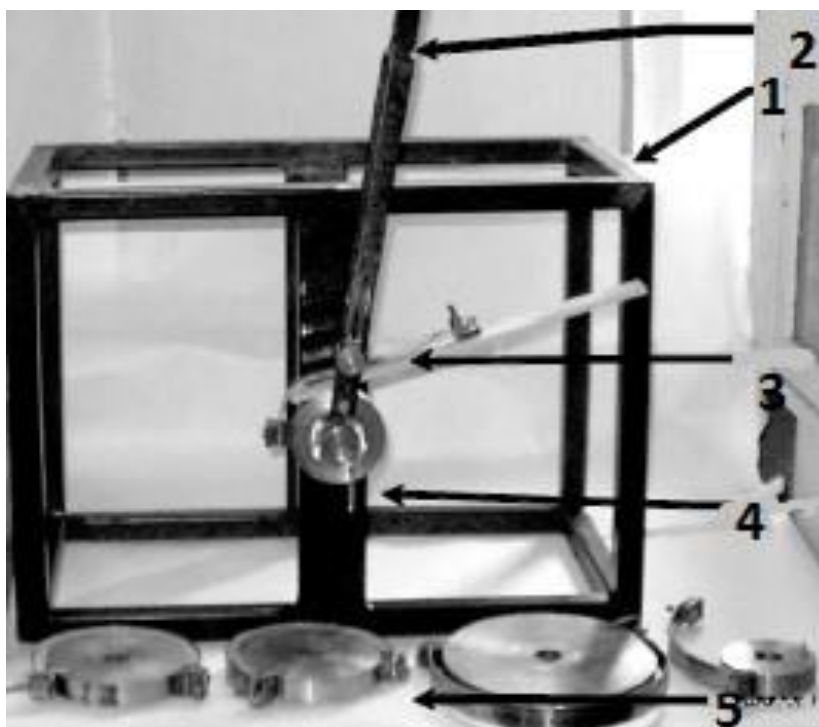


Рисунок 2.5. Установка для гнуття на різний радіус кривизни:

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 20⁰С до вологості 30 % та обчислювали відносне зміщення стріли прогину в % за формулою, аналогічною формулі (3.3).

2.5. Розроблення регресійних математичних моделей процесів пластифікації та гнуття деревини

Основою експериментальних досліджень є математична теорія планування експерименту, що ґрунтується на положеннях математичної статистики [40].

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 [40].

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» [40].

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 [40]:

$$Y_i = f_i(X_1, \dots, X_n) \quad (3.5)$$

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 [41]:

$$Y_i = f_i(X_1, \dots, X_n) + \zeta \quad (3.6)$$

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

ζ — 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 2.6–2.9.

Таблиця 2.6. 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 2.7. 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 2.8. 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	Густина	F_4
5	Наявність прихованих пороків	F_5

Таблиця 2.9. 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:

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

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 [40]. Побудова моделей здійснювалася з використанням уніформ-ротатбельного плану (УРП).

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

$$n = \frac{t^2 S^2}{\Delta^2} \quad (2.9)$$

де: t — критерій Стюдента;

S^2 — оцінка дисперсії;

Δ — 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: вибіркоче середнє \bar{X} , вибіркочову дисперсію S^2 , середнє квадратичне відхилення S , коефіцієнт варіації V , похибку середнього $S(\bar{X})$, показник точності середнього ξ [40]:

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

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

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

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

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

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

В процесі реалізації матриці були отримані результати досліджень. Після відсіювання грубих відхилень (промахів) з використанням t -критерію Стюдента за критерієм Кохрена G перевірялася гіпотеза про однорідність дисперсій дослідів [40]:

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

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

$S^2_1 + S^2_2 + \dots + S^2_M$ - 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 до розділу

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 експериментальних досліджень

3.1. Побудова математичних моделей процесу пластифікації деревини

Результати основних експериментів наведені в таблицях 3.1.–3.2.

Таблиця 3.1. Матриця планування експерименту під час дослідження середньої температури (T_{cp} , °C) нагрівання дубових зразків розміром 10×20×350 мм у натуральних показниках з результатами її реалізації

№	$W_{п}$, %	t, с	факт	розрахунок
1	36	270	119	118
2	14	270	168	168
3	36	90	95	94
4	14	90	113	113
5	40	180	100	100
6	10	180	147	147
7	25	300	150	150
8	25	60	97	97
9	25	180	125	125
10	25	180	128	125
11	25	180	120	125
12	25	180	124	125
13	25	180	127	125

Таблиця 3.2. Матриця планування експерименту під час дослідження середньої температури (T_{cp} , °C) нагрівання дубових зразків розміром 20×20×350 мм у натуральних показниках з результатами її реалізації

№	$W_{п}$, %	t, с	факт	розрахунок
1	2	3	4	5
1	36	520	95	94
2	14	520	145	147
3	36	140	76	76
4	14	140	90	93
5	40	330	83	85
6	10	330	135	133
7	25	600	118	121
8	25	60	73	71
9	25	330	100	101
10	25	330	103	101
11	25	330	98	101
12	25	330	101	101
13	25	330	100	101

Математичні моделі процесу пластифікації подані рівняннями регресії

3.1–3.6 з обмеженнями.

