

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Дацків Галина Миколаївна

УДК 674.028.9:[674.047:66.046]:674.031.916.165]:678.744.4

## ДИСЕРТАЦІЯ

### ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ КЛЕЙОВИХ З'ЄДНАНЬ ТЕРМІЧНО МОДИФІКОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ ЯСЕНА КЛЕЯМИ НА ОСНОВІ ПВА

Спеціальність 187 – Деревообробні та меблеві технології

Галузь знань 18 – Виробництво та технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Г.М. Дацків

Науковий керівник – Кшивецький Богдан Ярославович, доктор  
технічних наук, професор

Львів –2023

## АНОТАЦІЯ

*Дацків Г.М.* Прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена клеями на основі ПВА. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 187 Деревообробні та меблеві технології (18 – Виробництво та технології). Національний лісотехнічний університет України, Львів, 2023.

У дисертаційній роботі вирішено важливе науково-практичне завдання із прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, склеєної полівінілацетатними клеями із класом довговічності D4, яке має важливе значення для склеювання деревини та прогнозування міцності клейових з'єднань на її основі.

Клейові деревинні конструкції широко використовуються для виготовлення виробів. Особливу увагу сьогодні приділяють клейовим деревинним конструкціям із термічно модифікованої та немодифікованої деревини, які збільшують термін експлуатації, забезпечують екологічність та підвищують економічну ефективність готовим виробам.

Разом з тим, виникають проблеми із склеюванням такої деревини, оскільки суттєво зменшуються адгезійні властивості термічно модифікованої деревини до клейових матеріалів. Актуальним для таких клейових з'єднань є прогнозування їх міцності за допомогою математичної моделі на основі тривалих експериментальних досліджень з врахуванням факторів навколишнього середовища.

Існують окремі дослідження щодо склеювання термічно модифікованої деревини між собою, за допомогою поліуретанових, карбамідоформальдегідних та полівінілацетатних клеїв тощо. Щодо клейових конструкцій, в яких є поєднання термічно модифікованої і немодифікованої деревини, то вони практично не вивчались або вивчались частково.

Проблеми у склеюванні таких конструкцій виникають через фізико-механічні властивості, які є неоднаковим для термічно модифікованої і немодифікованої деревини. А саме: підвищена температура під час модифікування деревини ясен призводить до руйнування основних компонентів, зокрема целюлози і геміцелюлози та до збільшення кількості лігніну. Окрім того, при підвищених температурах у модифікованій деревині утворюється фурфурол, який погіршує адгезійні властивості клейових матеріалів до її поверхні.

Для вивчення зміни міцності таких клейових з'єднань використовують тривалий та пришвидшений методи дослідження. Тривалий дає змогу отримати реальні результати і оцінити зміну міцності клейових з'єднань деревини під час експлуатації, враховуючи вплив атмосферних факторів. Пришвидшений метод дає змогу за короткий проміжок часу, дослідити вплив температури та вологості на міцність клейових з'єднань та підтвердити достовірність отриманих результатів за тривалим методом. Для цих досліджень використовували дві породи деревини, а саме: ясен термічно модифікований і сосна немодифікована та термопластичний полівінілацетатний клей із класом довговічності D4.

Термопластичні полівінілацетатні клеї одні із небагатьох, які мають добру адгезію до термічно модифікованої деревини ясен та дуже добру до немодифікованої деревини сосни. Тому для забезпечення якісного клейового з'єднання із термічно модифікованої деревини ясен і сосни немодифікованої, на нашу думку, доцільно використовувати термопластичні полівінілацетатні клеї. Результати тривалих та пришвидшених експериментальних досліджень порівнювались із міцністю контрольних зразків та піддавалися статистичній обробці, за якою здійснено графічну інтерпретацію зміни міцності клейових з'єднань в залежності від кількості дубльованих спостережень.

Відповідно до результатів тривалих експериментальних досліджень встановлено, що міцність термопластичних полівінілацетатних клейових

з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і немодифікованої деревини сосни за два роки випробувань зменшилась на 27,9%. У реальних величинах зміна міцності зменшилась від 7,12 МПа до 5,13 МПа. А саме: через 3 місяці – на 11%, через 6 місяців – на 7,8%, через 9 місяців – на 15%, через 12 місяців – 18%, через 15 місяців – 17,5%, через 18 місяців – 16,7%, через 21 місяць – 21% і через 24 місяці – на 27,9% від міцності контрольних зразків.

Результатами пришвидшених експериментальних досліджень встановлено, що міцність клейових з'єднань задовольняє умови стандарту згідно з яким вони проводились. Зокрема, міцність зменшилась від 7,12 МПа (контрольні зразки), до – 3,90 МПа після циклічних температурно-вологісних випробувань.

Здійснено порівняльний аналіз результатів тривалих та пришвидшених експериментальних досліджень: результатів другого етапу випробувань за пришвидшеним методом та результатів зимового періоду тривалого методу досліджень, та результатів третього етапу пришвидшених випробувань із літнім періодом тривалих досліджень.

Отримані результати досліджень показали, що більш негативний вплив на термопластичні полівінілацетатні клейові з'єднання термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої має підвищена температура та невисока вологість під час експлуатації, а не понижена температура та підвищена вологість навколишнього середовища. Це дає можливість зробити висновок, що існує кореляційний зв'язок між тривалими і пришвидшеними експериментальними дослідженнями. Це дає змогу використовувати отримані результати експериментальних досліджень для побудови математичної моделі прогнозування міцності клейових з'єднань в залежності від дії вологи та температури навколишнього середовища.

Теоретично передбачено, що вплив тривалої дії вологи та температури навколишнього середовища на термопластичні полівінілацетатні клейові з'єднання з деревини під час експлуатації призводить до зменшення їх міцності та руйнування. А саме: тривала дія вологи навколишнього

середовища на клейове з'єднання термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, призводить до її проникнення у клейове з'єднання, в основному, через структуру деревини сосни. Термічно модифікована деревина ясена, навпаки, забезпечує таким клейовим з'єднанням меншу сорбційну здатність. Окрім того, незначна кількість вологи може привести до формування водневих зв'язків як між компонентами клейової композиції, так і компонентами деревини, що дає можливість дещо підвищити міцність клейового з'єднання.

Це підтверджується результатами експериментальних досліджень, якими встановлено, що характер руйнування клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями, залежить від тривалості випробувань у природних умовах та етапів пришвидшених випробувань. Результати дворічних природніх досліджень міцності клейових з'єднань показали, що такі клейові з'єднання можуть експлуатуватися у природних умовах при знакозмінних температурно-вологісних навантаженнях, не руйнуючись та забезпечуючи належну міцність готовим конструкціям. Результати пришвидшених експериментальних досліджень міцності клейових з'єднань показали, що нетривале витримування в атмосферних умовах, вимочування у воді та кип'ятіння менше впливають на зміну зовнішнього вигляду зразків, ніж випробування у природних умовах.

На основі результатів тривалих експериментальних досліджень побудовано математичну модель прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена та сосни немодифікованої. Прогнозування за допомогою математичної моделі є найбільш поширеним та перспективним методом прогнозування, оскільки враховує змінну пружно-деформаційних процесів у клейовому з'єднанні під час дії вологи та температури.

Для побудови математичної моделі прогнозування міцності клейових з'єднань термічно-модифікованої деревини ясена та сосни немодифікованої вибрано метод найменших квадратів та програмне забезпечення «MATLAB».

За допомогою програмного забезпечення «MATLAB» отримано поліноміальну модель першого та другого ступеня і косинусоїдальну модель.

Остання дає можливість прогнозувати міцність клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена із деревиною сосни немодифікованою, склеєну термопластичними полівінілацетатними клеями.

За даною математичною моделлю можна прогнозувати міцність для таких клейових з'єднань в залежності від умов їх експлуатації, а саме: вологості і температури навколишнього середовища. Прогнозування здійснено для двадцяти чотирьох місяців, відповідно до тривалості експериментальних досліджень.

Математична модель включає три коефіцієнти, а саме: А, В, С, які враховують умови експлуатації та основні характеристики клейової композиції та термічно модифікованої деревини ясена. Найбільш достовірні результати зміни міцності відтворенні за двадцять чотири місяці експлуатації. Похибка прогнозування становить 6,87%, що підтверджує достовірність отриманих результатів досліджень.

Економічна ефективність від запропонованих заходів полягає у підвищенні довговічності продукції, збереженні існуючої ціни та покращенні експлуатаційних властивостей продукції. Виробник матиме нижчий рівень витрат, що компенсує йому умовне скорочення попиту за існуючої ціни, а споживач реалізує свою вигоду через придбання продукції з довшим терміном експлуатації за ту ж саму ціну.

**Ключові слова:** прогнозування міцності, клейові з'єднання, термічно модифікована деревина, математична модель, фізико-механічні властивості деревини, полівінілацетатні клеї, адгезія, склеювання.

## ABSTRACT

*H.M. Datskiv.* Predicting the strength of adhesive joints of thermally modified ash wood glued with PVA-based adhesives. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for earning the scientific degree of Doctor of Philosophy (PhD), specialty 187 Woodworking technology and furniture production technique (18 – Production and technologies) – Ukrainian National Forestry University, Lviv, 2023.

The dissertation work provides solution to an important scientific and practical problem of predicting the strength of adhesive joints of thermally modified ash wood with unmodified pine wood glued with polyvinyl acetate adhesives with durability class D4, which is important for gluing wood and predicting the strength of the adhesive joints.

Glued wooden constructions are widely used in the manufacture of products. Today, special attention is paid to adhesive-bonded wooden constructions made of thermally modified wood and unmodified wood, which increase the service life, ensure environmental friendliness and increase the economic efficiency of finished products.

However, there arise problems with gluing such types of wood together, since the adhesive properties of thermally modified wood in relation to adhesive materials are significantly reduced. It is relevant for such adhesive-bonded joints to predict their strength using a mathematical model based on long-term experimental studies taking into account environmental factors.

There are some studies on gluing thermally modified wood together using polyurethane, urea-formaldehyde and polyvinyl acetate adhesives, etc. As for glued constructions, which contain a combination of thermally modified wood and unmodified wood, they have been practically not studied or have been studied partially. Problems in gluing such constructions arise due to physical and mechanical properties, which are not the same for thermally modified wood and unmodified wood. To be exact, the increased temperature during the modification

of ash wood leads to the destruction of the main components, namely cellulose and hemicellulose and to an increase in the amount of lignin. In addition, at elevated temperatures, furfural is formed in modified wood, which reduces the adherency of adhesive materials to the surface of such wood.

