

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГНУТИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ РІЗНИХ ПОРІД ДЕРЕВ

Розроблено технологію гнуття масивної деревини з попереднім гідротермічним обробленням та з використанням в якості сировини залишків виробництва, а також спожитої деревини. Проведено аналіз обладнання для виконання технологічних операцій досліджуваного процесу отримання криволінійних заготовок. Розроблено методику та проведено дослідження довжини бездефектної дуги гнутих елементів із деревини різних порід та віку з використанням лабораторних установок для гідротермічного оброблення та гнуття зразків. Отримано рівняння регресії для деревини порід ясен, сосна та дуб, які описують процес гнуття деревини та встановлюють залежність від них якості гнуття деревини одиночно та комплексно. Побудовано дев'ять груп графічних залежностей, які чітко описують досліджуваний процес. Доведено, що вживана деревина найбільшого віку краще піддається гнуттю, ніж свіжозрубана та висушена деревина та є придатною для даного технологічного процесу. Розрахунками встановлено, що в наших дослідженнях максимальна довжина бездефектної дуги для деревини ясен становить 40,95 мм., для сосни – 37,45 мм., а для дуба – 35,25 мм. Встановлено, що найкраще піддаються згину зразки деревини зі збільшенням тривалості гідротермічної обробки та вологості досліджуваних зразків і зменшенням їх розмірів. Визначено, що оптимальною вологістю зразків для процесу гнуття є вологість 25-30 %, оскільки більше значення даного фактору призводить до тиску вільної води на стінки клітин деревини і руйнування гнутих зразків. Розроблено практичні рекомендації щодо впровадження технології гнуття масивної деревини з попереднім гідротермічним обробленням, яка є економною щодо деревної сировини та дозволяє отримувати заготовки різної складності форми.

Ключові слова: спожита деревина, вживана деревина, гнуття, довжина дуги, гідротермічна обробка, ясен, сосна, дуб, рівняння регресії.

Аналіз літературних джерел. Залишки виробництва, а також спожита деревина – це додатковий ресурс та резерв сировини, що ще в Україні не знайшов належного застосування [16-43]. При комплексному застосуванні деревинних ресурсів з усіх можливих резервів, залишки виробництва, а також спожита деревина посідає за обсягами утворення почесне третє місце, бо на першому лісосічній відходи, а на другому виробничі операційні залишки та інші відходи деревообробки. щорічні потенційні об'єми вживаної або спожитої деревини в Україні складають близько 2 млн. т. [18, 19, 31, 33]. Тому дослідження цього потенційного ресурсу направлені на створення науково-технічної бази є актуальним завданням у теперішній час. Характерною особливістю цього маловологісного деревинного матеріалу, є те, що у свій час, як заготовка, підлягав обробленню з вирізанням дефектних місць [20, 36, 38, 49], а також те, що в брусах стабілізувались всі внутрішні напруження [1, 2, 6, 8, 21, 29, 30, 42] що важливо для перероблення при виготовленні столярних плит, а також щита в асортименті [23-27, 31-33, 39].

Не зацікавленість виробників щодо використання цього резерву зумовлені кількома причинами та проблемами: відсутність державної програми та науково-технічної

¹ Грицак Степан Андрійович, канд. техн. наук, доцент кафедри технології меблів і виробів з деревини. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-238-45-04, +38-097-904-20-70. Email: stepan.hrytsak@nltu.edu.ua

² Гайда Сергій Володимирович – член-кореспондент Лісівничої академії наук України, доктор технічних наук, професор кафедри технологій меблів та виробів з деревини. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-238-45-04, +38-067-791-25-22. E-mail: serhiy.hayda@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7468-5661> ResearcherID: ABB-1636-2021 Scopus/authorID=57221587964

бази [4, 5, 10-15]; технологічних рішень та прогресивних шляхів використання і відповідно щодо залучення у виробництво цього деревинного матеріалу [43], який у свій час, як заготовка, підлягав машинному обробленню та, в якого в брусках стабілізувались всі внутрішні напруження, що важливо для перероблення на даному етапі.

Знаючи властивості розмірно-придатних заготовок із спожитої деревини можливо сміло використовувати ці переваги при створенні криволінійних деталей із них методом гнуття. Переваги спожитої деревини – дешевий ресурс та достойні фізико механічні параметри цього ресурсу сировини [16-20, 44]. Основоположником технології гнуття масивної деревини вважається Міхаель Тонет, який вклав у меблеву справу епохальний за своїм значенням внесок: він винайшов гнуті меблі, розробив технологію їх створення і першим заснував масове виробництво недорогих виробів [45-47, 52]. Дуже часто у виробництві меблів використовуються криволінійні деталі. Процес їх виготовлення щоразу вдосконалюється, з'являється нове обладнання для отримання криволінійних деталей. Згідно літературних джерел існує кілька способів одержання криволінійних деталей: випилювання з дошки та інших деревинних матеріалів криволінійних заготовок із їх подальшим механічним обробленням; гнуття масивної деревини за заданим контуром з попереднім гідротермічним обробленням і наступним механічним обробленням; гнуття масивної деревини з попереднім пропилюванням; гнуття з одночасним склеюванням заготовок з масивної деревини; гнуття деревини в пресах без будь-якої попередньої обробки; склеювання з одночасним гнуттям шпону за потрібним радіусом [3, 7, 9, 51].

