

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ГНУТТЯ ДЕРЕВИНИ ЯСЕНА

Проаналізовано фактори, що впливають процес гнуття: якість бруска; порода деревини; метод пластифікації; розміри заготовки; вид гнуття; швидкість гнуття; температура деревини; вологість деревини. Обґрунтовано, що спосіб гнуття методом пластифікації в парах аміаку є досить перспективним, але маловивченим, оскільки процес пластифікації аміаком має хімічну природу, і це зумовлює дослідження значення параметрів пластифікації для конкретної породи деревини, щоб уникнути зайвих витрат матеріалів (деревини, аміаку) та електроенергії. Розроблено методику дослідження процесів гнуття, що базується на проведенні експериментів для трьох змінних факторів стосовно впливу їх на якість продукції: товщину матеріалу h , радіус згинання R та тривалість пластифікації заготовок T . За результатами оброблення даних експерименту отримано рівняння регресії, яке описує залежність кількості якісних гнутих заготовок Y_a від товщини матеріалу $h(x_1)$, радіусу згинання $R(x_2)$ та тривалості пластифікації $T(x_3)$. Отримано адекватну математичну модель, що описує відсоток якісних гнутих заготовок деревини ясеня від трьох досліджуваних факторів. Аналіз засвідчує, що при товщині заготовок 6 мм радіус згинання $R(x_2)$ та тривалість пластифікації заготовок $T(x_3)$ не суттєво впливають на кількість якісних заготовок, де цей показник наближається до 100 %. Тоді як за товщини заготовок 20 мм при радіусі згинання $R=30$ мм маємо кількість якісних заготовок на рівні 2,32 %, а при радіусі згинання $R=90$ мм маємо кількість якісних заготовок на рівні 45,47 %. Динаміка збільшення кількості якісних заготовок при зростанні тривалості пластифікації для розглянутих умов відповідно становить 9,41 % та 10,39 %. Визначено оптимальні умови ($h = 6$ мм, $R = 30$ мм, $T = 12$ год), при яких спостерігається найбільший відсоток якісних деталей $Y_{\text{max}} = 99,441$ %. Підтверджено доцільність використання відповідної концентрації аміаку для пластифікації під час виготовлення гнутих заготовок, але для отримання високої кількості якісних заготовок необхідно дотримуватись запропонованих рекомендацій. Розроблено практичні рекомендації, що базуються на методі отриманні гнутих заготовок шляхом проведення пластифікації в 35% розчині аміаку, що забезпечує максимальний вихід якісних заготовок при товщині 6 мм та радіусу згину 30 мм.

Ключові слова: деревина, вживана деревина, меблеві заготовки, гнуття, пластифікація, пресування, ясен, рівняння регресії, модель, деформативність, технологія.

Актуальність досліджень процесів гнуття заготовок деревини різних порід. Актуальність досліджень процесів гнуття заготовок деревини різних порід є досить високою, оскільки полягає у підвищенні якості продукції – розумінні властивостей різних порід стосовно уникання дефектів; оптимізації технологічних процесів – розробленні більш ефективних методів виробництва; застосуванні інновацій у виробництві – використанні спеціальних парових або гідравлічних установок, лазерного нагрівання; збільшенні міцності конструкцій, оскільки гнуті дерев'яні конструкції можуть мати більшу міцність порівняно з прямими елементами, що актуально для будівництва та машинобудування [1, 2, 4, 39, 50].

Дослідження впливу товщини матеріалу, радіусу згинання та тривалості пластифікації, зокрема деревини ясеня в процесах гнуття на кількість якісних заготовок є актуальним з кількох причин:

- Оптимізація виробничих процесів, оскільки розуміння того, як товщина матеріалу, радіус згинання та тривалість пластифікації впливають на якість заготовок, дозволяє налаштовувати

¹ Грицак Степан Степанович – аспірант, кафедра технології меблів і виробів з деревини. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103. м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-258-31-75, +38-097-477-17-39. E-mail: Hrytsak.Stepan@nltu.lviv.ua

технологічні параметри для досягнення найкращих результатів. Це особливо важливо для масового виробництва, де кожна невідповідність стандартам може призводити до значних втрат. Зменшення дефектів, так як яшень, як і, інші породи деревини, схильний до виникнення дефектів під час гнуття, таких як тріщини або розшарування. Дослідження оптимальних умов процесу допоможе зменшити кількість браку, що напряду впливає на економічну ефективність виробництва. Покращення механічних властивостей, оскільки правильний вибір товщини матеріалу, радіусу згинання та часу пластифікації може покращити механічні властивості кінцевих виробів, підвищуючи їхню міцність та довговічність [9, 27, 28, 44, 49, 50]. Це важливо для застосувань, де на конструкції можуть діяти значні навантаження.

- Ефективне використання ресурсів, так як оптимізація процесів гнуття дозволяє більш ефективно використовувати матеріал, зменшуючи кількість відходів. Це сприяє раціональному використанню природних ресурсів і зменшенню витрат. Інноваційні рішення у дизайні, оскільки вивчення впливу технологічних параметрів на якість заготовок відкриває можливості для створення нових форм і конструкцій у меблевій промисловості, дизайні інтер'єрів та інших галузях. Покращення екологічності виробництва, так як зменшення кількості браку та оптимізація процесів гнуття сприяють зниженню загального впливу на навколишнє середовище, що є важливим фактором у сучасному виробництві [17, 18, 19, 20, 29, 30, 43, 44, 48].

- Адаптація до нових матеріалів і технологій, оскільки такі дослідження можуть сприяти адаптації традиційних технологій до нових матеріалів або комбінування деревини ясеня з іншими матеріалами, що відкриває нові можливості для інновацій у продуктах [5, 10, 13, 14].

Таким чином, актуальність цих досліджень обумовлена потребою у підвищенні ефективності, якості та економічності виробничих процесів, а також у покращенні властивостей кінцевих продуктів. Загалом, такі дослідження спрямовані на підвищення якості та ефективності виробничих процесів, що має важливе значення як для виробників, так і для кінцевих споживачів.

Проблема досліджень гнуття деревини ясеня різного походження та різного сорту. Дослідження гнуття деревини ясеня різного походження та різного сорту стикається з низкою проблем, які можуть впливати на результати та їх інтерпретацію. Основні проблеми включають:

- Яшень різного походження та сорту може значно відрізнятися за фізико-механічними властивостями, такими як щільність, вологість, вміст смол, структура волокон, що впливає на поведінку деревини під час гнуття. Це ускладнює стандартизацію процесів і вимагає індивідуального підходу до кожної партії матеріалу. Якість ясеня може значно змінюватись залежно від сорту, який визначає наявність сучків, тріщин, заболоні тощо. Деревина нижчого сорту зазвичай має більше вад, що збільшує ризик виникнення дефектів під час гнуття [43, 49, 50].