Рівняння регресії у натуральних показниках для деревини дуба мають такий вигляд:

1. $h=10$ мм:

$$T_c = 79,61 + 0,13W_{п} + 0,47t - 0,005W_{п}^2 - 0,0001t^2 - 0,009W_{п} t \quad (3.1)$$

$$W_K = -12,53 + 2,013W_{п} + 0,21T_c - 0,013W_{п}^2 - 0,001T_c^2 - 0,01W_{п} T_c \quad (3.2)$$

$$P_{пит} = 2,29 + 0,11W_{п} - 0,04T_c + 0,001W_{п}^2 + 0,0003T_c^2 - 0,001W_{п} T_c \quad (3.3)$$

Обмеження: $10 \leq W_{п}$, % ≤ 40 ; $60 \leq t$, с ≤ 300 ; $80 \leq T_c$, °C ≤ 120 .

2. $h = 20$ мм:

$$T_c = 89,79 - 2,01 W_{п} + 0,27t + 0,039W_{п}^2 - 0,0001t^2 - 0,004W_{п} t \quad (3.4)$$

$$W_k = -33,84 + 2,31W_{п} + 0,68T_c - 0,0159W_{п}^2 - 0,0031T_c^2 - W_{п}T_c \quad (3.5)$$

$$P_{пит} = 1,41 + 0,054W_{п} - 0,029T_c + 0,0004W_{п}^2 + 0,0002T_c^2 \quad (3.6)$$

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/см²;

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

Отримані за рівняннями регресії графічні залежності для деревини дуба подано на рисунках 3.1–3.4.

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 $W_k = f_1(W_{п}, T_c)$ визначити початкову вологість зразка для отримання заданої кінцевої вологості та температури.
2. За графіком залежності $T_c = f_2(W_{п}, t)$ знайти потрібний час нагрівання.
3. За графіком залежності $P_{пит} = f_3(W_{п}, T_c)$ 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 $80^{\circ}C$ та при заданій температурі, припускаючи, що під час нагрівання до $80^{\circ}C$ вологість деревини суттєво не змінювалася.

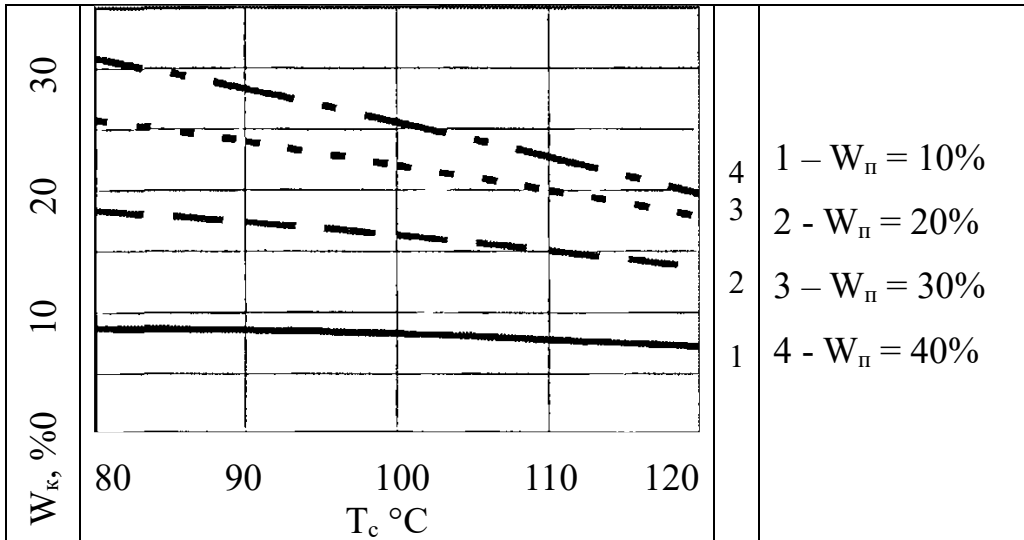


Рисунок 3.1. Залежність кінцевої вологості від температури нагрівання (дуб 10×20×350 мм)