Ще одним напрямком економії деревини є заміна процесу випилювання криволінійних заготовок на гнуття масивної деревини з попереднім гідротермічним обробленням. У залежності від форми криволінійних заготовок можна в різній мірі збільшувати корисний вихід сировини та, відповідно, зменшувати кількість відходів. До того ж міцність гнутих заготовок є в декілька разів більшою від випиляних тому, що при гнутті деревини напрямки волокон в зразках співпадають з напрямком осі самого зразка. Ця особливість дозволяє використовувати гнуту деревину в ґратчастих меблевих виробах, які в процесі експлуатації піддаються різним навантаженням. Спираючись на цю особливість можна розробити конструкції виробів, в яких додаткові елементи з деревини для збільшення міцності виробу не потрібні. І це знову ж економить деревинну сировину. Одержана гнута деталь є міцнішою від випиляної, а питома витрата деревини значно зменшується [3, 7, 9, 14, 34, 35, 42, 45-47]. Альтернативною технологією виготовлення гнутих деталей із масивної деревини є використання пресів, обладнаних СВЧ-генераторами. При гнутті масивної деревини лісоматеріали розкроюють на прямолінійні заготовки за відповідною схемою. Водночас до заготовок для гнуття ставляться підвищені вимоги щодо якості деревини. В заготовках не допускаються сучки, відхилення напрямку волокон від осі бруска не повинно перевищувати 10°. Процес гнуття проходить з деяким упресуванням деревини. У зв'язку з цим у заготовках повинні бути передбачені припуски на механічне оброблення і можливе упресування (до 15...40 %). В ряді випадків гнуттю піддають не тільки чорнові заготовки, а й чистові, тобто оброблені за товщиною до чистових розмірів, наприклад, круглі деталі стільців та інших виробів. У цьому випадку після розкроювання лісоматеріалів заготовки піддаються механічному обробленню до чистових розмірів. В спожитій деревині сучків практично вже не має. Наукова робота присвячена вирішенню **актуального питання** – пошук якісної деревної сировини із залишків виробництва, а також із спожитої деревини для виробництва ґратчастих меблевих виробів і розроблення технології виготовлення криволінійних елементів.

Наукова новизна. На даний час в Україні гнуття масивної деревини з попереднім гідротермічним обробленням не поширеною технологією. Одиниці виробників займаються гнуттям деревини в пресах у полі струмів високої частоти. В роботі запропоновано гнути деревину з використанням в якості сировини вживаної деревини та доведено,

що саме дані деревні відходи являють собою потенційний сировинний запас. Для деревообробної промисловості нашої країни дана технологія є новинкою, оскільки цим ніколи не займалися. В даній роботі науково-дослідним шляхом отримано рівняння регресії, які точно описують досліджуваний процес та за допомогою яких можна прогнозувати результати процесу гнуття брусків із залишків виробництва, а також із спожитої деревини. Тому **мета досліджень** – розроблення технології отримання криволінійних деталей для ґратчастих меблевих виробів з використанням залишків виробництва, а також із спожитої деревини. **Об’єкт** – отримання криволінійних заготовок із залишків виробництва, а також із спожитої деревини. **Предмет** – виготовлення гнутих деталей методом гнуття, отриманих із залишків меблевого виробництва, а також із спожитої деревини з попереднім гідротермічним обробленням.

Для детального аналізу фізико-механічних властивостей гнутих елементів із масивної деревини різного віку необхідно вирішити такі завдання:

1. Детально вивчити закономірності процесу гнуття масивної деревини та гідротермічного оброблення. Розробити технологічний процес гнуття деревини та обґрунтувати послідовність технологічних операцій даного процесу. Зробити аналіз обладнання для гнуття деревини та проведення гідротермічного оброблення.

2. Розробити методику та провести експериментальні дослідження для аналізу фізико-механічних властивостей гнутої деревини різних порід та вікових категорій. Провести планування та експеримент повний факторний план для кожної з порід деревини.

3. Визначити комплексний вплив змінних параметрів процесу гнуття деревини на якість заготовок (максимальну дугу зігнутої деревини) через рівняння регресії.

4. Визначити оптимальні параметри процесу гнуття масивної деревини з попереднім гідротермічним обробленням для кожної з порід та вікових категорій.

5. Проаналізувати економічну ефективність гнуття масивної деревини з використанням залишків виробництва та спожитої деревини в якості сировини.

6. Розробити практичні рекомендації для гнуття елементів із залишків виробництва та спожитої деревини з попереднім гідротермічним обробленням.

Матеріали та методи дослідження: планування експерименту, проведення експериментальних досліджень з вимірюванням досліджуваної величини бездефектної довжини дуги при гнутті деревини, проведення експерименту повнофакторний план. Було відібрано зразки спожитої деревини різних порід і віку та проведено порівняння результатів досліджень фізико-механічних властивостей спожитої деревини та деревини, яка ніколи не була частиною виробів. Вживана деревина при відборі експериментальних зразків була вручну очищена від забруднень та оброблена на круглопилковому верстаті для доведення до потрібних розмірів. Перед проведенням експериментів усі зразки були попередньо висушені до вологості $8 \pm 2\%$.

Технологія гнуття масивної деревини дозволяє в значній мірі економити деревну сировину при виготовленні криволінійних деталей. Якщо в якості сировини використовувати вживану деревину для даного технологічного процесу, то ми зможемо ще більше економити сировини або взагалі замінити її на спожиту деревину. Дана технологія вимагає використання спеціального обладнання та відповідних операцій у технологічному маршруті для гнуття масивної деревини з використанням деревних відходів.

Першою операцією є вхідний контроль. При цьому проходить оцінювання якості зразків спожитої деревини та відсортовування за категоріями якості. Придатними для гнуття є перша і друга категорії, яким потрібно надати заданої вологості методом сушіння. Найкращим для даної технології є метод атмосферного сушіння або в приміщеннях з обігрівом. Після цього дві перші категорії ідуть на очищення від зовнішніх забруднень, а дві інші – на спалювання. Очищення проводиться щітковими верстатами та ручним електричним інструментом з дротяними насадками. Очищені зразки від забруд-

нень проходять первинне механічне оброблення для вирівнювання пластей та утворення базової поверхні на фугувальних верстатах. Потім зразки спожитої деревини проходять операцію розкрою на заготовки з припусками для подальшого механічного оброблення на круглопилкових або стрічкових верстатах. Після розкрою проводиться гідротермічне оброблення для надання зразкам пластичності. Пропарювання можна виконувати у автоклавах або парильних шафах. Після гідротермічного оброблення проводиться гнуття зразків деревини. Обладнання, яке потрібне для даної операції охарактеризоване у попередніх підрозділах. Після гнуття деревини потрібно, щоб гнуті елементи пройшли технологічну витримку для фіксації отриманої криволінійної форми. Після витримки зразки потрібно висушити в сушильних камерах до заданої вологості. Даній операції слідусь контроль якості гнутих елементів для виявлення дефектів гнуття деревини та передачі криволінійних елементів на подальше механічне оброблення.