- Деревина є природним матеріалом, схильним до змін під впливом зовнішніх факторів (температура, вологість). Це може призводити до варіацій у результатах гнуття навіть у межах однієї партії матеріалу, що ускладнює досягнення стабільної якості продукції. Підбір оптимальних параметрів гнуття (температура, час пластифікації, швидкість згинання) може бути складним через змінність властивостей деревини різного походження. Це потребує великої кількості експериментів для встановлення найкращих умов для кожного типу деревини.

- Через значну варіативність деревини виникають труднощі у розробці універсальних стандартів для процесів гнуття. Це створює проблеми у забезпеченні стабільної якості продукції на різних виробництвах. Існуючі теоретичні моделі часто не враховують всіх властивостей деревини, таких як природні дефекти чи внутрішня напруга. Це може призводити до розбіжностей між очікуваними і реальними результатами. Походження деревини (регіон росту, кліматичні умови) може впливати на її властивості [7, 36, 42, 44, 49, 50].

- Деревина з різних регіонів може мати різну щільність, вологість, а також інші специфічні особливості, що вимагає врахування цих факторів при дослідженні гнуття. Через значну кількість змінних факторів результати досліджень гнуття можуть бути складними для відтворення, що ускладнює процес розробки універсальних рекомендацій та інструкцій для виробництва [12, 15, 23, 25, 34, 45, 46].

Стосовно дослідження впливу товщини матеріалу, радіусу згинання та тривалості пластифікації деревини ясена на кількість якісних заготовок у процесах гнуття стикається з кількома основними проблемами:

- Товщина матеріалу, радіус згинання та тривалість пластифікації впливають на результати не окремо, а в комплексі. Це ускладнює визначення оптимальних умов, оскільки зміна одного параметра може суттєво вплинути на поведінку деревини в процесі гнуття.

- Навіть при контрольованих умовах, процес гнуття деревини може бути нестабільним через природну варіативність властивостей деревини ясена, таких як щільність, вологість та структура волокон [49]. Це призводить до труднощів у відтворюваності результатів і збільшує частку дефектних заготовок. Оцінка впливу кожного з параметрів (товщини, радіусу згинання, тривалості пластифікації) на якість заготовок може бути утрудненою через складність точного вимірювання та контролю всіх умов процесу. Через різноманіття порід ясена, їхнього походження та сортності, універсальні рекомендації щодо товщини матеріалу, радіусу згинання та тривалості пластифікації можуть бути неточними або непридатними для різних умов. Це вимагає індивідуальної настройки процесів для кожного конкретного випадку.

- Існуючі теоретичні моделі, які використовуються для прогнозування результатів гнуття, часто не враховують усіх можливих змінних, таких як внутрішні напруги в деревині, наявність сучків, тощо. Це може призводити до невідповідності між теоретичними прогнозами і реальними результатами. Тривалість і умови пластифікації (наприклад, парування або використання хімічних розчинів) суттєво впливають на здатність деревини до згинання. Недостатня або надмірна пластифікація може призвести до збільшення кількості дефектів, таких як розтріскування чи ламкість заготовок [1, 2, 38, 39, 40]. При неправильно підібраних параметрах товщини, радіусу або часу пластифікації існує високий ризик утворення дефектів, таких як тріщини чи нерівномірне згинання, що негативно впливає на кількість якісних заготовок.

- Постійне тестування різних параметрів гнуття для визначення оптимальних умов є ресурсозатратним процесом, що може значно підвищувати загальну вартість виробництва.

Таким чином, ці проблеми вимагають детального вивчення та адаптації технологічних процесів під специфічні властивості деревини кожного сорту та походження, а також розробки більш точних моделей, що враховують усі можливі варіації матеріалу.

Аналіз літературних джерел. Аналіз літературних джерел стосовно процесів гнуття деревини різного походження, різних порід, та різними методами показує, що ця тема є добре дослідженою, але має свої особливості, які варіюються залежно від породи деревини, методу гнуття та умов обробки. Основні аспекти, які висвітлюються у літературі, включають:

- Дослідження показують, що різні породи деревини мають різні властивості, що впливають на їх здатність до гнуття. Наприклад, ясен, бук, дуб та клен зазвичай розглядаються як кращі для гнуття через їхню здатність витримувати значні деформації без тріщин. Породи з менш щільною структурою, такі як сосна чи ялина, менш придатні для гнуття, оскільки мають меншу міцність на злам і більше схильні до розтріскування [1, 2, 3, 9, 18, 32, 38, 39, 40, 49].

- Походження деревини (первинна або вживана) впливає на її властивості, такі як щільність, вологість та вміст смол, що, в свою чергу, впливає на здатність деревини до гнуття [6-13, 23-27, 31-33, 36]. Деревина, вирощена в різних регіонах, може мати різні характеристики, навіть якщо належить до однієї породи. Це ускладнює стандартизацію процесів гнуття.

- Аналіз методів гнуття, зокрема парове гнуття ефективно для багатьох порід, але потребує ретельного контролю часу і температури; гнуття з використанням хімічних реагентів - метод менш екологічний, але може бути ефективним для порід, що важко гнуться; гідравлічне гнуття – підходить для товстих і жорстких заготовок, але ризик тріщин може бути високим без попередньої обробки пластифікаторами; мікрохвильове гнуття – інноваційний метод, що зменшує час обробки і дозволяє досягти високої якості згинання.

- Товщина деревини, радіус згинання і тривалість пластифікації мають значний вплив на кінцевий результат. Виявлено, що тонші заготовки гнуться легше, але можуть бути менш міц-

ними. Великий радіус згинання зменшує ризик дефектів, тоді як малий радіус підвищує вимоги до якості обробки та пластифікації [1, 2, 38-40, 50]. Тривалість пластифікації також критично впливає на якість. Надмірна пластифікація може призвести до пошкодження структури деревини, тоді як недостатня — до тріщин і ламкості.

Аналіз літератури показує, що процеси гнуття деревини є складними і залежать від багатьох факторів. Однак, завдяки постійному розвитку технологій і методів досліджень, досягається все більш високий рівень контролю та якості у виробництві гнутих дерев'яних виробів.

Особливості гнуття вживаної деревини (ВЖД). Гнуття ВЖД має свої особливості та виклики, які відрізняються від роботи з новою деревиною. Цей процес стає актуальним у контексті екологічного будівництва [30, 35, 39, 40], відновлення меблів та повторного використання матеріалів [5, 10, 13, 14, 16, 22, 24, 26, 33, 41]. Ось основні особливості, з якими стикаються при гнутті ВЖД:

- ВЖД може мати мікротріщини, зношену поверхню, зміни в щільності та вологості через час, які ускладнюють процес пресування у різних технологіях перероблення [3, 6, 8, 43, 47, 50]. Зміни у структурі можуть знижувати еластичність матеріалу, роблячи його більш ламким і менш піддатливим до згинання без пошкоджень.