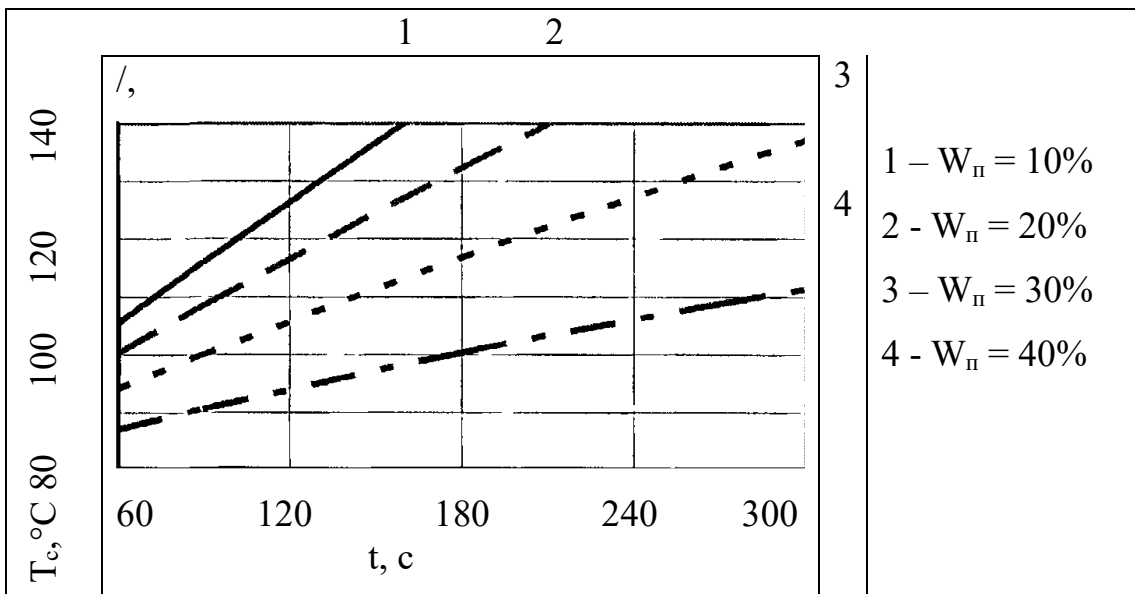


Рисунок 3.2. Залежність температури нагрівання від тривалості нагрівання (дуб 10×20×350 мм)

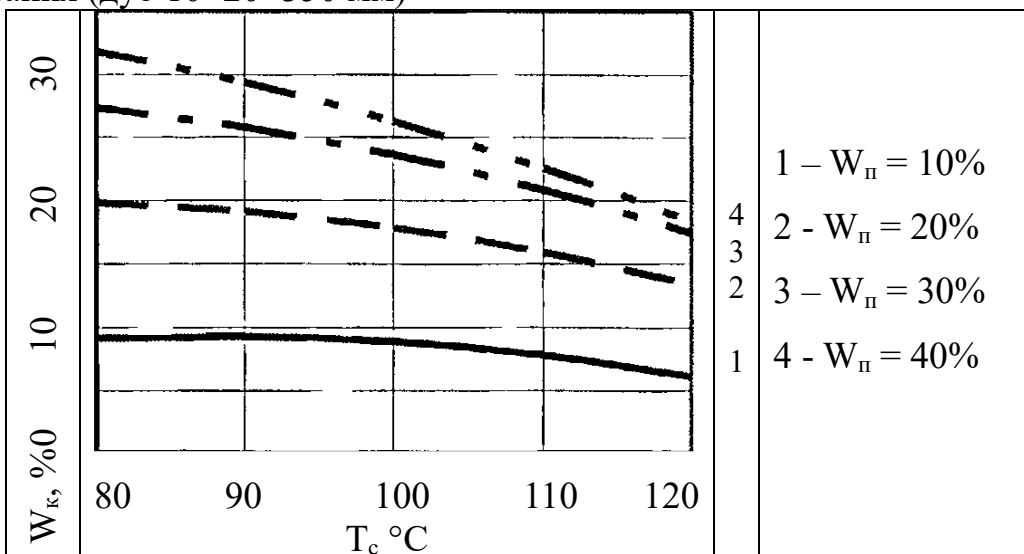


Рисунок 3.3. Залежність кінцевої вологості від температури нагрівання (дуб 20×20×350 мм)

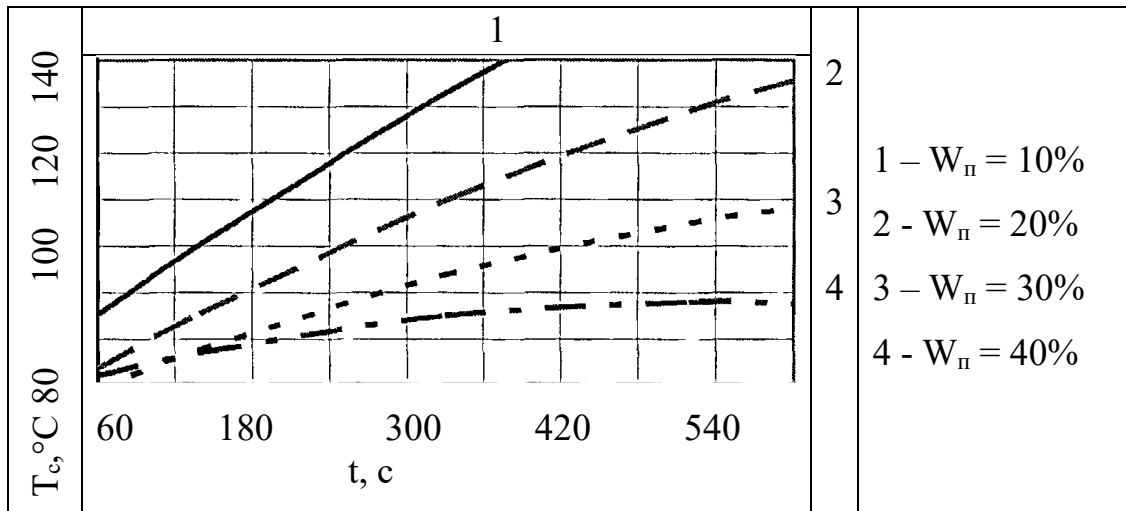


Рисунок 3.4. Залежність температури нагрівання від тривалості нагрівання (дуб $20 \times 20 \times 350$ мм).