Область експерименту – це всі вхідні фактори і області їх значень. Область значень фактора – це сукупність усіх значень фактора в ході експерименту.

Перейдемо до факторів, що характеризують технологічні параметри. Це, насамперед, тривалість гідротермічного оброблення. Саме від цього параметру залежить не менш важливий фактор – температура досліджуваних зразків деревини. Чим більша дана температура, тим кращим буде результат гнуття деревини. Для детального дослідження процесу гнуття масивної деревини та вивчення впливу параметрів на даний процес нами було проведено планування та проведення експерименту повнофакторний план. Спираючись на принципи системного підходу, на основі попереднього аналізу літератури приймаємо змінні фактори та діапазони їх варіювання:

- поперечний переріз експериментальних зразків;
- тривалість гідротермічного оброблення брусків;
- вік зразків – даний фактор поділяє досліджувані зразки масивної деревини на недавно зрубану та вживану деревину (остання в свою чергу поділяється на 2 категорії: віком до 20 та до 35 років).

Для проведення експерименту повнофакторний план було вирішено провести дві серії дослідів, в кожній з яких ми проводили гнуття масивної деревини трьох порід: ясеня, сосни та дуба. Таким чином отримали три експеримент, тобто для кожної породи. Вихідний параметр – результат дослідження, тобто на довжина бездефектної дуги. Розглянемо вплив на довжину бездефектної дуги змінних факторів:

- поперечний переріз експериментальних зразків – зі збільшенням даної величини процес гнуття деревини потребує більших зусиль, тобто бруски гірше піддаються згину;
- тривалість гідротермічного оброблення брусків – збільшення цієї величини веде до збільшення температури та вологості деревини, що покращує гнуття (важливим є надання вологості не більше 30%, оскільки надлишок вологи при гнутті тисне на стінки клітин і може призвести до небажаних руйнувань);
- вік зразків – вплив даного фактора на процес гнуття дослідимо в ході статистичної обробки даних.

Отже, для проведення експерименту повнофакторний план було складено методичну сітку досліджень для кожної породи, які зображено в табл. 1.

Таблиця 1 Методична сітка досліджень для порід ясен, сосна та дуб

Назва фактору	Натур.	Код.	Натуральні значення			Кодовані значення			□
			нижнє	осн.	верхнє	нижнє	осн.	верхнє	
Тривалість ГТОД, хв	t	x ₁	15	30	45	-1	0	1	15
Розмір зразка, мм	a	x ₂	10	15	20	-1	0	1	5
Вік зразка, років	n	x ₃	5	20	35	-1	0	1	15

Метою гідротермічного оброблення масивної деревини перед процесом її гнуття є надання заготовкам пластичності для досягнення безруйнівної зміни форми заготовок під час гнуття. Гнуття дослідних зразків проводилось на лабораторному гнута́рному пристрої на замкнутий контур з ручним приводом. Даний гнута́рний пристрій зображено на рис. 1.



Рис. 1. Лабораторний гнута́рний пристрій:

Для досягнення вищезгаданої мети було використану лабораторну пропарювальну установку з температурою пропарювання 90...95°C. Тривалість пропарювання залежить від поперечного перерізу заготовок і породи деревини. При пропарюванні експериментальних зразків деревини вологість складала 25...30 %.

Бруски під дією навантаження гнулись навколо металевого диска з гладкою площиною контакту радіусом 90 мм. Згин починався від торця заготовки. Лінійка призначена для вимірювання відстані від торця заготовки до першого її руйнування, тобто, як прийнято називати, довжину бездефектної дуги. Початок відліку на лінійці знаходиться у торцевому упорі. Саме ця лінійка виконує функцію шини, яка під час гнуття зміщує нейтральну лінію ближче до зони розтягу та зменшує розтягуючі напруження [6]. Експериментальні бруски з масивної деревини одразу після гідротермічного оброблення встановлюються в гнута́рний пристрій у торцевому упорі та рухом важіля за годинниковою стрілкою виконується гнуття. Заготовка поступово огинається навколо металевого диска. У разі виникнення в зразку тріщини процес гнуття зупиняється та за допомогою лінійки на установці фіксується довжина бездефектної дуги, яка фіксується в журналі досліджень і потрібна для подальших розрахунків. Дана процедура повторюється з кожним наступним бруском. В ході експериментальних досліджень всього було зігнуто 240 зразків. Вигляд заготовок після гнуття зображено на рис. 2.

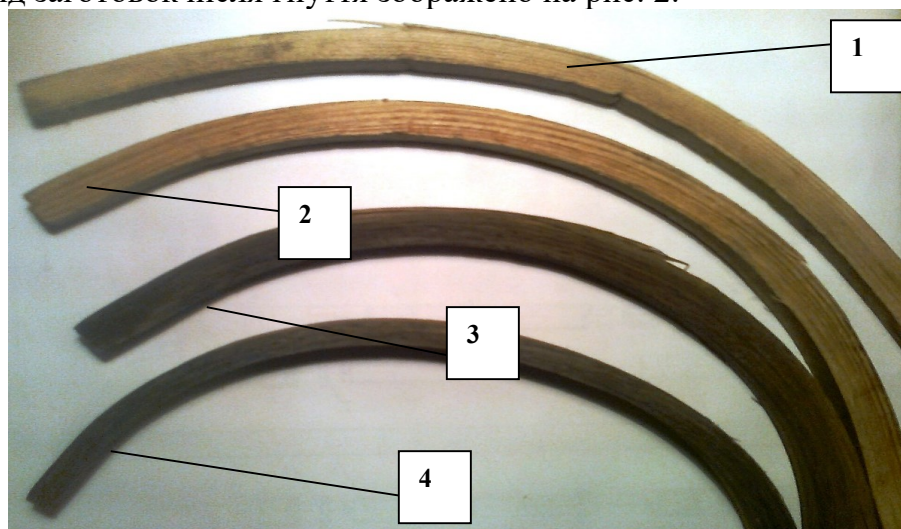


Рис. 2. Зразки після гнуття породи: 1 – сосна; 2 – ясен; 3, 4 – дуб

Результати та обговорення. Дані отримані в ході проведення експериментальних дослідів гнуття масивної деревини з попереднім гідротермічним обробленням для трьох порід при змінних факторах: тривалість гідротермічного оброблення, розмір поперечного перерізу та вік зразка наведені в табл. 2-4.