To study changes in the strength of such adhesive joints, a long-term method and an accelerated research method are used. The long-term method allows obtaining real results and evaluating the change in the strength of wood adhesive joints during their operational use, taking into account the influence of atmospheric factors. The accelerated method makes it possible, in a short period of time, to investigate the effect of the ambient temperature and humidity on the strength of adhesive joints and to confirm the reliability of the results obtained using the long-term method. For these studies, two types of wood were used, namely: thermally modified ash wood and unmodified pine wood, and thermoplastic polyvinyl acetate adhesive with durability class D4 was used.

Thermoplastic polyvinyl acetate adhesives are among the few ones that have good adhesion to thermally modified ash wood and very good adhesion to unmodified pine wood. Therefore, in our opinion, it is advisable to use thermoplastic polyvinyl acetate adhesives to ensure a high-quality adhesive joint between thermally modified ash wood and unmodified pine wood. The results of long-term and accelerated experimental studies were compared with the strength of control specimens and subjected to statistical processing, based on the results of which a graphical interpretation of changes in the strength of adhesive joints was carried out depending on the number of duplicate observations.

According to the results of long-term experimental studies, it was found that the strength of thermoplastic polyvinyl acetate adhesive joints between thermally modified ash wood and unmodified pine wood decreased by 27.9% over two years of testing. In real terms, the change in strength decreased from 7.12 MPa to 5.13 MPa. Namely, after 3 months - by 11%, after 6 months - by 7.8%, after 9 months - by 15%, after 12 months - 18%, after 15 months - 17.5%, after 18 months - 16

.7%, after 21 months – 21%, and after 24 months – by 27.9% , of the strength of the control specimens.

As a result of accelerated experimental studies, it was found that the strength of adhesive joints satisfies the standard requirements according to which these experiments were carried out. Namely, the strength decreased from 7.12 MPa (control specimens) to 3.90 MPa after cyclic temperature-humidity tests.

A comparative analysis was made between the results of long-term and accelerated experimental studies. Namely, between the results of the second stage of tests using the accelerated method and the results of the winter period of the long-term research method, and the third stage of accelerated tests with the summer period of long-term studies.

The obtained study results showed that increased temperature and low humidity during the operational use have a more negative impact on thermoplastic polyvinyl acetate adhesive joints of thermally modified ash wood with unmodified pine wood than low temperature and high humidity of the environment. This suggests that there is a correlation between long-term and accelerated experimental studies. This makes it possible to use the obtained results of experimental studies to construct a mathematical model for predicting the strength of adhesive joints depending on exposure to the ambient humidity and temperature.

Theoretically, it is assumed that prolonged exposure to the ambient humidity and temperature of thermoplastic polyvinyl acetate adhesive joints of wood during their operational use leads to reduction of their strength and destruction. Namely, long-term exposure to environmental moisture of the adhesive joint between thermally modified ash wood and unmodified pine wood leads to the moisture penetration into the adhesive joint, mainly through the structure of the pine wood. Thermally modified ash wood, on the contrary, provides such an adhesive joint with lower sorption capacity. Besides, a small amount of moisture can lead to the formation of hydrogen bonds, both between the components of the adhesive composition and the components of wood, which makes it possible to slightly increase the strength of the adhesive joint.

This can be confirmed by the results of experimental studies which established that the nature of the destruction of adhesive joints of thermally modified ash wood with unmodified pine wood glued with thermoplastic polyvinyl acetate adhesives depends on the duration of tests in natural conditions and the stages of accelerated tests.

The results of two-year natural studies on the strength of adhesive joints showed that such adhesive joints can be used in natural conditions under varying temperature and humidity loads without being damaged and providing proper strength to finished structures.

The results of accelerated experimental studies on the strength of adhesive joints showed that short exposure to atmospheric conditions, soaking in water and boiling have less effect on changing the appearance of specimens than testing under natural conditions.

Based on the results of long-term experimental studies, a mathematical model was built for predicting the strength of adhesive joints between thermally modified ash wood and unmodified pine wood. Prediction with using a mathematical model is the most common and promising predicting method, since it takes into account the variable of elastic-deformation processes in the adhesive joint during exposure to humidity and temperature.

To build a mathematical model for predicting the strength of adhesive joints between thermally modified ash wood and unmodified pine wood, the least squares method and the MATLAB software were chosen.

By using the MATLAB software, a polynomial model of the first and second degrees and a cosine-curve model were obtained.

The latter makes it possible to predict the strength of adhesive joints of thermally modified ash wood with unmodified pine wood glued with thermoplastic polyvinyl acetate adhesives.

By using this mathematical model, it is possible to predict the strength of such adhesive joints depending on their operating conditions, namely, the ambient

humidity and temperature. Predicting was carried out for twenty-four months, according to the duration of the experimental studies.

The mathematical model includes three coefficients, namely: A, B, C, which take into account the operating conditions and the main characteristics of the adhesive composition and thermally modified ash wood. The most reliable results of changes in strength are obtained for a twenty-four-months period of operational use. The prediction error is 6.87%, which confirms the reliability of the obtained research results.

The economic efficiency of the proposed measures consists in increasing the durability of products, preserving the existing price and improving the performance properties of products. The producer will have a lower level of costs, which compensates them for the conditional reduction in demand at the existing price, and the consumer will realize his benefit by purchasing products with a longer service life at the same price.

**Key words:** strength prediction, adhesive joints, thermally modified wood, mathematical model, physical and mechanical properties of wood, polyvinyl acetate adhesives, adhesion, gluing.

## ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

### *Статті у закордонних наукових виданнях*

1. Kshyvetskyu B.Y, **Datskiv H.M.** Strength of adhesive joints of thermally modified ash wood glued with polyvinyl acetate - based adhesives. Drewno. Prace naukowe. Doniesienia. Komunikaty. 2023, 66 (211): 5-8.  
<https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.XXX.XX>

### *Статті в наукових фахових виданнях України*

2. **Datskiv H.**, Kshyvetskyu B. Results of experimental studies on the strength of adhesive-bonded joints of thermally modified ash wood. Ukrainian Journal of Forest and Wood Science. Vol. 14, No. 1, 2023 с. 27- 38.  
<https://doi.org/10.31548/forest/1.2023.27>

3. **Дацків Г. М.**, Кшивецький Б. Я. Встановлення міцності клейових з'єднань термічно модифікованої та звичайної деревини із використанням різних методик. Науковий вісник НЛТУ України. 2022, т. 32, № 5. С. 63–68.  
<https://doi.org/10.36930/40320509>.

4. Кшивецький Б. Я., **Дацків Г. М.**, Андрашек Й. В. Загальні відомості про клеї, склеювання та термічно модифіковану деревину. Науковий вісник НЛТУ України. 2019, т. 29, № 3. С. 81–84. <https://doi.org/10.15421/40290317>.

### *Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації та додатково відображають її наукові результати*

5. **Дацків Г.М.**, Кшивецький Б.Я. Щодо зміни міцності з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої при впливі природних факторів. XIII Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» Том 1. 25 – 26 травня 2023 р., м. Чернігів. С. 241-242.

6. **Дацків Г.М.**, Кшивецький Б.Я. Щодо результатів пришвидшених експериментальних досліджень міцності склеювання термічно модифікованої

деревини клеями на основі ПВА. XII Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» Том 1. 26 – 27 травня 2022 р., м. Чернігів. С. 168-169.

7. **Дацків Г. М.,** Кшивецький Б. Я. Щодо пришвидшених експериментальних досліджень міцності клейового з'єднання термічно модифікованої деревини клеями на основі ПВА. XI Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» Том 1. 26 – 27 травня 2021 р., м. Чернігів. С. 175-177.

8. **Дацків Г. М.,** Кшивецький Б. Я. Методика проведення експериментальних досліджень міцності з'єднань термічно модифікованої деревини клеями на основі ПВА. X Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» Том 1. 29 – 30 квітня 2020 р., м. Чернігів. С. 202-203.

9. **Дацків Г. М.,** Кшивецький Б. Я. Щодо методики склеювання термічно модифікованої деревини. IX Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» Том 1. 14 – 16 травня 2019 р., м. Чернігів. С. 211-212.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>16</b>
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МІЦНОСТІ КЛЕЙОВИХ З'ЄДНАНЬ ТЕРМІЧНО МОДИФІКОВАНОЇ І НЕМОДИФІКОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ ТА ЇЇ ПРОГНОЗУВАННЯ .....</b>	<b>22</b>
1.1 Загальні відомості про склеювання деревини та з'єднання на її основі	22
1.2 Властивості деревини та їх вплив на міцність клейових з'єднань .....	28
1.3 Характеристика та властивості термічно модифікованої деревини .....	33
1.4 Клеї для склеювання деревини та їх характеристика.....	41
1.5 Щодо прогнозування міцності клейових з'єднань .....	45
1.6 Висновки, мета та завдання дослідження.....	50
<b>РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ КЛЕЙОВИХ З'ЄДНАНЬ ТЕРМІЧНО МОДИФІКОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ ЯСЕНА ТА СОСНИ НЕМОДИФІКОВАНОЇ ...</b>	<b>53</b>
2.1 Теоретичні передбачення формування клейових з'єднань .....	53
2.2 Вплив вологи та температури на зміну міцності клейових з'єднань .....	59
2.3 Побудова математичної моделі прогнозування міцності клейових з'єднань .....	63
2.4 Висновки з розділу.....	68
<b>РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МІЦНОСТІ КЛЕЙОВИХ З'ЄДНАНЬ ТЕРМІЧНО МОДИФІКОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ ЯСЕНА ТА СОСНИ НЕМОДИФІКОВАНОЇ.....</b>	<b>70</b>
3.1 Підготовка матеріалів для проведення експериментальних досліджень	71
3.2 Методика проведення тривалих експериментальних досліджень клейових з'єднань .....	75
3.3 Методика проведення пришвидшених експериментальних досліджень клейових з'єднань .....	77

3.4 Статистична обробка результатів експериментальних досліджень .....	80
<b>РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ТА АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗМІНИ МІЦНОСТІ КЛЕЙОВИХ З'ЄДНАНЬ ТЕМІЧНО МОДИФІКОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ ЯСЕНА І СОСНИ НЕМОДИФІКОВАНОЇ .....</b>	<b>83</b>
4.1 Результати тривалих експериментальних досліджень міцності клейових з'єднань .....	84
4.2 Результати пришвидшених експериментальних досліджень міцності клейових з'єднань .....	92
4.3 Порівняльний аналіз тривалих та пришвидшених експериментальних досліджень .....	96
4.4 Опис руйнування клейових з'єднань .....	99
4.5 Прогнозування міцності клейових з'єднань .....	108
4.6 Висновки з розділу.....	113
<b>РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ .....</b>	<b>115</b>
5.1 Економічна ефективність від отриманих результатів досліджень .....	115
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>129</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>131</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>148</b>

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Клейові деревинні конструкції широко використовуються для виготовлення виробів, які експлуатуються як в середині приміщень, так і в природних умовах. Важлива роль, на сьогодні, надається клейовим деревинним конструкціям із термічно модифікованої та немодифікованої деревини, які збільшують термін експлуатації, забезпечують екологічність та підвищують економічну ефективність готових виробів [13, 14, 63, 64, 104].