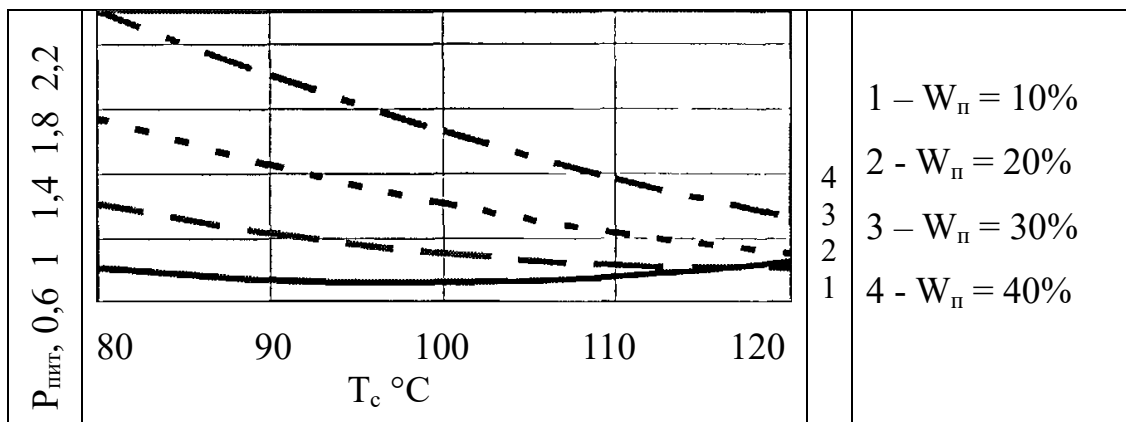


Рисунок 3.5. Залежність питомої потужності, необхідної для нагрівання дубових зразків розміром $10 \times 20 \times 350$ мм, від температури нагрівання

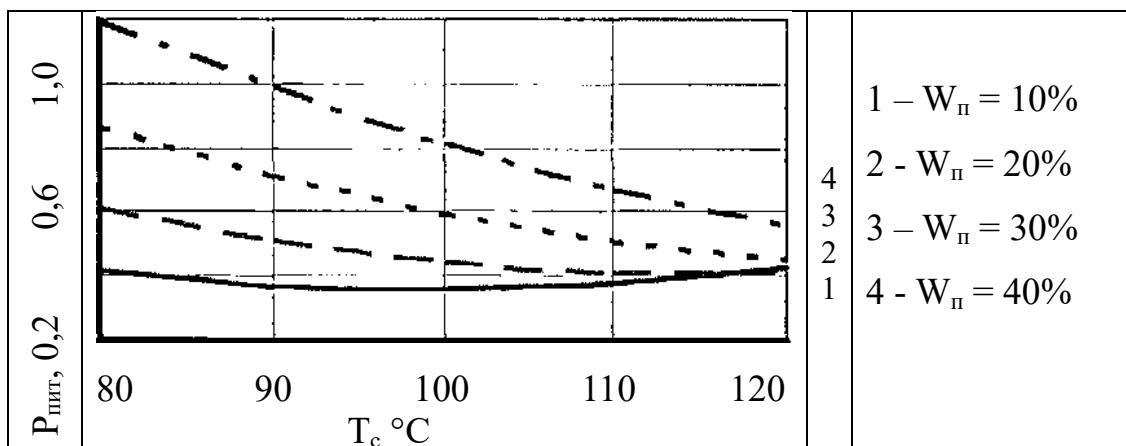


Рисунок 3.6. Залежність питомої потужності, необхідної для нагрівання дубових зразків розміром $20 \times 20 \times 350$ мм, від температури нагрівання

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.

3.2. Моделювання технологічного процесу гнуття деревини

З урахуванням результатів експертного оцінювання до математичних моделей гнуття деревини доцільно включити такі вхідні й вихідні параметри:

Вхідні параметри процесу:

- вологість заготовки перед гнуттям;
- температура заготовки перед гнуттям;

Показники процесу:

- здатність до гнуття (R/h);
- стабільність наданої форми (f, %);

Ступінь упресовки для дуба прийнято на рівні 5 %. За такого низького значення розпресовку при зволоженні не досліджували.

Для обох порід гнуття проводили в радіальній площині. Тиск на заготовку під час згину створювали нерегульованими торцевими упорами. Швидкість гнуття в експериментах становила приблизно 45° в секунду.

Матриці з результатами наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Матриця планування експерименту в натуральних показниках для деревини дуба з метою дослідження здатності до гнуття та стабілізації наданої форми.