Таблиця 2. Результати досліджень при гнутті деревини породи ясен

№ дос- ліду	Значення фактора у досліді у вигляді						Довжина бездефектної дуги, см				
	у кодованому			у кодованому							
	t	a	n	x ₁	x ₂	x ₃	1	2	3	4	5
1	15	10	5	-1	-1	-1	12	15	9	17	10
2	45	10	5	1	-1	-1	12	18	20	7	15
3	15	20	5	-1	1	-1	20	22	13	18	21
4	45	20	5	1	1	-1	7	5	12	10	11
5	15	10	35	-1	-1	1	5	7	10	6	12
6	45	10	35	1	-1	1	50	47	35	42	48
7	15	20	35	-1	1	1	10	9	12	15	7
8	45	20	35	1	1	1	5	9	6	11	8

Таблиця 3. Результати досліджень при гнутті деревини породи сосна

№ дос- ліду	Значення фактора у досліді у вигляді						Довжина бездефектної дуги, см				
	у натуральному			у кодованому							
	t	a	n	x ₁	x ₂	x ₃	1	2	3	4	5
1	15	10	5	-1	-1	-1	10	17	10	15	9
2	45	10	5	1	-1	-1	9	17	11	10	16
3	15	20	5	-1	1	-1	13	19	14	21	22
4	45	20	5	1	1	-1	14	6	11	9	8
5	15	10	35	-1	-1	1	7	5	9	8	15
6	45	10	35	1	-1	1	47	39	35	39	45
7	15	20	35	-1	1	1	7	12	17	14	15
8	45	20	35	1	1	1	5	10	7	15	4

Таблиця 4. Результати досліджень при гнутті деревини породи дуб

№ дос- ліду	Значення фактора у досліді у вигляді						Довжина бездефектної дуги, см				
	у кодованому			у кодованому							
	t	a	n	x ₁	x ₂	x ₃	1	2	3	4	5
1	15	10	5	-1	-1	-1	11	14	7	13	20
2	45	10	5	1	-1	-1	10	16	16	10	14
3	15	20	5	-1	1	-1	23	25	10	15	18
4	45	20	5	1	1	-1	5	3	17	11	11
5	15	10	35	-1	-1	1	6	5	9	5	10
6	45	10	35	1	-1	1	30	40	33	40	45
7	15	20	35	-1	1	1	8	7	11	14	8
8	45	20	35	1	1	1	10	8	25	13	6

Для оцінки здатності отриманих моделей описувати значення вихідної величини з такою ж точністю, як і результати експерименту ми провели перевірку адекватності математичних моделей. Дана перевірка проводиться за F-критерієм Фішера для порівняння дисперсії адекватності S_y^2 та відтворюваності S_{ad}^2 .

За даними були розраховані дисперсії адекватності для трьох порід деревини: ясен: $S_{aa}^2 = 476,1$; сосна: $S_{aa}^2 = 504,1$; дуб: $S_{aa}^2 = 220,9$.

Розрахункові значення критеріїв Фішера визначені для порід деревини становлять: ясен: $F_{p\dot{\imath}\dot{\varsigma}\dot{\delta}} = 32,1147$; сосна: $F_{p\dot{\imath}\dot{\varsigma}\dot{\delta}} = 32,418$; дуб: $F_{p\dot{\imath}\dot{\varsigma}\dot{\delta}} = 8,595$.

Табличне значення критерію Фішера становить 250. Порівнявши розрахункові значення критеріїв Фішера з табличними бачимо, що виконується нерівність $F_{\text{розрах}} < F_{\text{табл}}$ для всіх трьох порід деревини. Тобто отримані математичні моделі вважаються адекватними і можуть бути використаними для опису об'єктів. Отже, проведені розрахунки нам дозволили отримати наступні рівняння регресій повних факторних планів в натуральних значеннях факторів відповідно для трьох порід деревини:

$$1) y_{\text{ясен}} = -22.55 + 1.021 \cdot t + 2.9 \cdot a + 0.31 \cdot n - 0.085 \cdot t \cdot a + 0.023 \cdot t \cdot n - 0.06 \cdot a \cdot n;$$

$$2) y_{\text{сосна}} = -20.95 + 0.91 \cdot t + 2.7 \cdot a + 0.35 \cdot n - 0.076 \cdot t \cdot a + 0.02 \cdot t \cdot n - 0.05 \cdot a \cdot n;$$

$$3) y_{\text{дуб}} = -10.93 + 0.66 \cdot t + 2.1 \cdot a + 0.0067 \cdot n - 0.061 \cdot t \cdot a + 0.023 \cdot t \cdot n - 0.04 \cdot a \cdot n.$$

Дані рівняння регресії описують процес гнуття масивної деревини з попереднім гідротермічним обробленням та дозволяють обчислити значення вихідної величини для будь-якої точки області експерименту.

Оскільки вплив факторів і взаємодій на функцію відгуку зручно аналізувати на основі графіків (рис. 3-9), побудованих за рівняннями регресії, то ми побудували три групи графіків залежності вихідної величини від певного фактору при різних фіксованих значеннях інших факторів для кожної з трьох порід деревини. Для побудови графіків було розраховано значення вихідної величини за розрахованими рівняннями регресії при різних значеннях вхідних факторів.