Термічно модифікована деревина є тим конструкційним матеріалом, який здатен протягом тривалого часу без руйнувань експлуатуватися у природних умовах. Це забезпечується структурними змінами, які відбуваються у деревині під час її оброблення високими температурами [109, 122, 128]. Разом з тим, виникають проблеми із склеюванням такої деревини при виготовленні різного роду деревинних конструкцій, оскільки суттєво зменшуються адгезійні властивості термічно модифікованої деревини до клейових матеріалів [84, 88, 160]. Це вимагає додаткових досліджень щодо процесів склеювання як термічно модифікованої деревини між собою, так і термічно модифікованої деревини з немодифікованою, де міцність є основним показником довговічності виробів. Клейові конструкції із термічно модифікованої та немодифікованої деревини набувають широкого використання при виготовленні столярно-будівельних виробів.

Важливим при склеюванні термічно модифікованої і немодифікованої деревини є прогнозування міцності клейового з'єднання під дією температури та вологи навколишнього середовища.

Тому актуальним є прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями (ПВА) за допомогою математичної моделі на основі результатів тривалих та пришвидшених експериментальних досліджень.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана у рамках науково-дослідної кафедральної тематики: «Дослідження процесів деревообробки для розробки ресурсоощадних, енергоефективних та екологічнобезпечних технологій», реєстраційний номер 0121U114200. Дисертантові належать дослідження формування екологічнобезпечних клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями, та побудова математичної моделі прогнозування міцності таких з'єднань.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, склеєної полівінілацетатними клеями, за допомогою математичної моделі на основі тривалих експериментальних досліджень.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

1. Проаналізувати і підібрати методику досліджень міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, склеєної ПВА клеями.

2. Провести тривалі та пришвидшені експериментальні дослідження міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, склеєної ПВА клеями.

3. Здійснити статистичну обробку результатів експериментальних досліджень, побудувати графічні залежності зміни міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, склеєної ПВА клеями залежно від змінних температурно-вологісних навантажень.

4. Запропонувати математичну модель для прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і немодифікованої деревини сосни, склеєної ПВА клеями та здійснити аналіз отриманих результатів.

5. Розробити практичні рекомендації щодо використання отриманих результатів досліджень.

6. Розрахувати економічну ефективність від запропонованих заходів.

**Об'єкт дослідження** – клейові з'єднання термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями.

**Предмет дослідження** – міцність клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями.

**Методи дослідження.** У дисертаційній роботі використані такі методи досліджень: методи тривалих та пришвидшених експериментальних досліджень зміни міцності клейових з'єднань, статистичної обробки результатів експериментальних досліджень, математичного моделювання зміни міцності клейової конструкції.

**Наукова новизна одержаних результатів** у тому, що на основі тривалих експериментальних досліджень побудовано математичну модель прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями. Це підтверджено наступними науковими результатами.

1. Отримано нові закономірності зміни міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями за методикою тривалих досліджень. Це дало можливість вивчити вплив природних факторів на міцність з'єднань в процесі експлуатації.

2. Встановлено вплив вологи та температури на зміну міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої за пришвидшеною методикою. Це дозволило здійснити порівняльний аналіз з результатами тривалих експериментальних досліджень та більш детально вивчити вплив вологи та температури на міцність клейових з'єднань.

3. Побудовано нову математичну модель прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями, яка дає можливість передбачати зміну міцності клейових з'єднань у залежності від дії природних факторів.

4. Дістав подальшого розвитку механізм формування клейового з'єднання термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями.

**Достовірність і обґрунтованість** отриманих результатів прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями підтверджено тривалими експериментальними дослідженнями, їх статистичною обробкою та апробацією на семінарах і науково-технічних конференціях.

**Практичне значення одержаних результатів.** Запропоновано: клейову деревинну конструкцію, зовнішній шар якої виготовлений із ламелі термічно модифікованої деревини ясеня, а для її приклеювання використано термопластичний полівінілацетатний клей із класом довговічності D4.

Запропоновано математичну модель прогнозування міцності для клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями, що дає можливість передбачати міцність клейових з'єднань з врахуванням характеристики клею, властивості деревини та умови експлуатації. Результати досліджень апробовано на ПП ТСМ «Ілечко», с. Сокільники, Львівська обл., і ФОП «Тарканій В.І.» Закарпатська обл..

Результати дисертаційної роботи використано для підготовки бакалаврів та магістрів спеціальності 187 «Деревообробні та меблеві технології» з навчальних дисциплін фахової підготовки: “Технологія столярних виробів”, “Проектування світлопрозорих конструкцій”, “Прогнозування довговічності клейових з'єднань деревини”.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати дисертаційної роботи, що винесено до захисту, автор отримав особисто. У роботах, що опубліковані у співавторстві, авторів належать: [1] – аналіз властивостей деревини та клейових матеріалів, які використовують для склеювання як немодифікованої так і термічно модифікованої деревини; [2] – підібрано методику проведення тривалих та пришвидшених експериментальних досліджень міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня та сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями; [3] – проведено тривалі експериментальні дослідження зміни міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня та сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями, здійснено аналіз отриманих даних та побудовано графічні залежності; [4] – отримано результати зміни міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями на основі проведених пришвидшених експериментальних досліджень, побудовано графічні залежності та здійснено їх аналіз.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертаційної роботи та її результати доповідались та обговорювались на: IX (2019 р.), X (2020 р.), XI (2021 р.), XII (2022 р.) та XIII (2023 р.) Міжнародних науково-практичних конференціях «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Національний університет "Чернігівська політехніка", м. Чернігів); 71-ій науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, наукових працівників, докторантів та аспірантів Навчально-наукового інституту деревообробних та комп'ютерних технологій і дизайну (Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, 2021); 72-ій науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, наукових працівників, докторантів та аспірантів «Теоретичні та прикладні аспекти деревообробних та комп'ютерних технологій і дизайну» (Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, 2022).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи представлено в 9 наукових працях, серед яких 3 статті у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у закордонному науковому виданні, що індексується у Scopus, та 5 тез наукових доповідей.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота містить анотацію, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел та додатки. Основний текст дисертації викладено на 116 сторінках, проілюстровано 57 рисунками і 13 таблицями. Список використаних джерел містить 160 позицій. Додатки на 50 сторінках.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ МІЦНОСТІ КЛЕЙОВИХ З'ЄДНАНЬ ТЕРМІЧНО МОДИФІКОВАНОЇ І НЕМОДИФІКОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ ТА ЇЇ ПРОГНОЗУВАННЯ

### 1.1 Загальні відомості про склеювання деревини та з'єднання на її основі

При виготовленні виробів з деревини, конструкцій або їх елементів, використовують роз'ємні або нероз'ємні з'єднання. Роз'ємні з'єднання дозволяють багаторазове збирання і розбирання та формуються за допомогою цвяхів, шурупів, конфірматів, стяжок тощо. А нероз'ємні з'єднання формуються за допомогою клею. До них належать шипові з'єднання, з'єднання на гладку фугу, шпунт, гребінь тощо. В процесі виготовлення роз'ємних з'єднань у деталях необхідно сформувати отвори або врізи, що в свою чергу послаблює конструкцію. Тому у наш час масово використовують з'єднання деревини за допомогою клеїв [13, 14].

Клейові з'єднання деревини широко використовується при виготовленні віконних і дверних блоків, столярних плит, меблевих щитів, підлогових покриттів, личкування щитових матеріалів, а також для отримання елементів деталей із масивної і термічно модифікованої деревини тощо. Серед вимог, які ставляться до склеєної деревини, є забезпечення відповідної міцності під час експлуатації виробу чи конструкції, що ґрунтується на явищах адгезії та когезії. Тобто, здатності молекул утворювати різного роду хімічні зв'язки між матеріалами, які склеюють. Дослідженням і вивченням адгезійної і когезійної міцності клейових з'єднань деревини займались: Б.Я. Кшивецький, П.А. Бехта, Т. Krystofiak, J. Sedliačik.

Актуальним також є склеювання як немодифікованої, так і термічно модифікованої деревини. Для цього використовують як термореактивні, зокрема фенолоформальдегідні, карбамідоформальдегідні, поліуретанові клеї тощо, так і термопластичні клеї, такі як полівінілацетатні [19, 48].

Термореактивні клеї мають хорошу адгезію до деревини, швидко тверднуть, витримують змінні вологісні і температурні навантаження навколишнього середовища, недорогі, забезпечують клейовим з'єднанням належну водо-, волого- і теплостійкість тощо. Проте, з'єднання за допомогою цих клеїв мають досить високий відсоток вологопоглинання, формують крихке клейове з'єднання, є токсичними як під час приготування клею, склеювання, так і під час експлуатації готових виробів [83]. Крім того, такі клеї мають невисокі адгезійні властивості до термічно модифікованої деревини, що не дає забезпечити клейовим з'єднанням належної міцності, як в процесі склеювання, так і експлуатації [3, 4, 47].