№	W _k , %	T _{ср} , °C	факт		розрахунок	
			R/h	f, %	R/h	f, %
1	18	114	20	-3	19,9	-3,6
2	10	114	23	0	23,1	-0,2
3	18	86	14	4,6	14,2	4,2
4	10	86	21	11,7	21,3	11,7
5	20	100	15	0,6	15,0	0,5
6	8	100	23	9,4	22,8	8,7
7	14	120	23	-5,2	23,1	-5,8
8	14	80	18	8,6	17,7	8,3
9	14	100	19	6,2	19,0	5,8
10	14	100	19	6,5	19,0	5,8
И	14	100	19	5,8	19,0	5,8

12	14	100	19	6,6	19,0	5,8
13	14	100	19	5,8	19,0	5,8

Математичні моделі процесу гнуття деревини дуба представлені рівняннями регресії (3.7)–(3.8) з відповідними обмеженнями.

Рівняння регресії в натуральних показниках мають наступний вигляд:

1. Здатність до гнуття:

$$R/h = 71,54 - 2,11W_k - 0,89T_{cp} - 0,003W_k^2 + 0,004T_{cp}^2 + 0,021W_kT_{cp} \quad (3.7)$$

2. Стабільність наданої форми:

$$f = -42,76 - 1,88W_k + 1,72T_{cp} - 0,037W_k^2 - 0,01T_{cp}^2 + 0,019W_kT_{cp} \quad (3.8)$$

$$8 \leq W_k; \% \leq 20; 80 \leq T_{cp}; ^\circ C \leq 120.$$

Залежність здатності до гнуття деревини дуба від температури нагрівання представлена на рис. 3.7.

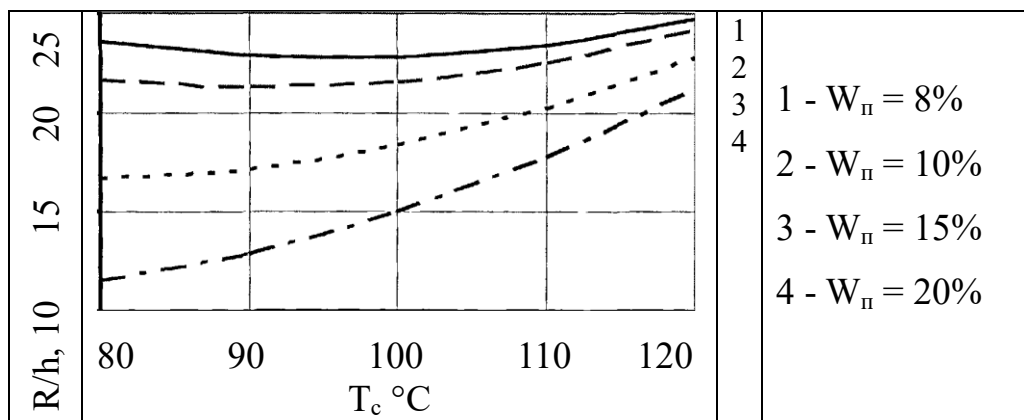


Рисунок 3.7 – Залежність здатності до гнуття деревини дуба від температури нагрівання.

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

Із рисунка 3.7 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.

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 до згинання та стабільності наданої заготовкам форми можна рекомендувати такі режими гнуття:

Для дуба:

- $(h/R = 1/23)$ ---- $W_k = 10 \%$; $T_{cp} = 105-113 \text{ }^\circ\text{C}$;
- $(h/R = 1/35)$ ---- $W_k = 8 \%$, $T_{cp} = 105-113 \text{ }^\circ\text{C}$.

При цьому стабілізація полягає у звичайному охолодженні, тобто за рахунок утворення термозаморожених деформацій.

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. Моделювання технологічного процесу фіксації форми деревини

Досліди проводилися відповідно до уніформ-ротатбельного плану, матриця якого представлена в таблиці 3.4.

Математична модель представлена рівнянням регресії (3.8).

Статистичний аналіз отриманої математичної моделі наведено в додатку А (таблиця 1).

Діаграма, побудована за рівнянням (3.8), показана на рисунку 3.8, де видно, що зі збільшенням температури нагрівання надана зразкам форма стабілізується при меншій вологості. Так, при гнутті деревини з вологістю 10 % повне закріплення форми відбувається при нагріванні до 114 °C.

Повна стабілізація форми досягається також при $W = 8 \%$ і $T = 114 \text{ }^\circ\text{C}$, що викликано накладанням термозамороженої деформації, оскільки стабілізаційне сушіння тут відсутнє.

Одним із якісних показників гнутих деталей є величина стріли прогину. Відхилення від заданої стріли прогину не повинно перевищувати ± 3 мм. Величині 3 мм на графіку відповідає значення $f = 6\%$. Зона між віссю абсцис і цим значенням є полем допуску для гнутих деталей.