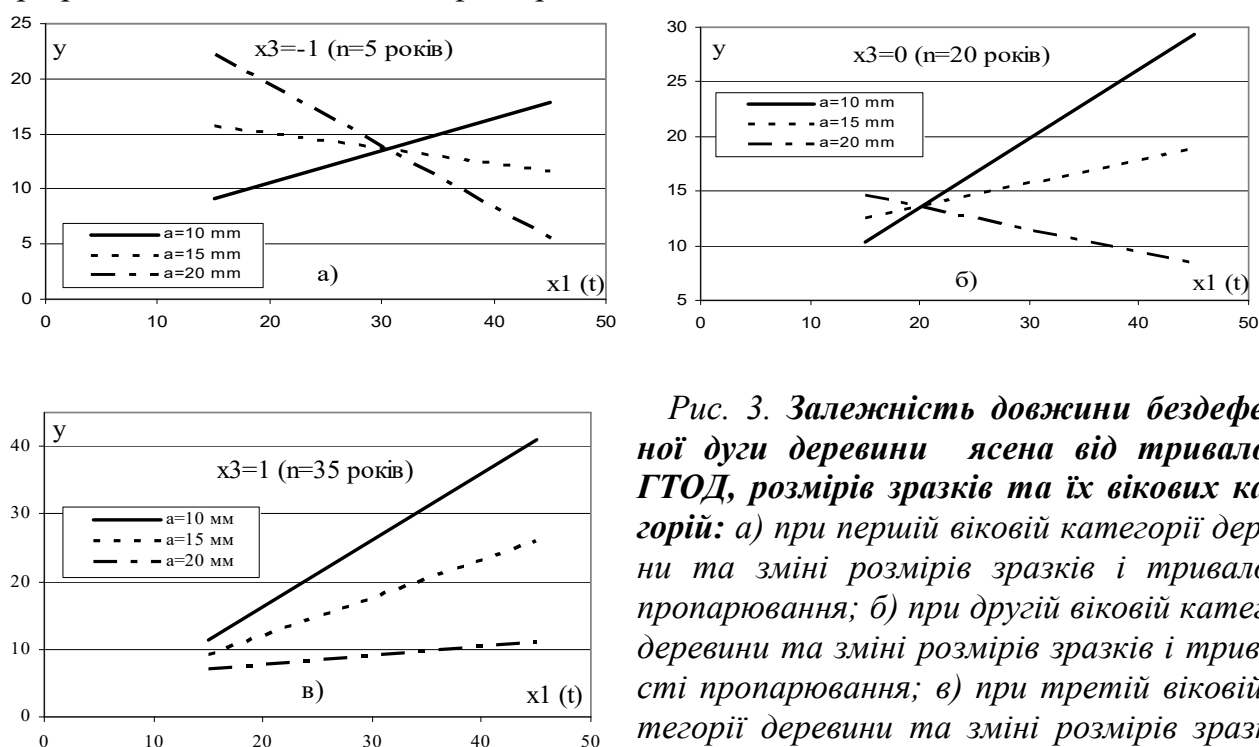


Рис. 3. Залежність довжини бездефектної дуги деревини ясен від тривалості ГТОД, розмірів зразків та їх вікових категорій: а) при першій віковій категорії деревини та зміні розмірів зразків і тривалості пропарювання; б) при другій віковій категорії деревини та зміні розмірів зразків і тривалості пропарювання; в) при третій віковій категорії деревини та зміні розмірів зразків і тривалості пропарювання.

З графіків чітко видно, що кожна з трьох обраних порід деревини при гнутті веде себе однаково, тобто максимальна довжина бездефектної дуги досягається при тих самих значеннях вхідних параметрів. До того ж найкраще піддається згину ясен, а найгірше – дуб. Розрахунками встановлено, що в наших дослідженнях максимальна довжина бездефектної дуги для деревини ясен становить 40,95 мм., для сосни – 37,45 мм., а для дуба – 35,25 мм. До того ж найкраще піддаються згину зразки деревини зі збільшенням тривалості гідротермічної обробки та зменшенням поперечних перерізів досліджуваних зразків.

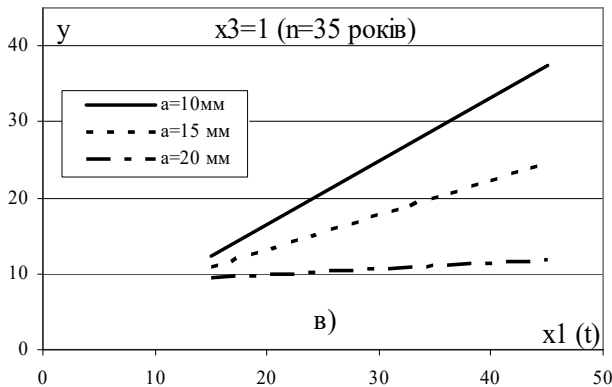
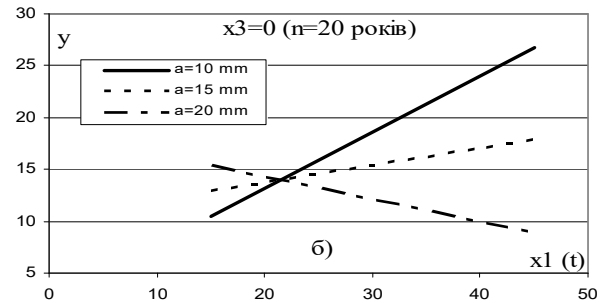
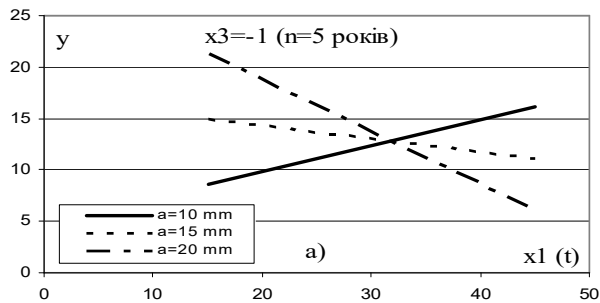


Рис. 4. Залежність довжини бездефектної дуги деревини сосни від тривалості ГТОД, розмірів зразків та їх вікових категорій: а) при першій віковій категорії деревини та зміні розмірів зразків і тривалості пропарювання; б) при другій віковій категорії деревини та зміні розмірів зразків і тривалості пропарювання; в) при третій віковій категорії деревини та зміні розмірів зразків і тривалості пропарювання.