- ВЖД може містити залишкові внутрішні напруження, що виникли в результаті попередніх механічних навантажень, впливу навколишнього середовища або змін в умовах експлуатації. Це може призводити до раптових тріщин чи зламів під час гнуття.

- ВЖД часто вже пройшла через певні процеси обробки: фарбування, лакування, просочення. Ці обробки можуть впливати на здатність деревини до пластифікації та згинання. Деякі хімічні речовини, використані раніше, можуть ускладнювати процеси пластифікації або взаємодіяти з новими матеріалами, які застосовуються під час гнуття.

- ВЖД може мати невизначене походження, сорт та вид породи, що ускладнює вибір правильних умов для гнуття, таких як температура і тривалість пластифікації. Відсутність точних даних про матеріал може призвести до неконтрольованих результатів.

- ВЖД часто має нестабільний рівень вологості, який може бути або занадто низьким (сухість) або занадто високим (вбирання вологи з навколишнього середовища). Обидва ці стани можуть негативно вплинути на процес гнуття, оскільки потрібен оптимальний рівень вологості для пластифікації. Часто ВЖД має механічні пошкодження, такі як подряпини, вм'ятини, злами чи навіть незначні тріщини. Ці дефекти можуть значно впливати на здатність матеріалу до гнуття, збільшуючи ймовірність додаткових пошкоджень під час процесу.

- Деревина, яка була у вжитку, може бути неоднорідною по своїй структурі через механічні пошкодження, гниття або вплив інших зовнішніх факторів. Це ускладнює отримання якісних заготовок [3, 4, 21, 35, 37, 39, 50], а тим більше контроль процесу гнуття, оскільки деякі частини заготовки можуть піддаватись деформації краще, ніж інші.

- Для ВЖД можуть бути необхідні спеціальні методи, такі як довша пластифікація, використання додаткових пластифікаторів, парове гнуття з попередньою хімічною обробкою або більш м'які методи згинання, щоб уникнути додаткових пошкоджень. Важливо ретельно перевіряти вживану деревину на наявність сторонніх включень, наприклад, цвяхів чи інших металевих предметів, які можуть створити небезпеку під час механічної обробки або гнуття.

- Використання ВЖД може бути екологічно виправданим і економічно вигідним, але потребує додаткових зусиль для забезпечення її якості та довговічності після обробки [9, 11, 27, 28, 31, 44]. Це робить дослідження та розробку технологій гнуття ВЖД важливою задачею.

Загалом, гнуття ВЖД вимагає індивідуального підходу та ретельної підготовки матеріалу, включаючи оцінку його стану, підбір технологічних параметрів і використання спеціальних методів для досягнення якісного результату.

Об'єктом досліджень є встановлення впливу товщини матеріалу, радіусу згинання та тривалості пластифікації деревини ясена в процесах гнуття на кількість якісних заготовок. **Предметом досліджень** є заготовки деревини ясена.

Метою роботи є встановлення закономірностей впливу товщини матеріалу, радіусу згинання та тривалості пластифікації деревини ясена на кількість якісних гнутих заготовок.

Методика досліджень. Для досягнення мети необхідно розв'язати такі задачі: проаналізувати область експерименту; вибрати змінні фактори та встановити межі їх змін; спланувати пошуковий експеримент, здійснити статистичний аналіз даних, перевірити нормальність розподілу даних і визначити необхідну кількість дубльованих спостережень; спланувати та виконати експериментальні дослідження згідно матриці планування для трьох змінних факторів, побудувати математичну модель;

Постійними факторами у даному експерименті є: порода деревини; температура і вологість в приміщенні; вид просочувального розчину; метод пластифікації; концентрація аміаку; напрям волокон деревини; ширина заготовок. Температура в цеху зафіксована на стабільному рівні і згідно санітарно-гігієнічних норм становить 18 °С. Порода деревини, пористість, хімічний склад, твердість, якість – визначають на початку досліджень і звичайно ці параметри повинні залишатися незмінними до кінця її завершення. В даному випадку деревина ясена. Метод пластифікації – це безперечно основний із самих важливих факторів впливу. В якості пластифікатора використовується 35% розчин аміаку. Концентрація аміаку під час проведення дослідів, підтримувалася постійною. Ширина заготовок – 15 мм.

У роботі були задіяні дві установки: лабораторна – в якій проводилася пластифікація брусків, та для гнуття – де проводився процес надання бруску криволінійної форми. Схема лабораторної установки для пластифікації деревини була представлена у вигляді прямокутної герметичної посудини. Різні породи деревини мають різні допустимі радіуси згинання. Із збільшенням товщини збільшується відсоток браку зігнутих заготовок. Неякісно підібраний матеріал при гнутті буде причиною сколів, тріщин і т. д. Чим більший радіус згинання, тим більший відсоток якісних заготовок. Із збільшенням тривалості пластифікації заготовок перед гнуттям, зменшується відсоток браку зігнутих заготовок.

У результаті досліджень явища з літературних джерел, практичного досвіду і теоретичного аналізу досліджень було вибрано область експерименту (табл. 1). Для дослідження процесів гнуття вибираємо три фактори впливу на якість продукції: товщину матеріалу 6, 13, 20 мм (***h***), радіус згинання 30, 60, 90 мм (***R***) та тривалість пластифікації заготовок 12, 36, 60 мм (***T***).

Проводимо кодування змінних факторів: зберігаючи послідовність, кожному фактору товщина бруска ***h***, радіус гнуття бруска ***R*** і тривалість пластифікації ***T*** присвоюємо кодоване значення, відповідно, X_1 , X_2 , X_3 . З метою спрощення записів у методичній сітці дослідів приймаємо позначення верхньої межі фактора, середнього рівня та нижньої межі, відповідно -1, 0, +1.