Щодо термопластичних полівінілацетатних клеїв, то вони мають хороші адгезійні властивості до деревини та деревинних матеріалів, забезпечують належну міцність клейовим з'єднанням, формують еластичний клейовий шов, є екологічними тощо. Разом з тим, ПВА клеї не є водо-, волого-, та теплостійкими, що не забезпечує клейовим з'єднанням деревини належної водо- та вологостійкості під час експлуатації готових виробів. Тому такі клеї піддаються модифікуванню, що дає можливість покращити їх експлуатаційні характеристики. Дані клеї в наш час широко використовуються для склеювання виробів з масивної деревини, оскільки дозволяють забезпечити належну міцність, водо- та вологостійкість під час експлуатації виробів.

Сьогодні існує низка ґрунтовних наукових досліджень щодо міцності клейових з'єднань з хвойних і листяних порід деревини під час експлуатації при знакозмінних навантаженнях. Б. Я Кшивецький дослідив міцність та довговічність термопластичних клейових з'єднань шпилькових порід деревини (сосни) залежно від зміни вологості. Для досліджень був використаний клей на основі полівінілацетату із класом довговічності D4, відповідно до стандарту ДСТУ EN 204:2014. Міцність клейових з'єднань після циклічних температурно-вологісних випробувань зменшилась на 23% [39, 40, 42, 43].

Таку поведінку міцності термопластичних полівінілацетатних клейових з'єднань автор пояснює утворенням гідрофільних та міжмолекулярних зв'язків як між компонентами клейової композиції, так і деревини. Разом з тим, додаткова вода, яка потрапляє у клейове з'єднання, руйнує його структуру і призводить до зменшення міцності [41].

Щодо використання таких клеїв для склеювання термічно модифікованої деревини, то виникає проблема забезпечення належної міцності, особливо під час експлуатації. Це пов'язано зі зміною фізико-механічних властивостей деревини, які відбуваються у процесі її модифікування під дією високих температур [61, 77, 103, 105, 139, 149]. Дана проблема є актуальною, оскільки потреба у склеюванні термічно модифікованої деревини зростає. Окрім того, збільшується використання конструкцій, склеєних з немодифікованої та термічно модифікованої деревини. Наукові дослідження в напрямку склеювання термічно модифікованої деревини різних порід, включаючи різний ступень її обробки та використання різних клейових матеріалів, наведені у роботах [33, 130, 142].

Зазвичай, автори для досліджень використовували термічно модифіковану деревину оброблену за температури 150°C – 225°C, а для склеювання – термореактивні і термопластичні клеї. У роботі [33] автори досліджували міцність клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена, оброблену за температури 160°C і 220°C протягом 4-х годин. Для склеювання використовували полівінілацетатний клей з класом довговічності D3. Результати досліджень показали, що середнє значення міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена, обробленої за температури 160°C протягом 4-х годин, становить 3,45 МПа, а за температури 220°C – 6,34 МПа. Таку різницю показників міцності, автори пояснюють хімічними змінами, які відбуваються за різних температур оброблення. За температури 160°C відбувається розклад геміцелюлози і дещо змінюється структура лігніну, а за температури 220°C відбувається збільшення вмісту лігніну за

рахунок реакції зшивання. Це приводить до утворення міжмолекулярних зв'язків між деревиною і адгезивом, в результаті чого збільшується міцність клейового з'єднання.

Дослідники S. Tiryaki, S. Bardak, T. Bardak вивчали міцність клейового з'єднання деревини бука, склеєної полівінілацетатними клеями, в залежності від зміни витрати клею (130, 160, 190, 220) г/м<sup>2</sup>, тривалості (20, 30, 40) хв і тиску пресування (6, 8, 10) кг/см<sup>2</sup>. Результати експериментальних досліджень показали, що із збільшенням часу витримки і тиску пресування міцність клейових з'єднань збільшується. Але із збільшенням витрати клею міцність зменшується. Згідно з результатами, отримано оптимальні параметри склеювання, відповідно до яких максимальне значення міцності забезпечується за витрати клею 190 г/м<sup>2</sup>, тиску пресування 10 кг/см<sup>2</sup> і тривалості пресування 40 хв. Теоретично це можна пояснити тим, що із збільшенням тривалості і тиску пресування, відбувається більш інтенсивне проникнення клею в клітинні порожнини деревини, що в свою чергу, приводить до збільшення міцності клейового з'єднання [142].

У роботі [97] досліджено міцність клейових з'єднань термічно модифікованої деревини, обробленої за різних температурних умов. Для цього використовували деревину ялиці, яку обробляли за температури 170°C, 180°C, 190°C, 200°C і 212°C протягом 2-х годин, яку склеювали термореактивними (феноло-формальдегідними, меламіно-формальдегідними, меламіно-карбамідо-формальдегідними та поліуретановими) клеями. На основі результатів встановлено, що міцність клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ялиці, обробленої за різних температур, для всіх типів клейових з'єднань зменшувалась із підвищенням температури оброблення деревини. Найвищу міцність забезпечували клейові з'єднання деревини ялиці, склеєні поліуретановим клеєм.

У роботі [147] досліджено міцність склеювання термічно обробленої деревини граба, обробленої за температур 150°C, 175°C, 200°C і 225°C протягом 3-х годин. Для склеювання використовували меламіно-

формальдегідний, поліуретановий і полівінілацетатний клеї. Результати досліджень показали, що, із підвищенням температури оброблення, міцність клейових з'єднань зменшувалась. Разом з тим міцність клейового з'єднання на основі поліуретанового клею була вищою на 11,9% та 15,6%, від міцності клейових з'єднань на основі меламіно-формальдегідних та полівінілацетатних клеїв відповідно. У порівнянні з показниками міцності контрольних зразків клейових з'єднань, вона зменшилась на 21,7% для меламіно-формальдегідних, 15,3% для поліуретанових та 39,6% для полівінілацетатних клеїв.

У роботі [74] автори досліджували міцність клейових з'єднань термічно модифікованої деревини сосни. Перед термічною обробкою деревину висушували за температури 103°C, щоб довести вологість до 0%. Після чого проводили термічну модифікацію за температури від 190°C до 212°C протягом 2 год. Для склеювання використовували двокомпонентний полівінілацетатний клей. Міцність таких клейових з'єднань зменшилися в середньому на 35%, в порівнянні із клейовими з'єднаннями немодифікованої деревини сосни. На думку авторів, це пов'язано із тим, що в процесі термічної модифікації відбувається зменшення кількості полярних груп в деревині, змінюються її хімічні та фізичні властивості, відбувається окиснення поверхні деревини, зменшуються показники змочуваності та утворюються мікротріщини на клітинних стінках, що значно знижує адгезійні властивості термічно модифікованої деревини.

Подані вище результати досліджень свідчать про складність та специфіку склеювання термічно модифікованої деревини, оскільки в процесі модифікування відбуваються незворотні хімічні зміни (розкладання геміцелюлози, деградація целюлози і структурні зміни лігніну), які призводять до скорочення міжмолекулярних зв'язків між деревиною і адгезивом [23, 65, 68, 69, 92, 141].

Міцність клейових з'єднань термічно модифікованої деревини залежить від низки факторів, включаючи змочуваність, проникність поверхні,

шорсткість, вміст вологи, гігроскопічність, хімічний склад, рН деревини тощо [91, 96, 98, 99, 138].

Показник змочуваність деревини зменшується із підвищенням температури термічного оброблення. Починаючи від 130°C і вище, даний показник різко зменшується. Це може бути спричинено випаровуванням залишкової вологи з деревини або пластифікацією лігніну. При температурі модифікування вище за 200°C поверхня деревини стає гідрофобною, через що уповільнюється процес проникнення клеїв. Крім того, в процесі термічного модифікування знижується рівноважна вологість і кислотність деревини, що негативно впливає на адгезійні властивості модифікованої деревини. Зміна рН на поверхні термічно модифікованої деревини може пришвидшити або ж уповільнити процес твердіння клею. А зниження рівноважної вологості зменшує ефективність склеювання [1, 147].

У роботі [160] автори досліджували зниження вільної поверхневої енергії термічно модифікованої деревини і дійшли висновку, що причиною цього є зменшення кислотно-лужних компонентів після процесу термічного модифікування.

Автори A Sogutlu C. і Dongel N. у своїй роботі зазначають, що деревина із вищою щільністю утворює міцніші клейові з'єднання, порівняно з деревиною нижчої щільності [135].

Із наведених вище досліджень випливає, що проблема склеювання термічно модифікованої деревини сьогодні є актуальною і до кінця не вирішеною задачею. Окрім того, актуальною є проблема склеювання термічно модифікованої деревини із немодифікованою деревиною у будівництві, при виготовленні столярних виробів. Наприклад екологічно чистого конструкційного матеріалу, зокрема "клеєного термобруса", що виготовлений з ламелей термічно модифікованої та немодифікованої деревини (рис. 1.1) [48, 56].

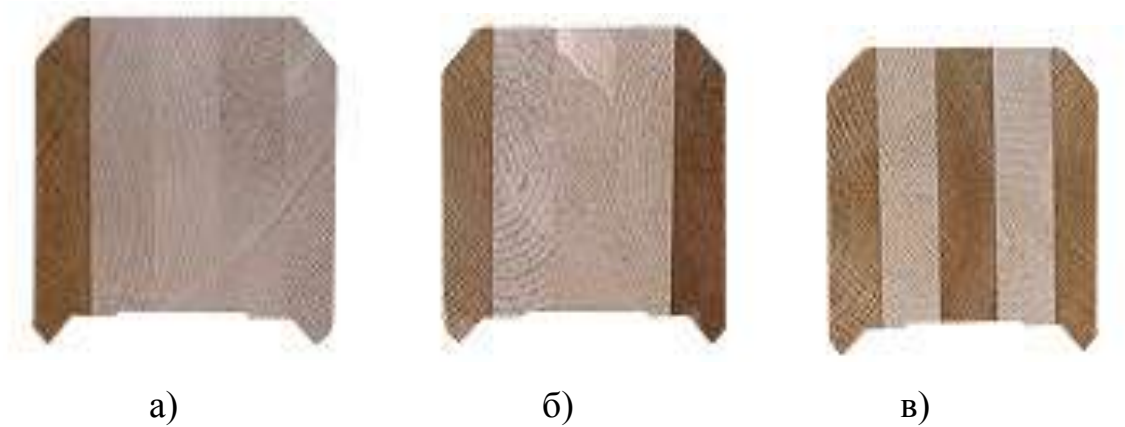


Рис. 1.1. Клеєний термобрус з ламелями термічно модифікованої деревини:

а) одною; б) двома; в) трьома.