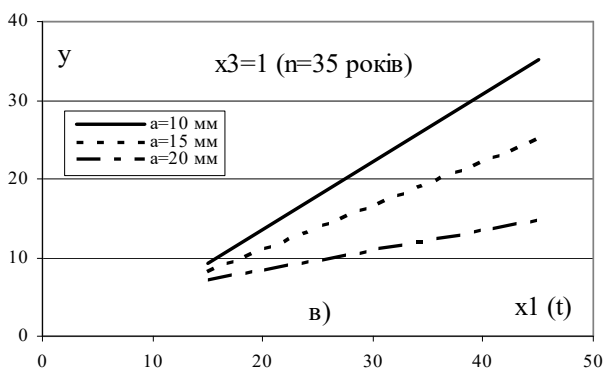
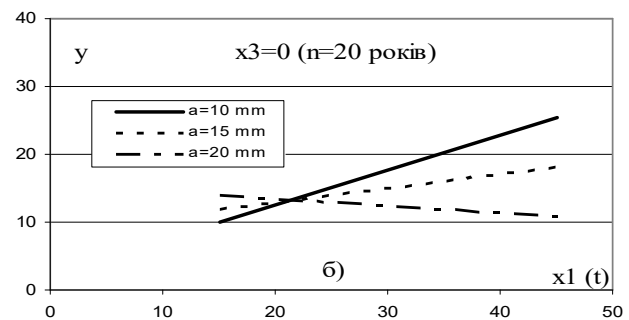
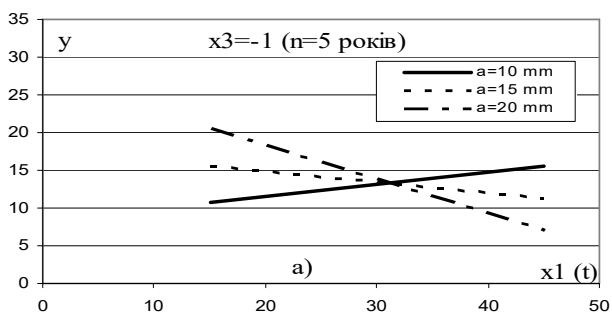


Рис. 5. Залежність довжини бездефектної дуги деревини дуба від тривалості ГТОД, розмірів зразків та їх вікових категорій: а) при першій віковій категорії деревини та зміні розмірів зразків і тривалості пропарювання; б) при другій віковій категорії деревини та зміні розмірів зразків і тривалості пропарювання; в) при третій віковій категорії деревини та зміні розмірів зразків і тривалості пропарювання.

Також доведено, що деревина третьої вікової категорії, тобто деревина із більшим терміном експлуатації, найкраще піддається гнуттю.

Висновки.

1. Вивчено стан питання деревної сировини в Україні та Європі. На основі аналізу літературних джерел вивчено методи отримання криволінійних заготовок у меблевому виробництві, зокрема, метод гнуття масивної деревини.

2. Розроблено технологію гнуття масивної деревини з попереднім гідротермічним обробленням та з використанням в якості сировини залишків виробництва, а також спожитої деревини. Проведено аналіз обладнання для виконання операцій досліджуваного процесу отримання криволінійних заготовок.

3. Розроблено методику та проведено дослідження довжини бездефектної дуги гнутих елементів із деревини різних порід та віку з використанням лабораторних установок кафедри ТМВД НЛТУ України для гідротермічного оброблення та гнуття зразків.

4. Проведено планування та експеримент повнофакторний план для дослідження впливу вхідних факторів на процес гнуття деревини та вихідну величину – довжину бездефектної дуги зразків. Отримано рівняння регресії для деревини порід ясен, сосна та дуб, які описують процес гнуття деревини та встановлюють залежність від них якості гнуття деревини окремо та комплексно.

5. За отриманими рівняннями регресії побудовано дев'ять груп графічних залежностей, які чітко описують досліджуваний процес. Доведено, що вживана деревина найбільшого віку найкраще піддається гнуттю (краще ніж свіжозрубана та висушена деревина, яка не була частиною дерев'яних виробів) та є придатною для даного технологічного процесу.

6. Розрахунками встановлено, що в наших дослідженнях максимальна довжина бездефектної дуги для деревини ясен становить 40,95 мм., для сосни – 37,45 мм., а для дуба – 35,25 мм.

7. Встановлено, що найкраще піддаються згину зразки деревини зі збільшенням тривалості гідротермічної обробки та вологості досліджуваних зразків і зменшенням їх розмірів. Визначено, що оптимальною вологістю зразків для процесу гнуття є вологість 25-30 %, оскільки більше значення даного фактору призводить до тиску вільної води на стінки клітин деревини і руйнування гнутих зразків.

8. Розроблено практичні рекомендації щодо впровадження в Україні технології гнуття масивної деревини з попереднім гідротермічним обробленням, яка є економною щодо деревної сировини та дозволяє отримувати заготовки різної складності форми.

References

1. **Ashkenazi Ye.K.** (1980). *Anizotropyya drevesyny y drevesnykh materialov* [Anisotropy of wood and wood materials]. – Moscow: Lesnaya promyshlennost'. – 224 p., (in Russian).

2. **Borovikov A.M.** (1989). *Spravochnik po drevesyne* [Wood Directory] . – Moscow: Lesnaya promyshlennost'. – 246 p., (in Russian).

3. **Dyachun Z.J.** [2007]. *Konstruyuvannya mebliv: Korpusni vyroby* [Furniture design: Cabinet products]. – Kyiv: Mohyla Academy House, 387 p., (in Ukrainian).

4. **Gayda S.V.** (1998). Основи створення гнучких автоматизованих виробництв [Basics of creating flexible automated production]. – Lviv. – 149 p. (in Ukrainian).

5. **Gayda S.V.** (1999). Проблеми та перспективи роботизації меблевої промисловості [Problems and prospects of robotics in the furniture industry]. Scientific Bulletin of UNFU 9.5:192-195. (in Ukrainian).

6. **Gayda S.V.** (2000). Визначення стійкості та міцності вертикальних стінок корпусних меблевих виробів [Determination of stability and strength of vertical walls of case furniture products]. Scientific Bulletin of UNFU 10.3:127-129. (in Ukrainian).

7. **Gayda S.V.** (2000). Матеріали для виготовлення виробів з деревини / *Materialy dlya vyhotovlennya vyrobiv z derevyiny* / Materials for the Production of wood Products. – Lviv: BMC. – 160 p., (in Ukrainian).

8. **Gayda S.V.** (2000). Особливості розрахунку корпусних виробів на міцність [Peculiarities of strength calculation of hull products]. Scientific Bulletin of UNFU 10.2:150-154. (in Ukrainian).