Таблиця 1. Матриця планування для трьох змінних факторів

Назва фактору		Фактор	Код	Натуральні значення фактору			Кодовані значення фактору			
				нижнє	основне	верхнє	нижнє	основне	верхнє	
Товщина	мм	<i>h</i>	x_1	6	13	20	-1	0	1	7
Радіус	мм	<i>R</i>	x_2	30	60	90	-1	0	1	30
Тривалість пластифікації	год	<i>T</i>	x_3	12	36	60	-1	0	1	24

Особливу складність представляє вибір функції відгуку. Вона має бути чисельною величиною. При аналізі якості гнуття такою величиною може бути відсоток якісних заготовок. Отримані методом гнуття заготовки умовно можна розділити на три групи: якісні Y_1 , умовно якісні Y_2 , браковані Y_3 . Кожен дослід дублювався 5 разів. Якісна це заготовка без тріщин з гладкою поверхнею. Умовно якісна з тріщинами до 2 – 3 мм в ширину і до 30 мм по довжині, також сюди відносяться заготовки з косошаром в зв'язку з неякісним підбором деревини. Браковані це заготовки, які в процесі згинання розколювалися поперек волокон. Якщо Y_1 – процент якісних, Y_2 – умовно якісних, Y_3 – бракованих, то вихідним параметром був $Y_{\text{я}}$, як середнє значення суми якісних і умовно якісних заготовок.

Результати (Results). Згідно методики досліджень було виготовлено експериментальні бруски із ясеня та виконано дослідження для порівняльного аналізу шляхом встановлення максимальної кількості якісних заготовок $Y_{\text{я}}$ (рис. 1).



Рис. 1. Гнуті взірці деревини ясеня

Результати експериментальних випробувань на встановлення впливу товщини матеріалу h , радіусу згинання R та тривалості пластифікації заготовок T на отримання максимальної кількості якісних заготовок $Y_{\text{я}}$ із деревини ясеня представлено у табл. 2. Проводимо обробку результатів, яка полягає у визначенні дисперсії і перевірці математичної моделі на адекватність. Для кожної j -ої вибірки знаходимо середні значення та дисперсії.

Таблиця 2. Розрахунок середніх значень та дисперсії

№	Результати u_{ij} досліджень при гнутті ясеня, МПа					Середнє значення в j -ій вибірці	Дисперсія в j -ій вибірці
	u_{1j}	u_{2j}	u_{3j}	u_{4j}	u_{5j}		
1	2	3	4	5	6	7	8
9.	100	99	100	98	99	99,20	0,70
10	1	1	1	2	1	1,20	0,20
11	100	100	99	97	98	98,80	1,70
12	45	43	50	48	47	46,60	7,30
13	100	99	100	97	99	99,00	1,50
14	15	16	17	18	19	17,00	2,50
15	100	100	99	99	97	99,00	1,50
16	51	55	53	54	56	53,80	3,70
	Сума					514,60	19,10

$$\text{Дисперсію відтворюваності: } S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^N S_j^2}{N}; \quad (1)$$

Підставивши дані у формулу 1 отримаємо значення дисперсії відтворюваності: $S_y^2 = 19,10/8=2,3875$. Отримано коефіцієнти та їх значимість. Для визначення коефіцієнтів рівняння було використано методику статистичної обробки даних і розраховано коефіцієнти рівняння регресії (табл. 3).

Таблиця 3. Розрахунок коефіцієнтів регресії математичної моделі

Коефіцієнт	Величина коефіцієнта	t(q,f _y) S {b _i }	Висновок	Межі достовірного інтервалу	
				b _i – t _{табл} S {b _i }	b _i + t _{табл} S {b _i }
b ₀	64,325	0,4984	Значуще	63,8266	64,8234
b ₁	-34,675		Значуще	-35,1734	-34,1766
b ₂	10,225		Значуще	9,7266	10,7234
b ₁₁	2,875		Значуще	2,3766	3,3734
b ₂₂	10,325		Значуще	9,8266	10,8234
b ₁₂	2,875		Значуще	2,3766	3,3734

$$\text{Для дисперсії адекватності: } \sum_{j=1}^8 (\bar{y}_j - y_j^p)^2 \quad (2)$$

Таблиця 3. Розрахунок дисперсії адекватності

№ досліду	$\bar{y}_j$	y_j^p	$(\bar{y}_j - y_j^p)^2$
9.	99,2	98,1	1,3
10.	1,2	2,325	1,265625
11.	98,8	99,9	1,3
12.	46,6	45,475	1,265625
13.	99,0	100,1	1,3
14.	17	15,875	1,265625
15.	99,0	97,9	1,3
16.	53,8	54,925	1,265625
Сума			10,125

$$\text{Визначаємо дисперсію адекватності: } S_{ad}^2 = \frac{n}{f_{ad}} \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - y_j^p)^2 \quad (3)$$

$$S_{ad}^2 = 5/(8-7) \times 10,125 = 50,625.$$

$$\text{Розрахункове значення критерію Фішера: } F_{рооз.} = \frac{S_{бильша}^2}{S_{менша}^2} = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} \quad (4)$$

Підставивши дані у формулу 4 отримаємо розрахункове значення критерію Фішера $F_{рооз.}$: $F_{рооз.} = 50,625/2,3875=21,2042$. Табличне значення критерію Фішера $F_{табл.}$, яке залежить від рівня значимості $q=5\%$, числа ступенів вільності дисперсії адекватності $f_{ad}=8-7=1$ та числа належних оцінок дисперсії відтворюваності $f_y=8*(5-1)=32$: $F_{табл.}=252$. Оскільки, $21,2042 < 252$ ($F_{рооз.} < F_{табл.}$), тоді регресійна модель адекватна. За результатами оброблення даних експерименту отримано рівняння регресії, яке описує залежність кількості якісних заготовок Y_j від товщини матеріалу $h(x_1)$, радіусу згинання $R(x_2)$ та тривалості пластифікації заготовок $T(x_3)$.

Одержана математична модель – рівняння регресії в нормалізованих значеннях змінних факторів має вигляд:

$$y=64,325 - 34,675x_1 + 10,225x_2 + 2,875x_3 + 10,325x_1x_2 + 2,875x_1x_3 - 1,025x_1x_2$$

Запис математичної моделі – рівняння регресії в натуральних значеннях змінних факторів такий:

$$Y_{\text{я}} = 147,243 - 8,5196 h - 0,2 R - 0,0173 T + 0,04917 Rh + 0,017113 Th - 0,001423611 RT.$$

Оскільки вплив факторів і взаємодій на функцію відгуку добре аналізувати на основі графіків, побудованих за рівнянням регресії, то побудуємо три групи графіків залежності вихідної величини y від фактору X_1 , X_2 , X_3 при різних фіксованих значеннях інших факторів.

Таким чином отримаємо дев'ять графіків залежності y в натуральних позначеннях. На основі отриманої математичної моделі розглянемо вплив кожного з факторів на відсоток якісних заготовок.

Графічна інтерпретація залежностей на рис. 2, рис. 3 та рис. 4.