Даний матеріал відкриває нові перспективи та можливості у будівництві при виготовленні столярно-будівельних виробів. Це пов'язано із його довговічністю під час експлуатації.

Сучасні лакофарбові матеріали, які використовуються для опорядження будівельних конструкцій, не забезпечують належних умов їх експлуатації, особливо зовнішніх поверхонь, які контактують із навколишнім середовищем. Цю проблему можна вирішити за допомогою клейової конструкції, що поєднує термічно модифіковану деревину зовні і немодифіковану деревину в середині. Це дасть можливість підвищити довговічність конструкцій і тим самим економити кошти та зберегти лісові ресурси.

## 1.2 Властивості деревини та їх вплив на міцність клейових з'єднань

Деревина – це природний, анізотропний, гігроскопічний, екологічно чистий та природно відновлюваний матеріал, який широко використовується для виготовлення різного асортименту виробів, у тому числі і клейових конструкцій. Основною структурною одиницею деревини є клітина, стінки якої складаються з трьох полімерів, а саме: целюлози, геміцелюлози і лігніну.

Основу клітинних стінок формує целюлоза. А лігнін, геміцелюлоза і вода заповнюють порожнини між мікрофібрилами целюлози [11, 12, 18, 71, 106].

Целюлоза – природний полімер, полісахарид, який має лінійну будову. Хімічна формула целюлози  $(C_6H_{10}O_5)_n$ . Макромолекула целюлози має вигляд ланцюга, ланками якої є глюкозні залишки. Число ланок характеризується ступенем полімеризації і перебуває в межах 5000-10000. Уперше целюлозу дослідив французький хімік Ансельм Пайен у 1838 році. Целюлоза є тим полімером, який відповідає за міцність деревного волокна та характеризується пружними деформаціями. Вона нерозчинна у воді та в більшості органічних розчинників, але є малостійкою до дії кислот. Вміст целюлози в деревині, залежно від породи, коливається від 40% до 50% [86, 18, 158].

Геміцелюлоза – полісахарид, який за своїм хімічним складом схожий до целюлози, проте легко піддається гідролізу і розчиняється в мінеральних розчинниках. Умовно геміцелюлозу поділяють на пентозани  $(C_5H_8O_4)_n$  і гексозани  $(C_6H_{10}O_5)_n$ . Ступінь полімеризації геміцелюлози в рази менший за целюлозу і перебуває в межах ( $n = 60-200$ ). А це означає, що ланцюги молекул є коротшими і мають меншу молекулярну масу [12, 59, 112].

Лігнін – ароматична сполука, яка відрізняється від целюлози та геміцелюлози високим вмістом вуглецю. Наприклад, целюлоза містить 44,4% вуглецю, а лігнін (60-66)%. Хімічна формула лігніну  $C_{39}H_{29}O_6(OH)_5(OCN_3)_4$ . Порівняно з целюлозою він стійкіший до грибків і бактерій, але легко окиснюється і розчиняється при нагріванні в лугах. Лігнін бере участь у процесі одеревіння молоді клітинної стінки [10, 136, 158].

Основними властивостями деревини є фізичні, механічні та хімічні, які будуть залежати від породи деревини (див. рис. 1.2) [47].

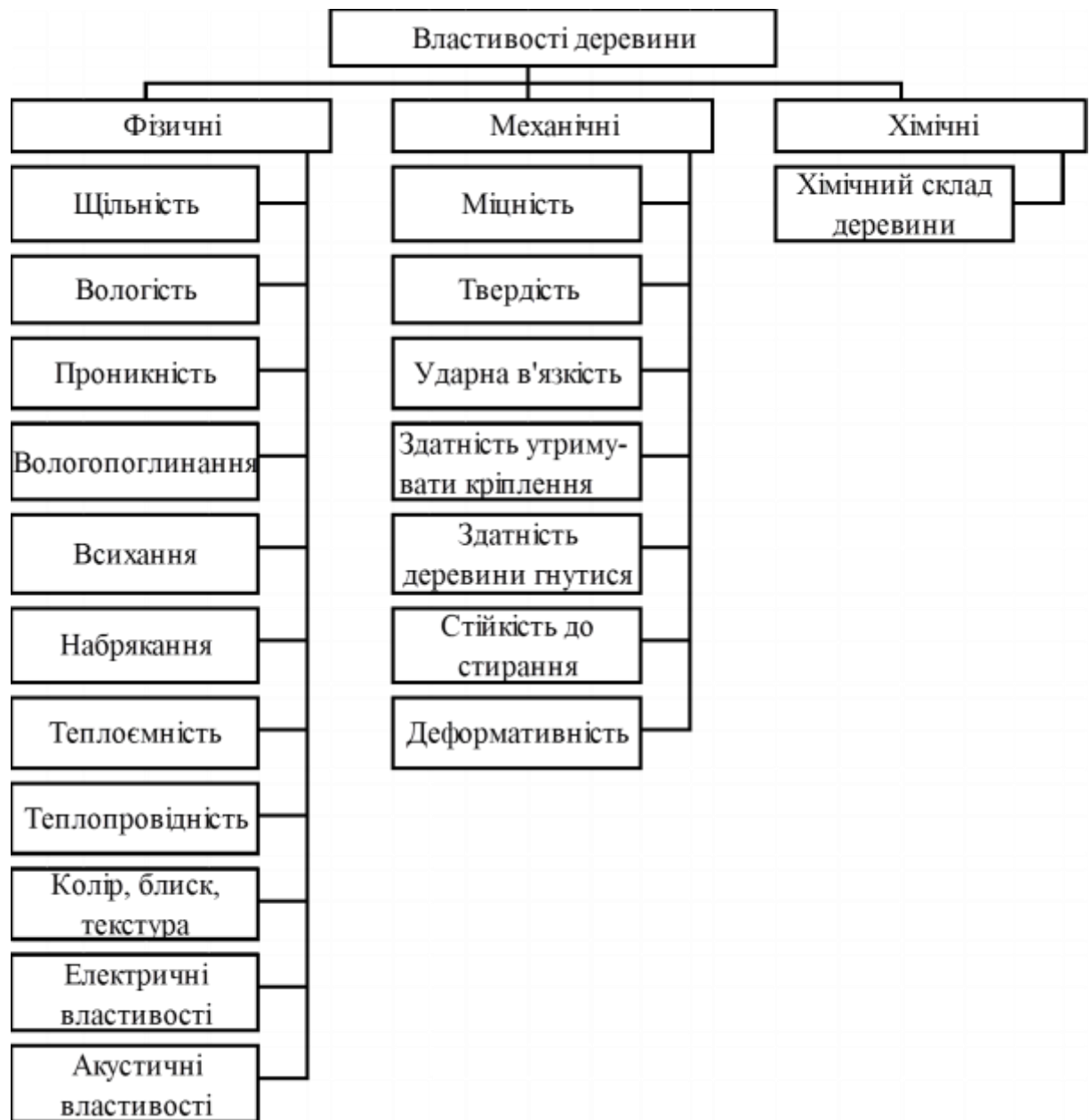


Рис. 1.2. Властивості деревини.

Фізичні властивості деревини залежать від компонентів, з яких вона складається. До основних фізичних властивостей деревини, як конструкційного матеріалу належать: вологість, всихання, розбухання, щільність та пористість. Ці властивості, в основному, будуть впливати на формування адгезійної і когезійної міцності клейових з'єднань деревини [10, 25].

Механічні властивості – це здатність деревини чинити опір при дії зовнішніх навантажень, які призводять до появи деформації. Розрізняють

тимчасові, постійні або граничні деформації. Останніх впливають на руйнування деревини. Саме деформаційні процеси, які відбуватимуться у клейових з'єднаннях деревини під час експлуатації, будуть характеризувати довговічність конструкції при знакозмінних температуро-вологісних навантаженнях [12, 58].

Хімічні властивості деревини будуть залежати від процентного вмісту кожного з елементів, а саме: целюлози, геміцелюлози і лігніну.

Наведені вище властивості впливатимуть на технологічний процес склеювання деревини та міцність клейових з'єднань в умовах експлуатації [121].

Наприклад, пористість деревини що характеризується відношенням об'єму внутрішніх пор до загального об'єму деревини в абсолютно сухому стані, впливатиме на витрату клею та формування адгезійної міцності. Відомо, що стійкість клейових з'єднань пористої деревини вища від стійкості клейових з'єднань щільної деревини, що описується механічною теорією склеювання [53, 126].

Разом з тим, щільність деревини, а це відношення її маси до об'єму, буде впливати на міцність клейового з'єднання та його стійкість до дії навколишнього середовища. Окрім того, даний показник деревини є одним із факторів оцінки її вартості, важливим економічним показником [57].

Значний вплив на міцність клейового з'єднання має комбінація склеюючих поверхонь з ранньої і пізньої зони. При формуванні клейових з'єднань площа контакту деревина-клей у більшості випадків припадає на ранню зону, яка за своєю структурою є рихлою. Це призводить до зниження адгезійної міцності клейового з'єднання. Проте, рання зона, швидше вступає в контакт з клейовими матеріалами, тому і є основною зоною зв'язків [46].

Окрім перерахованих вище факторів, на міцність клейових з'єднань значний вплив матиме стан поверхні деревини, що склеюється. Недостатньо підготовлена поверхня деревини призводить до зниження міцності клейового з'єднання. А вади деревини, такі як: сучки і смоляні кишеньки впливатимуть

на стійкість клейових з'єднань під час змінних температурно-вологісних навантажень [47].

Значний вплив на міцність клейових з'єднань матиме вологість деревини під час склеювання. Із збільшенням вологості у деревині буде зменшуватися адгезія клею до неї. Це зумовлено тим, що молекули води у деревині будуть блокувати активні центри (групи  $-OH$ ) на її поверхні. Оптимальна вологість деревини під час склеювання повинна бути в межах від 7 до 12%. Також потрібно врахувати і той фактор, що деталі, які склеюються, можуть мати різницю вологості не вище за 3-5% [14].