9. **Gayda S.V.** (2001). Раціональне конструювання виробів з деревини / Rational constructing of wood Products. Lviv: BMC. – 93 p., (in Ukrainian).

10. **Gayda S.V.** (2002). Особливості та перспективи роботизації меблевої промисловості України [Peculiarities and prospects of robotization of the furniture industry of Ukraine]. Scientific Bulletin of UNFU 12.5:38-40. (in Ukrainian).

11. **Gayda S.V.** (2003). Гнучкі виробничі модулі для виготовлення ґратчастих меблевих виробів [Flexible production modules for the production of lattice furniture products]. Scientific Bulletin of UNFU 13.2:120-122. (in Ukrainian).

12. **Gayda S.V.** (2004). Інтегровані технології меблевого виробництва [Integrated technologies of furniture production]. *Scientific Bulletin of UNFU* 14.4:118-121. (in Ukrainian).
13. **Gayda S.V.** (2006). Технология изготовления гнутых деталей из цельной древесины / *Tekhnologiya izgotovleniya gnutykh detaley iz tsel'noy drevesiny* [Manufacturing technology of bent solid wood parts]. *Journal of articles: Equipment and tools.* – Kharkov: Graf-X. Woodworking 1: 70-73 (in Russian).
14. **Gayda S.V.** (2006). Технологія виготовлення гнутих деталей / *Tekhnolohiya vyhotovlennyya hnutykh detaley* [Technology of making bent parts]. *Newspaper of articles: Woodworker.* – Lviv: woodworking 8: 4-5 (in Ukrainian).
15. **Gayda S.V.** (2007). Дослідження концентрації операцій у сучасному меблевому виробництві / *Doslidzhennyya kontsentratsiyi operatsiy u suchasnomu meblevomu vyrobnytstvi* [Research of concentration of operations in modern furniture Production]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 33:73-79 (in Ukrainian).
16. **Gayda S.V.** (2011). Вживана деревина – додатковий ресурс сировини / *Vzhyvana derevyna – dodatkovyy resurs syrovyny* [Recovered wood is additional resource of raw material]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 37(1). 238-244 (in Ukrainian).
17. **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.
18. **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).
19. **Gayda S.V.** (2013). Технології та рекомендації до використання вживаної деревини в деревообробленні / *Resursooshchadni tekhnologii pereroblennyya vzhivanoї derevini* [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).
20. **Gayda S.V.** (2014). *Sposoby podgotovki k pererabotke vtorichno ispol'zuyemoy drevesiny iglofrezernymi i shchotochnymi stankami* [Preparation methods for processing of post-consumer wood (PCW) needle-milling and brushing machines]. *Actual problems of forest complex* 40:65-69 (in Russian).
21. **Gayda S.V.** (2015). *Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv vtorichno ispol'zuyemoy drevesiny* [Investigation of physical and mechanical properties of post-consumer wood]. *Actual problems of forest complex* 43:175-179, (in Russian).
22. **Gayda S.V.** (2015). *Tekhnologicheskie osnovy pererabotki vtorichno ispol'zuyemoy drevesiny* [Technological of processing basics of post-consumer wood]. *Actual directions of Scientific Research XXI century: Theory and Practice, Voronezh State Forestry Engineering University Named after G.F. Morozov* 3(8-2 (19-2)). 82-86, (in Russian).
23. **Gayda S.V.** (2015). *Tekhnologii i fiziko-mekhanichni vlastivosti stolyarnykh plit iz vzhivanoї derevini* [Technology and physical and mechanical properties blockboard made of post-consumer wood]. *Technical service of agriculture, forestry and transport systems* 3(1).145-152 (in Ukrainian).
24. **Gayda S.V.** (2016). A investigation of form of stability of variously designed blockboards made of post-consumer wood. *ProLigno* 12(1).22-31.
25. **Gayda S.V.** (2016). *Ekologo-tekhnologicheskiye aspekty pererabotki vtorichno ispol'zuyemoy drevesiny dlya proizvodstva pressovannykh materialov* [Ecological and technological aspects of recycling post-consumer wood for production compacted materials]. *Lesnoy vestnik / Forestry bulletin of MSFU* 20(3).15-22 (in Russian).
26. **Gayda S.V.** (2016). *Formoustoychivost' stolyarnykh plit iz vtorichno ispol'zuyemoy drevesin* [A form of stability of blockboards made of post-consumer wood]. *Actual problems of forest complex* 46:148-153, (in Russian).
27. **Gayda S.V.** (2017). *Tekhnologiya i svoystva mebel'nogo shchita iz vtorichno ispol'zuyemoy drevesiny* [A technology and properties of furniture board made of post-consumer wood]. *Actual problems of forest complex* 48:34-38, (in Russian).
28. **Gayda S.V.** (2017). Використання нечітких експертних систем для підтримки прийняття рішень в процесі сортування вживаної деревини / *Vykorystannya nechitkykh ekspertnykh system dlya pidtrymky pryynyattya rishen' v protsesi sortuvannya vzhivanoyi derevyny* [Using fuzzy expert systems for decision support in the process of post-consumer wood sorting]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 43:5-20 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42174301>