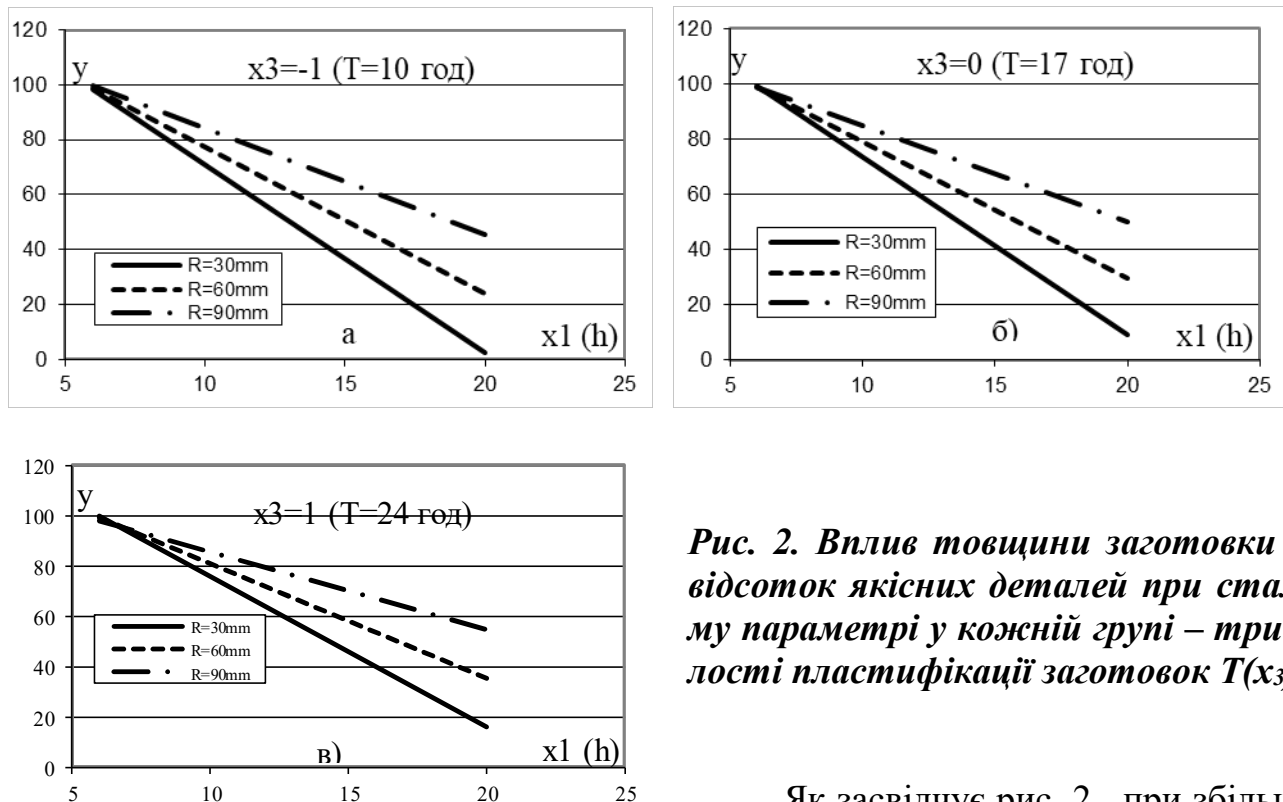


Рис. 2. Вплив товщини заготовки на відсоток якісних деталей при сталому параметрі у кожній групі – тривалості пластифікації заготовок $T(x_3)$

Як засвідчує рис. 2. при збільшенні товщини матеріалу частка якісних деталей зменшується. Також при збільшенні радіусу кількість якісних деталей також зростає.

Аналіз засвідчує, що при товщині заготовок 6 мм радіус згинання $R(x_2)$ та тривалість пластифікації заготовок $T(x_3)$ не суттєво впливають на кількість якісних заготовок, а цей показник наближається до 100 %. Тоді як за товщини заготовок 20 мм при радіусі згинання $R=30$ мм маємо кількість якісних заготовок на рівні 2,32 %, а при радіусі згинання $R=90$ мм маємо кількість якісних заготовок на рівні 45,47 %. Динаміка збільшення при зростанні тривалості пластифікації відповідно становить 9,41 % та 10,39 %.

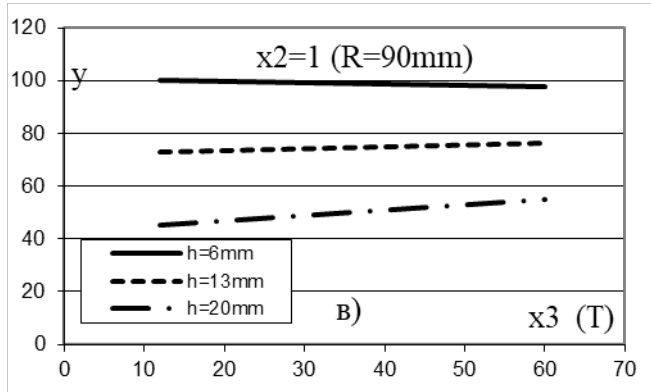
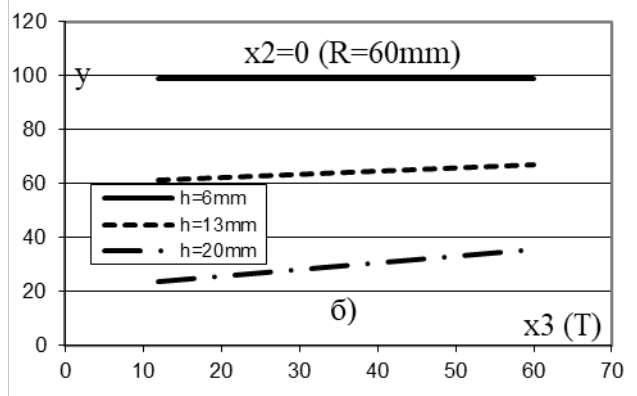
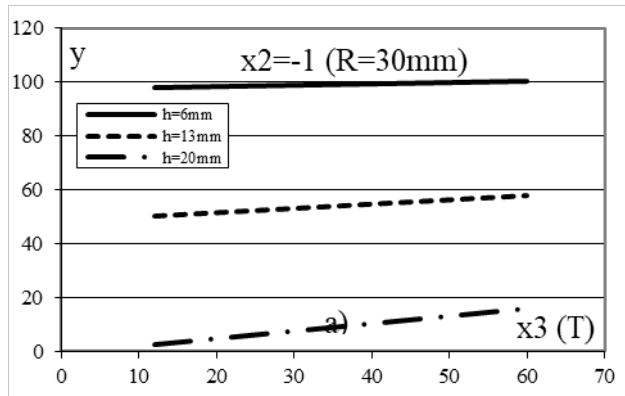


Рис. 3. Вплив тривалості пластифікації заготовок на відсоток якісних деталей при сталому параметрі у кожній групі – радіусу згинання $R(x_2)$

З рис. 3 випливає, що при збільшенні тривалості пластифікації частка якісних деталей зростає для товстіших заготовок.