Важливе значення для міцності клейових з'єднань деревини в процесі експлуатації матиме і вологість навколишнього середовища. Це пов'язано з тим, що деревина – це гігроскопічний матеріал, який адсорбує вологість з атмосферного повітря або поглинає вологу при її довготривалій дії. Із збільшенням вологості повітря збільшується рівноважна вологість деревини. Виходячи з цього, міцність клейового з'єднання, в залежності від класу довговічності клею буде змінюватися по різному. Зокрема при використанні термореактивних клеїв міцність знижується у 2-3 рази, а при використанні термопластичних клеїв міцність може знижуватися, а за певних умов експлуатації і зростати. Таку поведінку клейового з'єднання можна пояснити релаксаційно-деформаційними процесами, що будуть відбуватися у клейових з'єднаннях деревини під дією вологи [24, 41].

Пружно-деформаційні процеси деревини під дією динамічних, статичних або атмосферних навантажень, можна описати за допомогою реологічних моделей або рівнянь: за допомогою моделі Ньютонівської рідини, закону Гука, моделі тіла Максвелла, моделі Кельвіна (Фогта), моделі тіла Бюргера або рівняннями A. Martenssona, S. Svenssona, S.Panga [50].

Підсумовуючи слід зазначити, що фізичні, механічні та хімічні властивості деревини матимуть значний вплив на міцність клейових з'єднань як в процесі його формування, так і під час експлуатації готових конструкцій.

### 1.3 Характеристика та властивості термічно модифікованої деревини

Ще в давнину людство звернуло увагу на зміну властивостей деревини під дією високих температур. Дерев'яні загороджувальні споруди та оборонні фортеці в Київській Русі обпалювали, продовжуючи цим термін їх служби. У процесі розвитку науки формується термін «модифікація деревини», це ряд технологічних операцій, які направлені на зміну властивостей деревини. Модифікація буває: хімічна, термічна, ферментна, механічна тощо. Більшість цих методів модифікації деревини мають однаковий вплив на деревину і призводять до зміни хімічних зв'язків у деревині, зниження показника змочування, закупорювання пор деревини, термічне руйнування ОН-груп у структурних елементах деревини тощо [66, 87, 93, 114].

Тривалий час найбільш поширеною була хімічна модифікація деревини [72, 94, 123, 124, 125, 157]. Проте на початку 2004 року у країнах Євросоюзу була введена заборона на використання хімічно модифікованої деревини через високий вміст шкідливих хімічних компонентів. Саме у цей час активного розвитку набула технологія термічного модифікування. Даний метод у наш час, є найперспективнішим, оскільки деревина після термічної обробки змінює властивості та залишається екологічно чистим матеріалом, що не завдає шкоди навколишньому середовищу як під час експлуатації, так і під час утилізації [56, 85, 127, 135].

Під термічно модифікованою деревиною мають на увазі технологічний процес, який включає обробку деревини при підвищених температурах. У результаті чого деревина отримує високу стійкість проти біологічних і грибкових ушкоджень, підвищені теплоізоляційні властивості, збільшує зносостійкість і довговічність у порівнянні з немодифікованою деревиною. [48, 75, 89, 90, 151, 144].

Перші наукові дослідження зміни властивостей деревини шляхом термічної модифікації були проведені у 30-х роках ХХ століття в Німеччині (Штамм, Хансен, Бафендам) та в 40-х – в США (Вайт, Руше та Бурместер) [141]. Згодом дослідження продовжили у науково-дослідних інститутах

Франції, Нідерландів тощо. Проте промислове виробництво термічно модифікованої деревини почалося у 1990-і роки.

В Україні дослідження термічної модифікації деревини почалися дещо пізніше. У цьому напрямку подали свої здобутки такі науковці як Й.В. Андрашек, П.А. Бехта, В.М. Максимів, О.Ю. Горбачова, Ю.М. Губер, Р.Б. Щупаківський. Їхні роботи спрямовані на дослідження зміни фізико-механічних властивостей термічно модифікованої деревини [2, 4, 15, 16, 17, 49, 60, 64, 110].

Результати вказаних вище досліджень засвідчують, що при дії на деревину температури від 180°C до 240°C в її біологічному складі відбуваються незворотні зміни, які впливають на покращення формостійкості, стійкості до високих температур, абсолютної стійкості до біологічних уражень, високої вологостійкості, однорідності кольору по всій товщині, довговічності, екологічності тощо [19, 63, 101, 102, 145].

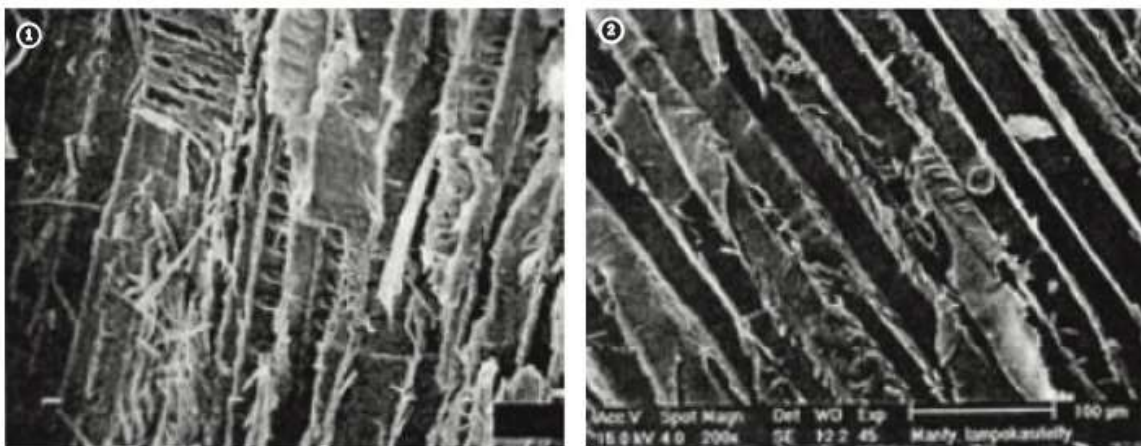
Завдяки таким унікальним властивостям термічно модифіковану деревину можна використовувати як конструкційний матеріал для зовнішніх робіт таких як: личкування фасадів будинків, віконних та дверних конструкцій, виготовлення садових меблів та терас тощо. Термічно модифіковану деревину доволі часто використовують і в середині приміщень, для виготовлення підлогового покриття, оздоблення кухонних меблів, інтер'єрів ванних кімнат і саун [100, 131, 154, 156].

Тому, термічне модифікування деревини можна охарактеризувати, як процес ціленаправленої зміни фізико-механічних властивостей деревини, шляхом її витримки за високих температур. Умовно процес термічного модифікування деревини розділяють на три основні етапи: сушіння, витримка і охолодження. На першому етапі відбувається високотемпературне сушіння, при якому вміст вологи в деревині знижується практично до нуля. Тривалість даного етапу буде залежати від початкової вологості деревини, її товщини та породи. Даний етап є найбільш тривалим.

Другий етап – це безпосередньо термічна обробка деревини, яка відбувається в герметичній камері за температури від 180°C до 240°C. Температура термічного модифікування деревини залежатиме від призначення продукції. При досягненні необхідної температури, етап термічної обробки деревини триває, як правило, не більше двох годин. Для уникнення самозаймання деревини в процесі термічного оброблення, використовують інертне середовище ( інертні гази, перегріта пара, рослинні олії тощо) [70].

Завершальним етапом термообробки деревини є охолодження. На даному етапі температура в камері знижується, а для досягнення експлуатаційної вологості проводять процес зволоження. В залежності від температури і породи деревини даний етап триває не більше 20 годин.

У результаті термічної обробки відбуваються незворотні хімічні зміни у структурі деревини, які залежать від часу і температури оброблення [116, 118, 120]. На рис.2 показано відмінності у структурі необробленої і термічно модифікованої деревини сосни.



а)

б)

Рис. 1.3. Структура деревини:

а) необроблена, б) термічно модифікована

При температурі оброблення від 20°C до 150°C відбувається процес сушіння деревини, в результаті якого випаровується вільна і зв'язана волога. За температури обробки від 180°C до 250°C в деревині відбуваються

незворотні хімічні перетворення, а при температурах, вищих за 250°C, з деревини виділяється CO<sub>2</sub> та інші продукти піролізу [18].

Перший компонент при обробці підвищеними температурами, який зазнає змін – це геміцелюлоза. Із збільшенням часу витримки і температури обробки розкладання геміцелюлози посилюється. При досягненні температури 130°C відбувається деградація геміцелюлози шляхом деацетилювання та вивільнення оцтової кислоти. А із підвищенням температури обробки оцтова кислота виступає каталізатором, в результаті чого утворюється фурфурол та інші альдегіди. Хімічні формули можливого розкладу геміцелюлози наведені на рисунку 1.4. [86].

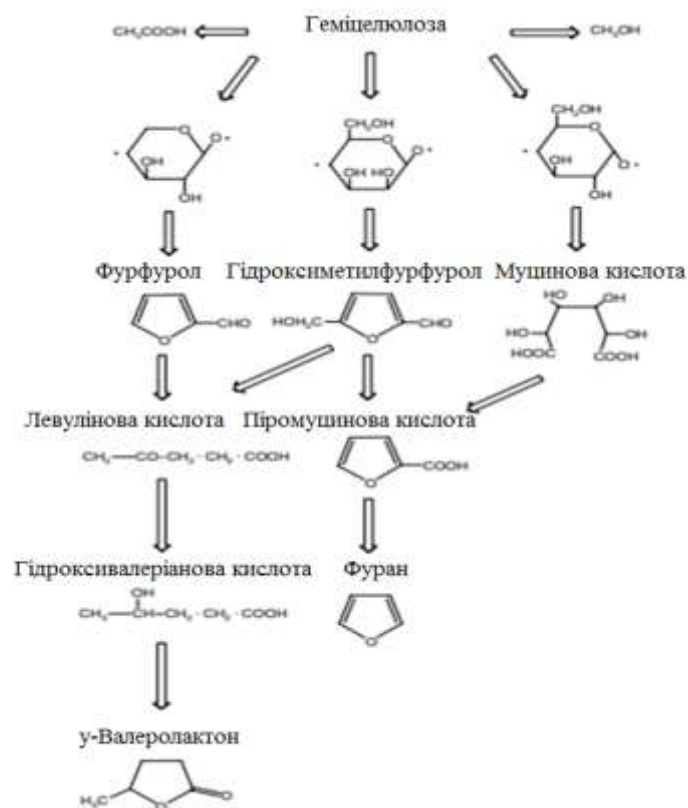


Рис. 1.4. Хімічні формули розкладу геміцелюлози.