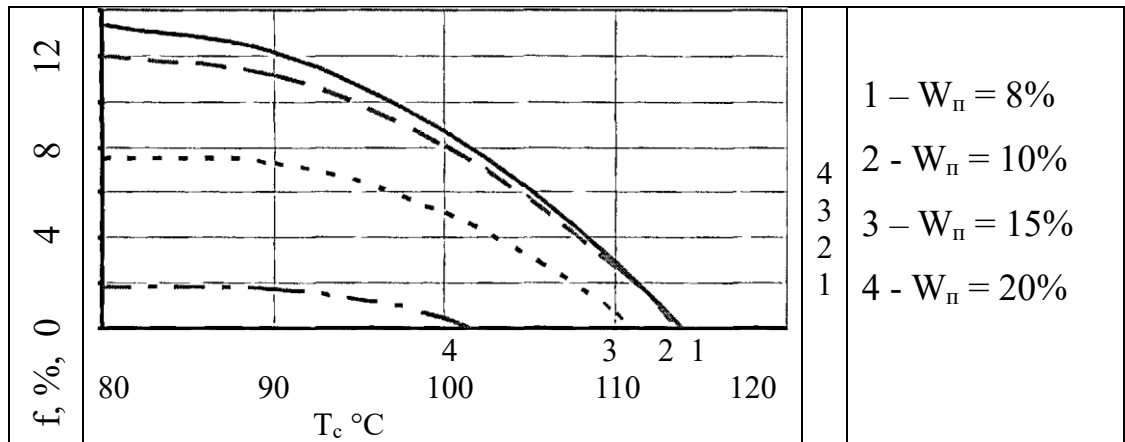


Рисунок 3.8. Залежність відносної величини зміни стріли прогину від температурно-вологісного стану деревини

На рисунку 3.9 наведено залежність відносної величини зміни стріли прогину від тривалості витримки після гнуття, побудовану для $W_k = 8\%$ при $T_{cp} = 100\text{ }^\circ\text{C}$ і $T_{cp} = 114\text{ }^\circ\text{C}$. Зміна стріли прогину спостерігається протягом перших 15 діб, після чого досягається стабілізація форми.

Таким чином, для гнуття може бути використана деревина зі значно нижчою вологістю, ніж прийнято у традиційній технології гнуття, і при цьому відбувається повна стабілізація форми.

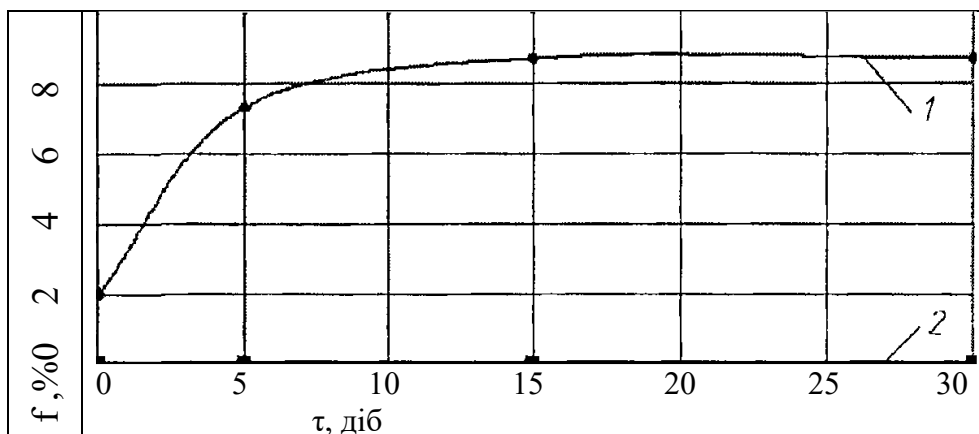


Рисунок 3.9. Залежність відносної величини зміни стріли прогину від тривалості витримки після гнуття зразків:

1 - $W_k = 8\%$ і $T_{cp} = 100\text{ }^\circ\text{C}$;

2 - $W_k = 8\%$ і $T_{cp} = 114\text{ }^\circ\text{C}$.

З рисунка видно, що для забезпечення максимально допустимої відносної величини зміни стріли прогину (6%) необхідно забезпечити середню температуру на рівні 114 °С.

3.4. 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. Момент при вигині, МПа	Y_2	Min
3. Розгин при зволоженні, %	Y_3	Min
4. Відносна величина зміни стріли прогину, %	Y_5	Min

Для усунення явища «перетягування ковдри» усі цільові функції були нормалізовані за формулою:

$$\bar{Y}_j = \frac{Y_j(g_j, f_e) - Y_j^{\min}}{Y_j^{\max} - Y_j^{\min}} \quad (3.9)$$

де: $j = 1, 2, \dots, m$;

$Y_j(g, f_e)$ — рівняння регресії, отримане в результаті експериментів;

Y_j^{\min} — мінімальний рівень цільової функції, отриманий у експериментах;

Y_j^{\max} — максимальний рівень цільової функції, отриманий у експериментах.

Використовуючи отримані вагові коефіцієнти показників властивостей гнutoї деревини, здійснимо згортку цільових функцій. Сума цільових функцій утворює адитивну функцію:

$$Y_{ad}=0,38Y_1+0,09 Y_2+0,21 Y_3+0,32 Y_5 \rightarrow \min \quad (3.10)$$

Мінімізуючи отриману функцію, одержуємо екстремум функції з набором оптимальних значень вхідних параметрів.

Процедура багатокритеріальної оптимізації виконувалася за допомогою ЕОМ у програмі *Mathcad 2001 Professional*. Лістинг багатокритеріальної оптимізації наведено в додатку Б.