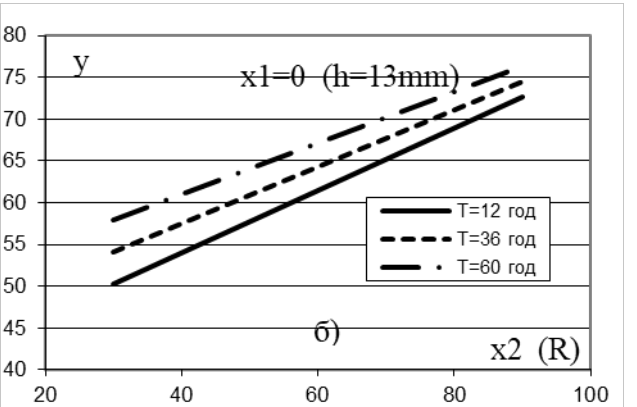
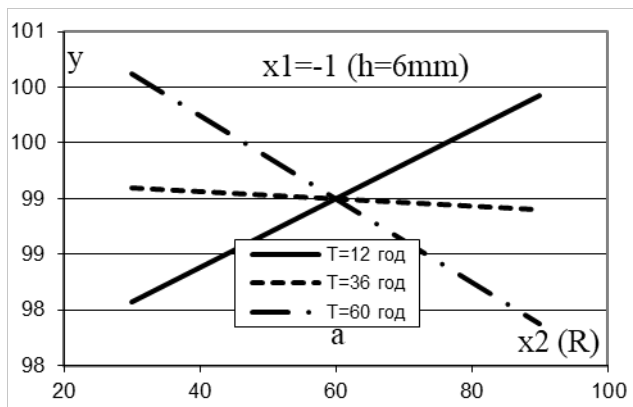


Рис. 4. Вплив радіусу згинання на відсоток якісних деталей при сталому параметрі у кожній групі – товщини матеріалу $h(x_1)$

З рис. 4 випливає, що при збільшенні радіусу згинання відсоток якісних заготовок збільшується, а відповідно при збільшенні товщини деталей відсоток якісних деталей зменшується.

Дослідження процесів гнуття деревини в парах аміаку є перспективним напрямом в області матеріалознавства і деревообробки. Вплив парів аміаку на деревину значно знижує її жорсткість, дозволяючи отримувати складні вигнуті форми без розтріскування або інших дефектів.

Перспективні напрями досліджень процесів гнуття деревини ясена та інших порід в парах аміаку:

- Аналіз, як різні породи деревини (ясен, дуб, бук) реагують на обробку парами аміаку. Дослідження оптимальних умов (температура, концентрація аміаку, час обробки) для кожної породи для досягнення максимального ефекту гнуття без пошкодження структури деревини.
- Оцінка змін у міцності, жорсткості та еластичності деревини після обробки парами аміаку. Визначення, як ці зміни впливають на довговічність і стабільність кінцевих виробів. Дослідження хімічних реакцій, які відбуваються між парами аміаку та компонентами деревини (лігнін, целюлоза). Вплив аміаку на колір, текстуру і можливість фарбування обробленої деревини.
- Розробка математичних моделей і симуляцій процесу гнуття для передбачення оптимальних параметрів. Вивчення взаємодії параметрів обробки (температура, тиск, час) та геометричних характеристик виробів (радіус гнуття, товщина матеріалу).
- Оцінка екологічного впливу використання парів аміаку в деревообробці. Розробка методів зменшення викидів аміаку та забезпечення безпечних умов праці для працівників.
- Використання альтернативних джерел аміаку або комбінацій хімічних речовин для покращення результатів гнуття. Інтеграція сучасних технологій (наприклад, 3D-друк для створення прес-форм) для підвищення точності процесу.

Ці напрямки досліджень можуть суттєво розширити можливості використання деревини в інноваційних конструкціях та дизайні, а також покращити ефективність і екологічність процесу гнуття деревини.

Висновки.

1. Проаналізовано фактори, що впливають процес гнуття: якість бруска; порода деревини; метод пластифікації; розміри заготовки; вид гнуття; швидкість гнуття; вологість деревини.
2. Обґрунтовано, що спосіб гнуття методом пластифікації в парах аміаку є досить перспективним, але маловивченим, оскільки процес пластифікації аміаком має хімічну природу, і це зумовлює дослідження значення параметрів пластифікації для конкретної породи деревини, щоб уникнути зайвих витрат матеріалів (деревини, аміаку) та електроенергії.
3. Розроблено методику дослідження процесів гнуття, що базується на проведенні експериментів для трьох змінних факторів стосовно впливу їх на якість продукції: товщину 6, 13, 20 мм (h), радіус згинання 30, 60, 90 мм (R) та тривалість пластифікації заготовок 12, 36, 60 мм (T).
4. За результатами оброблення даних експерименту отримано рівняння регресії, яке описує залежність кількості якісних гнутих заготовок Y_a від товщини матеріалу $h(x_1)$, радіусу згинання $R(x_2)$ та тривалості пластифікації $T(x_3)$. Отримано адекватну математичну модель, що описує відсоток якісних гнутих заготовок деревини ясеня від трьох досліджуваних факторів.
5. Аналіз засвідчує, що при товщині заготовок 6 мм радіус згинання $R(x_2)$ та тривалість пластифікації заготовок $T(x_3)$ не суттєво впливають на кількість якісних гнутих заготовок, де цей показник наближається до 100 %. Тоді як за товщини заготовок 20 мм при радіусі згинання $R=30$ мм маємо кількість якісних заготовок на рівні 2,32 %, а при радіусі згинання $R=90$ мм маємо кількість якісних заготовок на рівні 45,47 %. Динаміка збільшення кількості якісних заготовок при зростанні часу пластифікації для розглянутих умов становить 9,41 % та 10,39 %.
6. Визначено оптимальні умови ($h = 6$ мм, $R = 30$ мм, $T = 12$ год), при яких спостерігається найбільший відсоток якісних деталей $Y_{\text{яmax}} = 99,441$ %.
7. Підтверджено доцільність використання відповідної концентрації аміаку для пластифікації під час виготовлення гнутих заготовок, але для отримання високої кількості якісних заготовок необхідно дотримуватись запропонованих практичних рекомендацій.
8. Розроблено практичні рекомендації, що базуються на методі отриманні гнутих заготовок шляхом проведення пластифікації в 35% розчині аміаку, що забезпечує максимальний вихід якісних заготовок при товщині 6 мм та радіусу згину 30 мм.