Фурфурол – це продукт, який утворюється за рахунок розпаду пентоз і гексоз. За температури 230°C і вище в деревині зменшується кількість ксилози і манози, а галактоза і арабіноза зникають. Повне розкладання геміцелюлози відбувається за температури від 200°C до 260°C. Варто зазначити, що саме геміцелюлоза є найбільш чутливою до грибкових

уражень. Тому, завдяки низькому вмісту геміцелюлози термічно модифікована деревина набуває підвищеної біологічної стійкості. А до покращення формостійкості термічно модифікованої деревини призводить зменшення гідроксильних груп у процесі розкладу геміцелюлози [73, 143].

Целюлоза – це другий з основних компонентів клітинної стінки, який піддається незначному руйнуванню за температури обробки до 240°C. Оскільки целюлоза є більш стійкою в порівнянні з геміцелюлозою, то вплив температури на неї буде меншим. Цілком ймовірно, що це пов'язано з її кристалічною будовою. Ступінь полімеризації целюлози знижується за температури обробки 240°C. Це спричинено тим, що оцтова кислота деполімеризує мікрофібрили целюлози на аморфних ділянках.

При тривалому нагріванні деревини відбувається розрив полімерних ланцюгів, що призводить до зростання ступеня кристалічності целюлози. В результаті цього, покращуються рівноважна вологість і стабільність розмірів термічно модифікованої деревини [82, 134].

Лігнін – аморфний полімер, найбільш стійкий до дії підвищених температур компонент клітинної стінки. За температури до 200°C відбувається збільшення вільних радикалів. Це призводить до з'єднання ароматичних кілець, тобто перехресного зшивання лігнінової сітки. Втрата полісахаридних матеріалів в процесі нагрівання призводить до збільшення вмісту лігніну. Оскільки вміст лігніну в термічно модифікованій деревині не зменшується, то деревина не втрачає своєї міцності, а за температури вище 200°C його кількість помітно зростає. Лігнін у листяних породах деревини зазнає більших змін у процесі термічного модифікування, ніж лігнін у хвойних породах деревини. Це відбувається через розрив аліфатичних бічних ланцюгів [144, 152].

Лігнін порівняно з геміцелюлозою і целюлозою є більш стійким, тому зміни у його складі стають помітними при більш високих температурах. Це було описано такими науковцями J. Bourgois і D. Dirol, які дослідили, що зі збільшенням часу обробки, вміст лігніну у термічно модифікованій деревині

підвищується. Це відбувається за рахунок поліконденсації лігніну з іншими компонентами клітинної стінки та подальшим його зшиванням [67, 82].

Окрім цих основних компонентів, деревина в залежності від породи має у своєму складі різного роду екстрактивні речовини, які під дією високих температур зникають або ж розкладаються на нові сполуки [67].

Після термічного модифікування у деревині покращуються такі властивості як міцність на стиск, міцність на згин вздовж волокон, модуль пружності, твердість тощо. Водночас дещо знижуються міцність на розтяг вздовж і поперек волокон, міцність на зсув і ударостійкість [62, 113, 132, 155].

За результатами досліджень D. Mayes і O. Oksanen встановлено, що після термічного модифікування деревини показник теплопровідності зменшується на 20-25%. Це дозволяє використовувати термічно модифіковану деревину при виготовленні дверей, вікон, личкуванні фасадів тощо [111].

У роботі [49] автори досліджували зміну щільності деревини дуба під час термічного модифікування за температури 180°C, 200°C і 220°C. Результати досліджень показали, що підвищення температури модифікування призводить до зменшення щільності деревини. Варто зауважити, що дія температури має різний вплив на ранню і пізню зону деревини. Стійкість трахеїд у пізній зоні є значно вищою порівняно з ранньою зоною. Тому руйнації, які відбуваються у клітинній стінці ранньої зони за дії високих температур є більш значущими. При температурі модифікування 180°C щільність ранньої деревини знижується на 12,3%, а пізньої – на 4,3%. А при температурі модифікування до 220°C щільність ранньої і пізньої деревини знизилась на 20,6% і 12,7% відповідно. Така поведінка ранньої і пізньої зони деревини зумовлена анатомічною структурою клітинної стінки.

Автори у своїх дослідженнях [150] вивчали вплив температури термічного модифікування на хімічний склад деревини ясеня звичайного.

Модифікування відбувалось за різних температур і тривалості обробки. Результати досліджень показали, що за тривалості обробки 12 годин і температури 180°C, деревина втратила близько 6% своєї маси, а за температури 200°C – 17%. Також ці автори досліджували зміну вмісту лігніну в деревині за різних температур термічного оброблення. Дослідження показали, що кількість лігніну у термічно модифікованій деревині ясена за температури оброблення 180°C складав 24%, а за температури 200°C – 30%. Збільшення вмісту лігніну у деревині ясена є наслідком реакції конденсації лігніну або перехресного зшивання макромолекул.

Термічна стабільність деревини залежить від породи та її хімічного складу. Листяні породи є менш термічно стабільними відносно хвойних. Це можна пояснити тим, що у листяних породах деревини переважає вміст пентозанів, тоді як у хвойних – гексозанів. Крім того, хвойні породи деревини мають менше ацетильних груп, які призводять до утворення оцтової кислоти, що в подальшому виступає каталізатором хімічних реакцій під час термічного модифікування [95, 133].

У роботі [153] автори вивчали довговічність і ефективність використання термічно модифікованої деревини сосни для зовнішнього застосування. Дослідження відбувалися за певних умов випробування. А саме: одна партія зразків була закріплена на фасаді будинку вище рівня землі, а інша – мала контакт з ґрунтом. Після п'яти років досліджень встановлено, що довговічність термічно модифікованої деревини сосни значно зменшується при контакті з ґрунтом. Тому таку деревину рекомендовано використовувати у конструкціях, які не мають контакту з ґрунтом. Разом з тим, варто пам'ятати, що при дії сонячного випромінювання, зокрема ультрафіолету, термічно модифікована деревина змінює колір. Тому її необхідно опоряджувати. Для цього рекомендують використовувати опоряджувальні матеріали, наприклад, олії.

У своїх дослідженнях Горбачова О.Ю. і Мазурчук С.М. вивчали можливість застосування олій для захисту поверхні термічно модифікованої

деревини, яка експлуатується у природніх умовах. Результати досліджень показали, що оброблення поверхні термічно модифікованої деревини олією покращило стійкість кольору на 20%. Отже опоряджена термічно модифікована деревина підвищує стійкість зовнішньої поверхні в умовах навколишнього середовища [15].

Термічно модифіковану деревину, відповідно до європейських стандартів поділяють на три класи.

Клас 1. Термічне модифікування деревини відбувається за температури 170 – 180°C. За такої температури значних змін у фізичних властивостях деревини не відбувається. Сфера застосування такої термічно модифікованої деревини аналогічна до необробленої.

Клас 2. Термічне модифікування деревини відбувається за температури від 180°C до 200°C. Після чого у 3-4 рази підвищується стійкість деревини до гниття та атмосферних впливів. Разом з тим дещо знижуються такі показники, як гнучкість та статична міцність. Тому таку деревину рекомендують використовувати для виготовлення садово-паркових конструкцій, підлоги, меблів для дому і саду, вікон, дверей тощо.

Клас 3. Термічне модифікування відбувається за температури, вище 220 °C. В результаті такої обробки деревини покращується її стійкість до вологопоглинання та біологічних уражень. Основним призначенням її є використання для виготовлення терас у прибережних зонах, облаштування території біля басейнів, саун тощо.

Щодо порід деревини, які використовуються для термічного модифікування, то їх можна розділити на дві групи: перша – термічно модифікована деревина, виготовлена зі швидкоростучих порід (тополя, береза, осика); друга – термодеревина виготовлена з цінних порід (ясен, дуб, бук). Якщо перша група передбачає надання швидкоростучим породам високих експлуатаційних якостей, що наближають їх до цінних порід, то друга – це продукція високої цінової категорії, де на перше місце виходить ексклюзивність матеріалу [48].

Підсумовуючи, варто зазначити, що в процесі термічного модифікування змінюється хімічний склад деревини, фізичні та механічні властивості, що позитивно впливає на експлуатаційні характеристики виробів при їх експлуатації. Разом з тим, термічне модифікування деревини призводить до зниження адгезійних властивостей та погіршує якість склеювання.

#### **1.4 Клеї для склеювання деревини та їх характеристика**

Жодне деревообробне підприємство сьогодні не обходиться без процесу склеювання. Склеєну деревину використовують при виробництві меблевих і столярних виробів, клеєного бруса, паркетної дошки тощо. Такі країни як Німеччина, Франція, Фінляндія, Швейцарія, Австрія, Росія, Україна, США масово використовують клеєну деревину. Основні вимоги до склеєної деревини – це забезпечення відповідної міцності та довговічності в процесі експлуатації. Ці показники є взаємопов'язаними і залежать від багатьох чинників [8, 45, 46].

Клей – це органічні або неорганічні речовини, або їх суміш природного походження, які володіють специфічними властивостями, та за певних умов, утворюють міцні з'єднання, які повинні забезпечувати належну міцність готовим виробам [55].

Промислове виробництво синтетичних клеїв розпочалось у 50-х роках минулого століття. До складу синтетичних клеїв входить основа, розчинники, наповнювачі, каталізатори, пластифікатори, затверджувачі тощо. Першими синтетичними клеями були феноло-формальдегідні, які у 1907 році запатентував англійський хімік Бакеленд [47, 84, 117].

З розвитком науки і появи широкого асортименту клейових матеріалів виникла необхідність їх класифікації за певними ознаками. Загальну класифікацію клеїв багато науковців запропонували здійснювати, у вигляді різних схем, що побудовані за однаковими ознаками. У даній дисертаційні

роботі використано класифікацію, запропоновану Б.Я Кшивецьким, яка наведена на рис.1.5.