На вхідні контрольовані параметри накладалися обмеження:

Вологість, %: $8 \leq W, \% \leq 20$;

Температура, С: $80 \leq T, ^\circ\text{C} \leq 120$.

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, %	20
X_2	Температура заготовки перед гнуттям, °С	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.

3.5. Розроблення конструктивної схеми промислової СВЧ-установки для пластифікації деревини

Запропонована конструкція СВЧ-установки [146] для нагрівання заготовок являє собою тунель, що складається з модулів, кожен із яких містить 5 аплікаторів (рисунок 3.10). Кожен аплікатор має довжину 0,44 м і ширину 0,31 м.

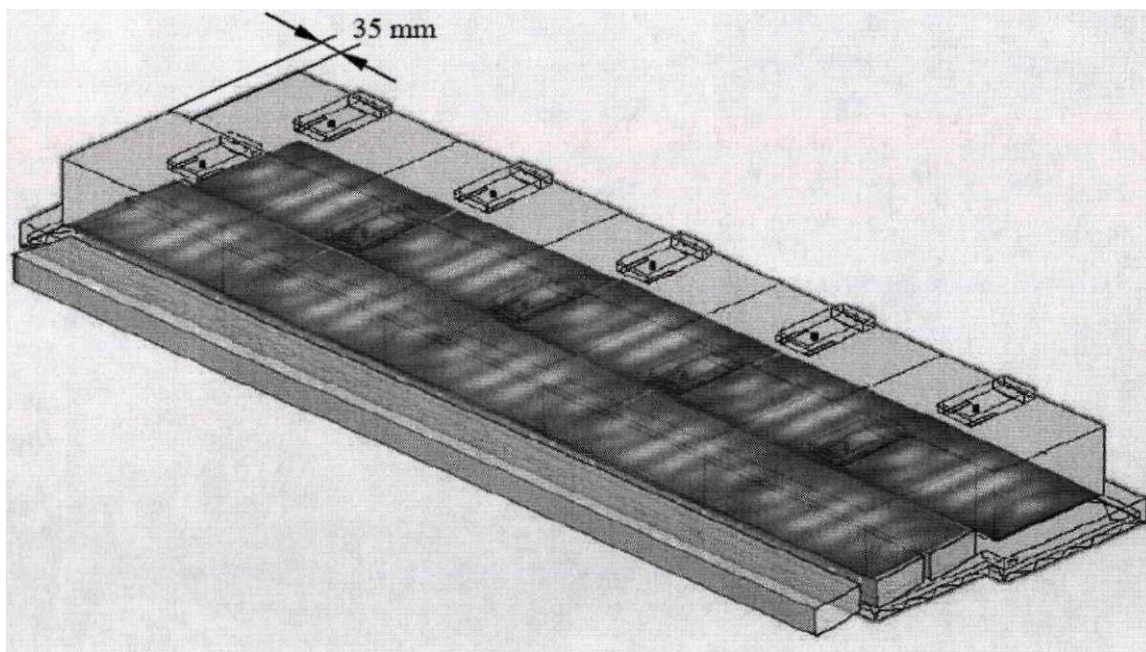


Рисунок 3.10. Конструкція тунелю конвеєрної СВЧ-установки для нагрівання заготовок

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.

3.6. Технологічна схема промислового виробництва гнутих виробів із масивної деревини

Виробництво гнутих виробів із масивної деревини за запропонованою 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 стрічкопилних колодопилних 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 круглопилних верстатах по збігу. Далі заготовки надходять на лінію для гнуття [1], що зображена на рисунку 3.11.

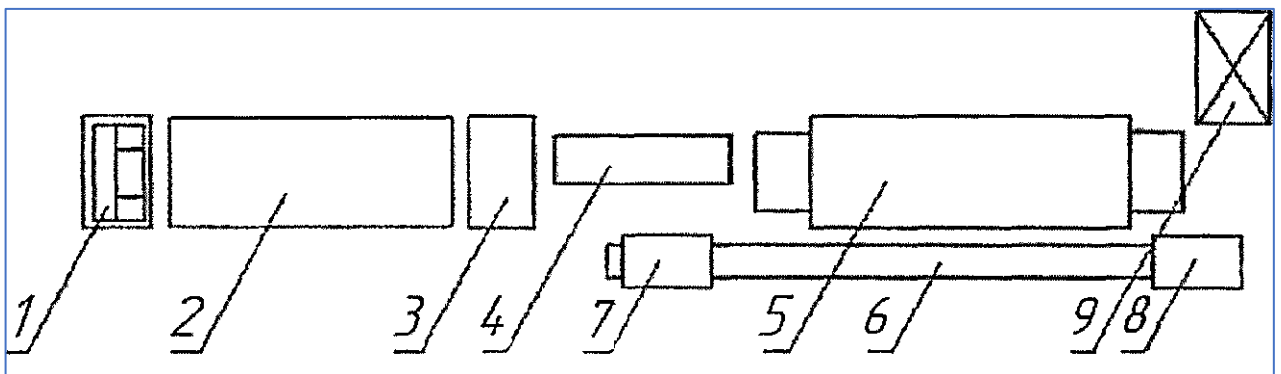


Рисунок 3.11. Потокова лінія для гнуття масивної деревини

Лінія включає послідовно розташовані: подавальний пристрій 1, СВЧ-установку прохідного типу 2, накопичувальний пристрій з обігрівом 3, гнута-рний 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 гнутарному 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 гнутарного 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 за типовими режимами.