References

1. **Arnold, M.** (2010): Effect of moisture on the bending properties of thermally modified beech and spruce. *J Mater Sci* 45, 669-680. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3984-8>
2. **Bektaş, I., Güler, C., Baştürk, M.A.,** (2002): Principal mechanical properties of eastern beech wood (*Fagus orientalis* Lipsky) naturally grown in Andirin northeastern Mediterranean region of Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 26: 147-154.

3. **Gayda S.V.** (2000): Матеріали для виготовлення виробів з деревини / Materials for the Production of wood Products. Lviv: BMC. – 160 p. (in Ukr.).
4. **Gayda S.V.** (2015). Modeling properties of blockboards made of post-consumer wood on the basis of the finite element method. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 41, 39-49. <https://doi.org/10.36930/42154106>
5. **Gayda S.V.** (2007). Research of concentration of operations is in modern furniture production // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*. – Lviv. – 33:73-79. (in Ukrainian.).
6. **Gayda S.V.** (2012). Production techniques and properties of fuel pellets produced from post-consumer wood // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*. – Lviv: UNFU. – 38: 112-150.
7. **Gayda S.V.** (2013). The technological solutions for recycling of post-consumer wood. Proceedings of I International Interdisciplinary Scientific Conference Formation of stable outlook as the basis of sustainable development (Ukraine, Lviv, 14-16 March 2013) UNFU: Lviv, 5-11.
8. **Gayda S.V.** (2013). Розроблення технології виробництва паливних гранул на основі енергетичного потенціалу вживаної деревини [Development of technology for the production of fuel pellets based on the energy potential of used wood]. *Scientific Bulletin of UNFU* 23.14:83-93. (in Ukrainian).
9. **Gayda, S.V.** (2015). Investigation of physical and mechanical properties of post-consumer wood (PCW). *Actual problems of forest complex* 43:175-179 (in Russian).
10. **Gayda S.V.** (2017). A technology and properties of furniture board (FB) made of post-consumer wood (PCW). *Actual problems of forest complex*, 48, 34-38 (in Russian).
11. **Gayda S.V.** (2017): Комплексні дослідження зміни пружних властивостей вживаної деревини ялиці з віком / *Kompleksni doslidzhennya zminy pruzhnykh vlastyvostey vzhivanoyi derevyny yalytsi z vikom* [The complex studies on the change of elastic properties of post-consumer fir wood with age]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 43:58-72 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42174308>
12. **Gayda S.V.** (2017). Using fuzzy expert systems for decision support in the process of post-consumer wood sorting. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 43, 5-20. <https://doi.org/10.36930/42174301> (in Ukrainian).
13. **Gayda S.V.** (2018). Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW). *Bulletin of KhNTUA* 197:3-9, (in Ukrainian).
14. **Gayda S.V.** (2018). Технологія МДФ-фасадів / *Tekhnolohiyi MDF-Fasadiv* [MDF Facade Technologies]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 44:70-83 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42184410>
15. **Gayda S.V.** (2019). Scientific and technical basis of the use of used wood in woodworking: thesis of the Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.23. – Lviv: UNFU. – 465 (in Ukrainian).
16. **Gayda S.V.** (2020). Analysis of structures and technologies of manufacture of modern furniture facades. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 46, 54-64. <https://doi.org/10.36930/42204606> (in Ukrainian).
17. **Gayda S.V.** (2023). Determination of the circularity indicator in the forest sector according to the principles of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 99-114. <https://doi.org/10.36930/42234908> (in Ukrainian).
18. **Gayda S.V.** (2023). State and analysis of the dynamics indicators of the production volume of the wood-working and furniture industry. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 49: 4-19 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234901>
19. **Gayda S.V.** (2018). A investigation and analysis of characteristics of solid furniture boards made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 44:15-25 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42184402> .
20. **Gayda S.V.** (2024). Analysis of the trend of the main indicators of the wood processing industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 50: 4-15 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42245001>
21. **Gayda S.V.** (2013). Resource-saving technologies of recycling of post-consumer wood]. *Scientific Bulletin of NULES of Ukraine: Technology and Energy of agroindustrial complex* 185(2):271-280, (in Ukrainian).
22. **Gayda S.V., Ilkiv M.M.** (2021) : Дослідження технологічних процесів виготовлення меблевих фасадів з масивної деревини // *Doslidzhennya tekhnolohichnykh protsesiv vyhotovlennya meblevykh fasadiv z masyvnoyi derevyny*. [Research of technological processes of manufacture of meble facades from solid wood]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 47:22-33, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42214703>
23. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2013). Технология очистки вторично используемой древесины иглофрезерными станками [The technology of cleaning recycled wood with needle milling machines] // *Actual problems and prospects of the development of LPK: materials II NTK.*, Sept. 9-11, 2013 – Kostroma. – P. 36-39.

24. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2018). Shape stability as a quality criterion for PCW-made blockboards. Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, 17, 185-192. <https://doi.org/10.15421/411834> (in Ukrainian)
25. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2020). Determining the regime parameters for the surface cleaning of post-consumer wood by a needle milling tool. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (1(107)), 89-97. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212484>.
26. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2020). The investigation of properties of blockboards made of post-consumer wood. Poznan : Drewno, 63(206), 77-102. <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.352.10>.
27. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2021). Властивості вживаної деревини як визначальний чинник якості меблевих виробів / *Vlastyvosti vzhuvanoyi derevyyny yak vyznachal'nyy chynnyk yakosti meblevykh vyrobiv* [Properties of used wood as a determining factor in the quality of furniture products]. Scientific Works of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine 23:152-162, (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15421/412135>
28. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2023). Study of Physical and Mechanical Properties of Post-Consumer Wood of Different Age. Drewno. Prace naukowe. Doniesienia. Komunikaty, 66(212), 00010. <https://doi.org/10.53502/wood-177453>.
29. **Gayda S.V., Kiyko O.A., Guz, M.M.** (2022). Research of the structure of stump and rootwood for effective use in the production of wood products. Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry, 2022, Vol. 64 (3), 131–142, doi: <https://doi.org/10.2478/ffp-2022-0011>
30. **Gayda S.V.** (2016): A investigation of form of stability of variously designed blockboards made of post-consumer wood. *ProLigno* 12(1):22-31.
31. **Gayda S.V., Lesiv L.E.** (2023). Mathematical model of forecasting volumes of post-consumer wood production. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 49, 33-47. <https://doi.org/10.36930/42234903> (in Ukrainian).
32. **Гайда С.В., Максимів В.М., Кійко О.А., Ференц О.Б.** Залишки деревини та деревина після споживання. Класифікація. Терміни та визначення / Договір № 08.24-11-1 : проект міжнародного стандарту ISO. – Львів: НЛТУ України. – 2013. – 53 с.
33. **Gayda S.V., Bilyy Ya.M.** (2016). The investigation of the shape stability of glued panels made of post-consumer wood. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 42, 69-79. <https://doi.org/10.36930/42164211> (in Ukrainian).
34. **Gayda S.V., Petryshak I.V.** (2020). Study of the influence of breed and grinding modes on the specific productivity of grinding skin. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 46, 5-15. <https://doi.org/10.36930/42204601> (in Ukrainian).
35. **Gayda S.V., Salapak L.V., Lesiv L.E.** (2021). Determination of an efficient technological process of manufacturing various support elements for functional surfaces. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 47: 58-72, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42214708>
36. **Gayda S.V., Voronovich V.V.** (2011). Investigation of the features of bending of post-consumer wood // Proceedings of the Conference, Mari State University. – 190-192 (in Russian).
37. **Gayda S.V., Voytovych I.G., Orikhovskyy R.Ya.** (2020). Дослідження технологічних процесів виготовлення ніжок столів обідніх різних конструкцій / *Doslidzhennya tekhnolohichnykh protsesiv vyhotovlennya nizhok stoliv obidnikh riznykh konstruktсий* [Research of technological processes of production of legs of tables of various designs]. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 46:36-49, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42204604>
38. **Grytsak S.A., Gayda S.V.** (2020). Comparative analysis of physical and mechanical characteristics of bent elements from different tree species. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 46:16-27 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42204602>
39. **Grytsak S.A., Gayda S.V., Kushpit A.S., Salapak L.V.** (2023). Analysis of the efficiency of structural and technological solutions in the production of component units of lattice furniture products. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 49: 61-72, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234905>
40. **Grytsak S.A., Grytsak S.S.** (2023). Determination of the influence of pressing parameters on the bending process of beech furniture blankets. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 49:48-60, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234904>
41. **Lesiv, L.E.** (2020). Study of the characteristics of combined of blockboards made of post-consumer wood. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 48, 69-86. <https://doi.org/10.36930/42224806> (in Ukrainian).
42. **Lesiv, L.E., Gayda, S.V., Salapak, L.V.** (2024). Development of a mathematical model of the strength of joined preparations from post-consumer fir wood, [Лесів, Л.Е., Гайда, С.В., Салапак, Л.В. Розроблення математичної моделі міцності зрощених заготовок із вживаної деревини ялиці]. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 50: 16-28 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42245002>

43. **Medvid, L.V.** (2018). Systematization of wood waste – the basis of their effective use. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 91-104. <https://doi.org/10.36930/42184412> (in Ukrainian).
44. **Medvid, L.V.** (2021). Post-consumer wood – an additional reserve of raw materials for construction materials. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 47, 34-46. <https://doi.org/10.36930/42214706> (in Ukrainian).
45. **Orikhovskyy R.Ya., Gayda S.V.** (2020). The influence of different parameters of stability of production sites on the efficiency of functioning of woodworking production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 46:49-53 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42204605>
46. **Orikhovskyy R.Ya., Gayda S.V.** (2024). Determination of running time losses in automated processing systems of woodworking, [Оріховський Р.Я., Гайда С.В. Оцінювання ефективності використання робочого часу в автоматизованих виробничих системах деревообробного виробництва]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 50: 41-51 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42245004>
47. **Podibka, T.I., Kiyko O.A.** (2019). A study of the influence of the transverse dimensions of beech of strips on the form of stability of furniture board. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 45, 155-171. <https://doi.org/10.36930/42194521> (in Ukrainian).
48. **Project «CircHive.** (2022). Developing piloting biodiversity footprinting natural capital accounting via a 'beehive' of sectoral hubs, for sustainable transition to a circular EU bioeconomy». Project Schedule: Start Date 01.12.2022 End Date 30.11.2027.
49. **Vintoniv I.S., Sopushynskyy I.M., Teishinger A.** (2007). *Derevynoznavstvo* [Wood-science]. – Lviv: Apriori. – 312 p., (in Ukrainian).
50. **Voytovych I.G.** (2010). *Osnovi tekhnologii virobiv z derevini* [The basic technology of wood]. – Text-book. –Lviv: Kraine andeljat. – 304 p. (in Ukrainian).

UDC 684.4.053

Postgraduate student S.S. Grytsak – UNFU

Study of the technological process of bending ash wood

Factors affecting the bending process were analyzed: bar quality; type of wood; plasticization method; dimensions of the workpiece; type of bending; bending speed; wood temperature; wood moisture. It is substantiated that the method of bending by the method of plastification in ammonia vapors is quite promising, but poorly studied, because the process of plastification with ammonia has a chemical nature, and this requires the study of the value of the parameters of plastification for a specific type of wood in order to avoid unnecessary consumption of materials (wood, ammonia) and electricity. A methodology for the study of bending processes has been developed, based on conducting experiments for three variable factors in relation to their influence on product quality: material thickness 6, 13, 20 mm (h), bending radius 30, 60, 90 mm (R) and duration of plasticization of blanks 12, 36, 60 mm (T). Based on the results of the experimental data processing, a regression equation was obtained that describes the dependence of the number of quality blanks Y on the material thickness $h(x_1)$, the bending radius $R(x_2)$ and the duration of plasticization $T(x_3)$. An adequate mathematical model describing the percentage of high-quality ash wood blanks from the three studied factors was obtained. The analysis shows that when the thickness of the blanks is 6 mm, the bending radius $R(x_2)$ and the duration of plasticization of the blanks $T(x_3)$ do not significantly affect the number of high-quality blanks, and this indicator approaches 100%. Whereas for the thickness of the blanks of 20 mm, with a bending radius of $R=30$ mm, we have the number of quality blanks at the level of 2.32%, and with the bending radius of $R=90$ mm, we have the number of quality blanks at the level of 45.47%. The dynamics of the increase in the number of high-quality blanks with an increase in the duration of plasticization for the considered conditions is 9.41% and 10.39%, respectively. The optimal conditions ($h = 6$ mm, $R = 30$ mm, $T = 12$ h) were determined, under which the highest percentage of quality parts $Y_{\max} = 99.441\%$ is observed. The feasibility of using the appropriate concentration of ammonia for plasticization during the production of bent blanks has been confirmed, but to obtain a high number of high-quality blanks, it is necessary to follow the proposed practical recommendations. Practical recommendations have been developed, based on the method of obtaining bent blanks by plasticizing in a 35% ammonia solution, which ensures the maximum yield of high-quality blanks with a thickness of 6 mm and a bending radius of 30 mm.

Keywords: wood, post-consumer wood, furniture blanks, bending, plasticization, pressing, ash wood, regression equation, model, deformability, technology.