29. **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>
30. **Gayda S.V.** (2018). Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW). Bulletin of KhNTUA 197:3-9, (in Ukrainian).
31. **Gayda S.V.** (2018). Дослідження та аналіз характеристик щитових конструкцій із вживаної деревини / *Doslidzhennya ta analiz kharakterystyk shchytovykh konstruktсий iz vzhivanoyi derevyny* [An investigation and analysis of characteristics of solid furniture boards made of post-consumer wood]. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 44:14-24 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42184402>
32. **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>
33. **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).
34. **Gayda S.V.** (2019). Визначення та порівняння властивостей вживаної деревини основних хвойних порід / *Vyznachennya ta porivnyannya vlastyvostey vzhivanoyi derevyny osnovnykh khvoynykh porid* [A determination and comparison of properties of post-consumer wood of the basic conifers]. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 45:38-49 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42194506>
35. **Gayda S.V., Bilyy Ya.M.** (2019). Дослідження технологічних процесів виготовлення ліжок двоспальних різних конструкцій / *Doslidzhennya tekhnolohichnykh protsesiv vyhotovlennya lizhok dvospal'nykh riznykh konstruktсий* [An investigation of technological processes of making beds of double different designs]. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 45:21-31 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42194504>
36. **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., September 9-11, 2013 – Kostrova. – P. 36-39. (in Russian).
37. **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)
38. **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. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212484>.
39. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2020). The investigation of properties of blockboards made of post-consumer wood. Poznan : Drewno, 63 [206], 77-102. doi: <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.352.10>.
40. **Gayda S.V., Kshyvetsky B.Ya.** (1999). Техніко-економічні характеристики деревообробної фабрики майбутнього [Technical and economic characteristics of the woodworking factory of the future]. Scientific Bulletin of UNFU 9.3:83-85. (in Ukrainian).
41. **Gayda S.V., Kshyvetsky B.Ya., Voytovych I.G., Prokopovych B.V.** (2002). Тлумачний словник з деревооброблення / *Tlumachnyy slovnyk z derevoobroblennya* [Explanatory dictionary from Woodworking]. Lviv: UNFU. – 280 p. (in Ukrainian).
42. **Gayda S.V., Lesiv L.E.** (2019). Визначення та порівняння властивостей вживаної деревини основних хвойних порід / *Vyznachennya ta porivnyannya vlastyvostey vzhivanoyi derevyny osnovnykh khvoynykh porid* [A determination and comparison of properties of post-consumer wood of the basic conifers]. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 45:39-46 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42194506>
43. **Gayda S.V., Nikityuk L.O.** (1998). До питання застосування екстрагованої деревини для плитного виробництва [On the issue of using extracted wood for slab production]. Scientific Bulletin of UNFU 8:75-77. (in Ukrainian).
44. **Gayda S.V., Voronovich V.V.** (2011). *Issledovanie osobennostey gnut'ya vtorichno ispol'zuemoy drevesiny* [Investigation of the features of bending of post-consumer wood]. Scientific progress – creative young: proceedings of the International Scientific Conference, Mari University: 190-192 (in Russian).

45. Gayda S.V., Maksimiv V.M., Kiyko O.A., Ferenc O.B. (2013). Залишки деревини та деревина після споживання. Класифікація. Терміни та визначення [Wood residues and post-consumer wood. Classification. Terms and definitions] / Agreement No. 08.24-11-1: draft international standard ISO. – Lviv: NLTU of Ukraine – 53 p. (in Ukrainian).

46. Gayda S.V., Voronovich V.V. (2011). Порівняльний аналіз гнуття вживаної деревини різних порід та вікових категорій / *Porivnyal'niy analiz gnuttya vzhivanoi derevini riznikh porid ta vikovikh kategoriy* [Comparative analysis of bending particularities for various post-consumer wood species and age categories]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 37(1). 84-88 (in Ukrainian).

47. Gayda S.V., Voytovych I.G. (2017). Дослідження міцності та стійкості елементів ґратчастих меблевих виробів із вживаної деревини / *Doslidzhennya mitsnosti ta stiykosti elementiv gratchastykh meblevykh vyrobiv iz vzhivanoyi derevyny* [Durability and stability of elements for beam furniture products made from post-consumer wood are investigated]. *Bulletin of KhNTUA* 189:62-70 (in Ukrainian).

48. Gayda S.V., Ya.M. Bilyy (2016). *Doslidzhennya formostiystyky kleyenykh shchytiv iz vzhivanoyi derevyny* [The investigation of the shape stability of glued panels made of post-consumer wood]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 42: 69-79 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42164211>

49. Gayda S.V. (2016). Технологічні підходи до поверхневого очищення вживаної деревини голкофрезерним інструментом / *Tekhnolohichni pidkhody do poverkhnevoho ochyshchennya vzhivanoyi derevyny holkofrezernym instrumentom* [Technological approaches to cleaning of surface of post-consumer wood of needle-milling tools]. *Bulletin of KhNTUA* 178:3-11 (in Ukrainian).

50. Vintoniv I.S., Sopushynsky I.M., Teishinger A. (2007) *Derevynoznavstvo* [Wood-science]. – Lviv: Apriori. – 312 p., (in Ukrainian).

51. Volynsky V.N. (2000). *Vzaymosvyaz' y yzmenchyvost' fizyko-mekhanicheskikh svoystv drevesyny* [Interconnection and variability of physical and mechanical properties of wood]. – Arkhangelsk: Publishing house AGTU. – 135 p., (in Russian).

52. Voytovych I.G. (2010). *Osnovi tekhnologii virobiv z derevini* [The basic technology of wood]. – Textbook. –Lviv: Kraine andeljat. – 304 p. (in Ukrainian).

UDC 684.4.053

*Assoc. prof. S.A. Grytsak, PhD; assoc. prof. S.V. Gayda,
Doctor of Sciences – UNFU*

Comparative analysis of physical and mechanical characteristics of bent elements from different tree species

The technology of bending solid wood with preliminary hydrothermal treatment and with the use of production residues as well as consumed wood as raw materials has been developed. The analysis of the equipment for performance of technological operations of research process of reception of curvilinear preparations is carried out. A method was developed and the length of the defect-free arc of bent wood elements of different breeds and ages was investigated using laboratory installations for hydrothermal treatment and bending of samples. The regression equations for wood of ash, pine and oak species are obtained, which describe the process of wood bending and establish the dependence of the quality of wood bending on them individually and comprehensively. Nine groups of graphical dependences are constructed, which clearly describe the researched process. It is proved that the used wood of the oldest age is more susceptible to bending than freshly cut and dried wood and is suitable for this technological process. Calculations have shown that in our studies, the maximum length of a defect-free arc for ash wood is 40.95 mm, for pine – 37.45 mm, and for oak – 35.25 mm. It was found that wood samples are best bent with increasing duration of hydrothermal treatment and humidity of the studied samples and reducing their size. It is determined that the optimum humidity of the samples for the bending process is a humidity of 25-30%, because the greater the value of this factor leads to the pressure of free moisture on the walls of wood cells and the destruction of bent samples. Practical recommendations have been developed for the introduction of solid wood bending technology with prior hydrothermal treatment, which is economical in terms of wood raw materials and allows to obtain blanks of different complexity of shape.

Keywords: consumed wood, used wood, bending, arc length, hydro-heat treatment, ash, pine, oak, regression equation.