3.7. Висновки до розділу

□ За результатами дослідження СВЧ-пластифікації деревини з використанням додаткових джерел діелектричних втрат отримано математичні моделі, що дозволяють обґрунтовувати режими нагрівання заготовок до заданих температурно-вологісних станів.

□ Розроблено математичну модель, яка описує здатність деревини дуба фіксувати форму після гнуття залежно від температури та вологості, що створює передумови для застосування режимів гнуття заготовок із пониженою вологістю.

□ Встановлено залежність здатності деревини до гнуття від основних технологічних параметрів і побудовано математичні моделі для вибору раціональних режимів формування деталей із заданими радіусами кривизни.

□ Визначено оптимальний режим гнуття дубових заготовок: вологість 20%, температура 102°C, відношення $l/h = 1/15,4$.

□ Запропоновано технологію гнуття масивної деревини з використанням СВЧ-нагрівання, що забезпечує формування криволінійних деталей із заготовок з пониженою вологістю.

□ Розроблено модель потокової лінії гнуття масивної деревини, яка передбачає застосування прохідної СВЧ-установки з живильником, накопичувального пристрою з підігрівом, конвеєра повернення оснастки та прохідної камери кондиціонування для стабілізації форми шляхом охолодження або підсушування зігнутих заготовок.

Список використаних джерел

1. Войтович І.Г. Основи технології виробів з деревини: підручник. – Львів: ТЗОВ «Країна ангелів», 2010. – 305 с.
2. Заяць І.М. Технологія виробів з деревини: Навч. Посібник/І.М. Заяць.- К.: ІСДО, 1993. -296 с.
3. 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.
- 4 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. 323-33
5. 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.
6. 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
7. 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.
8. 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.
9. Salmen, L. Viscoelastic properties of in situ lignin under water-saturated conditions [Text]/L. Salmen//J. Mat. Sci. - 1984. - 19. - P. 3090-3096.
10. Kollman, F. F. P., Cote. Principles of Wood Science and Technology [Text]/F. F. P. Kollman, Cote// Solid Wood/ Springer Verlag. - New York, 1968
11. Moren, T. Creep deformation of the surface layer of timber boards during air circulation drying [Text]/ T. Moren, M. Sehlstedt-Persson// Proc. 3rd Int. Wood Drying Conference. -Vienna, 1992. - P. 96-101.
12. Norimoto, M. Wood bending using microwave heating [Text]/ M. Norimoto, J. Gril// J. Microwave Power and Electromagn. Energy. - 1989. - 24. - N 4.- P. 203-212.
13. Seborg, R. M. Staipak [Text] / R. M. Seborg, A. I. Stamm // Mechanical Engineering. - 1945. - 67. - P. 25-91.
14. Barnes, H. M. Several vapour chemical treatments for dimensional stabilisation of wood [Text] / H. M. Barnes, E. T. Choong, R. S. Mollhenny R.S // Forest products J. - 1969. - vol. 19. - N 3. - P. 35-39.
15. 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.
16. Onisko, W. Einfluss 25%-iger Ammoniaklösung auf die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Holzes [Text] / W. Onisko, M. Matejak // Holztechnologie. - 1971. - 12.-N 1. - S. 45-54.
17. Pat. 4469156 U. S. A. Method and apparatus for shaping wood material into a predetermined configuration [Text]/ M. Norimoto, K. Hasegawa, 1984.

18. Introducing the new technology for wood bending: Precompressed Hardwood for easy bending [Electronic source] // <http://www.Compwood.dk/> 19.08.2002
19. Кійко О.А. Основи наукових досліджень. Львів: НЛТ України, 2010.- 180 с.

ДОДАТКИ

Таблица 1 – Статистический анализ полученных уравнений регрессии

Обозначение уравнения	Коэффициент множественной корреляции R	Коэффициент множественной детерминации R ²	F-критерий при уровне p<0,05	Стандартная ошибка оценки
(4.1)	0,9964	0,9928	192,4497	2,3767
(4.4)	0,9955	0,9909	152,9102	2,6172
(4.9)	0,9947	0,9895	131,5599	2,3202
(4.12)	0,9953	0,9906	147,3599	2,8131
(4.17)	0,9984	0,9967	425,9542	0,3704
(4.18)	0,9992	0,9984	850,4402	0,4296
(4.21)	0,9984	0,9969	444,8968	0,1011
(4.22)	0,9962	0,9924	181,6779	0,0069
(4.24)	0,9984	0,9967	429,1309	0,2079
(4.25)	0,9984	0,9967	425,9542	0,3704
(4.26)	0,98288	0,96606	39,85186	0,39956
(4.27)	0,99227	0,98461	89,54371	0,21830
(4.28)	0,9984	0,9967	523,5674	0,2460