Рис. 1.5. Класифікація клеїв для склеювання деревини

Властивості клеїв залежать від компонентів, які їх наповнюють. Від властивостей клею та технологічних параметрів склеювання залежить міцність клейових з'єднань. Універсального клею, який би склеював різні поверхні і при цьому зміг забезпечити всі необхідні вимоги, немає. Проте

існує велике різноманіття клеїв, які здатні забезпечити окремі вимоги деревообробних виробництв. Загалом клеї повинні відповідати таким вимогам: експлуатаційним (створення міцного та довговічного клейового з'єднання), технологічним (життєздатність клеїв і простота у використанні), екологічним (містити мінімальний вміст токсичних хімічних речовин), економічним (мінімальні затрати на виготовлення клею) [146].

За відношенням до температури клеї поділяють на дві великі групи, терморективні та термопластичні. Терморективні клеї в наслідок реакції зшивання утворюють жорсткий і крихкий клейовий шар, швидко тверднуть, порівняно недорого, витримують змінні температурно-вологісні навантаження. Вони здатні забезпечити клейові з'єднання належною водо-, волого- і теплостійкістю. До даної групи клеїв крім фенолоформальдегідних належать: меламіноформальдегідні, карбамідоформальдегідні, резорциноформальдегідні, епоксидні, поліуретанові тощо. Вище перераховані клеї використовуються при виготовленні виробів або конструкцій, які будуть експлуатуватися в атмосферних умовах із змінними температурно-вологісними навантаженнями [108].

До дев'яностих років ХХ століття для склеювання деревини в більшості використовували терморективні клейові матеріали. Проте, через високий відсоток водопоглинання, виникнення внутрішніх напружень, токсичність, частка їхнього використання в останні роки на деревообробних виробництвах зменшується [83]. Також світові екологічні проблеми спонукають людство до меншого використання токсичних клейових матеріалів, що дає перспективи використовувати екологічно безпечні термопластичні клеї [9].

Термопластичні клеї – це речовини, які здатні багаторазово переходити у рідкий стан при нагріванні і затвердівати при охолодженні. До них належать такі клеї, як полівінілацетатні, полістирольні, поліетиленові, поліамідні тощо. Ці клейові матеріали формують еластичний клейовий шов, є екологічно безпечними, мають добру адгезію до деревини, утворюють лінійну або рідкосітчасту структуру клейового шва [115]. Серед найбільш

розповсюджених термопластичних клеїв є композиції на основі полівінілацетатної дисперсії. Вперше їх отримали у 1915 році, а у 1944 році в США розпочалось їх промислове використання.

Полівінілацетатна дисперсія – це молочно-біла, сметаноподібна рідина із слабким запахом оцтової кислоти, яка містить 50-60% сухих речовин. Отримують дисперсію у вигляді суспензії кулястих твердих глобул полімеру у воді, при нагріванні за температури 65-90°C. Основними компонентами даної дисперсії є полівінілацетат та полівініловий спирт.

Відповідно до стандарту ДСТУ EN 204:2014 клейові з'єднання на основі полівінілацетатних клеїв в залежності від класу довговічності і експлуатаційних характеристик поділяють на чотири класи D1, D2, D3, D4. Із збільшення числового значення збільшується клас навантаження, які можуть витримувати клейові з'єднання. Зокрема, клейові з'єднання із класом довговічності D1-D2 утворюють лінійну структуру клейового шва і мають невисоку волого- і водостійкість. Такі з'єднання експлуатуються всередині приміщень і можуть піддаватися короткочасному впливу води і високої вологи повітря. А клейові з'єднання із класом довговічності D3-D4 утворюють рідкосітчасту структуру клейового шва і мають підвищену волого- і водостійкість. З'єднання із класом довговічності D3 можуть експлуатуватися всередині приміщень і піддаватися короткотривалому впливу води і високої вологи повітря. А з'єднання із класом довговічності D4 можуть експлуатуватися як всередині приміщень, так і зовні, при цьому витримують довготривалий вплив води і високої вологи повітря.

До переваг ПВА клеїв відносять: хорошу адгезію до деревини і деревинних матеріалів, стійкість до динамічних навантажень, високу життєздатність, нетоксичність тощо. Недоліками даних клеїв є повзучість при статичних навантаженнях. Саме цей показник обмежує використання полівінілацетатних клеїв в несучих конструкціях, адже там є постійні статичні навантаження [5, 6, 7, 38, 44].

Підсумовуючи вищесказане, можна зробити висновок, що для склеювання деревини використовують термореактивні та термопластичні клеї, які забезпечують клейовим з'єднанням відповідні експлуатаційні властивості. Термореактивні клеї можуть забезпечити належну адгезійну і когезійну міцність, але мають високий відсоток вологопоглинання, формують крихкий клейовий шар та є токсичними. Саме це зменшує сферу їх застосування для склеювання деревини та деревинних матеріалів. Термопластичні полівінілацетатні клеї мають хорошу адгезію до деревини та деревинних матеріалів, формують еластичне клейове з'єднання з підвищеною водо- та волого-стійкістю клейового шва та є екологічно безпечними. Саме за рахунок таких властивостей термопластичні полівінілацетатні клеї є перспективними для склеювання деревини та деревинних матеріалів.

### **1.5 Щодо прогнозування міцності клейових з'єднань**

Як зазначалося вище, міцність клейових з'єднань деревини має важливе значення як для готових конструкцій, так і виробів на її основі. Для забезпечення належної міцності клейовим з'єднанням з деревини, необхідно дотримуватись технологічних параметрів процесу склеювання, належної підготовки деревини до склеювання, правильним вибором клейових матеріалів та забезпечити належні умови експлуатації. Нами здійснено аналіз міцності клейових з'єднань деревини, вплив її поверхні на формування клейового з'єднання та вплив різних факторів на зміну міцності клейових з'єднань під час експлуатації тощо.

У даному розділі проаналізуємо міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини з немодифікованою деревиною, та методи і методики, які існують у наш час для прогнозування міцності таких з'єднань. Необхідно зазначити, що при склеюванні термічно модифікованої деревини виникають певні проблеми із підбором клейових матеріалів, оскільки клеї, які використовують для склеювання немодифікованої деревини не завжди

можна використовувати для склеювання термічно модифікованої деревини. Це пов'язано із структурними змінами у деревині, які проходять після її обробки високими температурами (див розд. 1.3.). Окрім того, прогнозуванню міцності клейових з'єднань деревини присвячено не так багато наукових досліджень, а для прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини, таких досліджень практично немає. Тому дана проблема, є актуальною і, потребує вирішення [19,48].

Основною проблемою сьогодні для клейових з'єднань термічно модифікованої деревини є формування адгезійної міцності, яка повинна бути не нижчою ніж когезійна міцність деревини після термічної обробки. Наявні дослідження показали, що із асортименту клеїв, які використовуються для склеювання деревини немає клейової композиції, яка б забезпечила належну міцність клейовим з'єднанням при склеюванні термічно модифікованої деревини [45].

Окрім того, для клейових з'єднань термічно модифікованої деревини, важливим є прогнозування його міцності. Тобто, передбачення вихідної міцності через певний проміжок часу, за дії на клейове з'єднання змінних температурно-вологісних навантажень. Це дасть можливість вирішити важливу проблему, пов'язану із експлуатацією готових виробів.

Слід зазначити, що прогнозування міцності клейових з'єднань деревини, а особливо термічно модифікованої, є надзвичайно складною задачею, розв'язання якої вимагає як теоретичних і практичних досліджень, так і використання методів математичного та імітаційного моделювання. Це пов'язано із великою кількістю факторів, які будуть впливати на зміну міцності клейових з'єднань. Врахувати всі фактори впливу на клейове з'єднання під час експлуатації практично неможливо без використання сучасних методів та методик досліджень, які включають і комп'ютерне забезпечення.

Сьогодні існують наукові напрацювання щодо прогнозування міцності клейових з'єднань немодифікованої деревини. Але вони в основному

базуються на застарілих методиках, які є недостатньо достовірними, тривалими у часі, що не завжди дає отримати потрібні результати досліджень вчасно. А щодо прогнозування міцності для клейових з'єднань термічно модифікованої деревини, то у цьому напрямку практичних та теоретичних досліджень майже не проводилось. Тому важливо проаналізувати наявні, методи і методики прогнозування міцності клейових з'єднань деревини.

Прогнозування міцності клейових з'єднань деревини досліджують двома методами, а саме тривалим (природним) і пришвидшеним (лабораторним) [20, 23].

Тривалий метод експериментальних досліджень міцності клейових з'єднань деревини відомий давно, практично з появою клейових матеріалів. Спочатку цей метод був досить простий, але вимагав тривалого часу для проведення досліджень. З часом він вдосконалювався. На сьогодні даний метод проводиться у природних умовах за дії атмосферних факторів. Він враховує регіональну зміну природних умов і проводиться на відкритому повітрі. Дослідження можуть тривати від одного тижня до декількох років. Цей метод дає змогу оцінити зміну міцності клейових з'єднань деревини за дії атмосферних факторів (зміни вологи, температури, дії сонячного опромінення, озону тощо) природних умовах. Він є більш достовірним, хоча трудомістким і тривалим. Результати, отримані за тривалим методом дослідження, дають можливість оцінити зміну міцності клейових з'єднань деревини, враховуючи реальний вплив природних факторів, а саме: за кількістю тріщин на границі деревина-клейовий шов, математичними розрахунками щодо старіння деревини та клейового шва, розшаруваннями між склеєною деревиною (для фанери) тощо [23, 47].

Для зменшення тривалості досліджень і детального вивчення впливу вологості і температури на міцність клейових з'єднань деревини використовують пришвидшений метод. Цей метод досліджень дає змогу скоротити тривалість експериментальних досліджень і детальніше вивчити вплив окремих факторів (температури, вологи, тощо) на клейові з'єднання.

Даний метод ґрунтується на зміні релаксаційних і пружно-деформаційних процесів у клейовому з'єднанні при екстремальних умовах випробувань, таких як кип'ятіння, заморожування, дії різного роду хімічних речовин, різкої зміни температурно-вологісного навантаження тощо.

На основі даних методів досліджень розроблені методики прогнозування міцності клейових з'єднань деревини, що враховують дію вологи, температури, фізичні навантаження тощо.

Методи та методики прогнозування міцності клейових з'єднань деревини наведено на рис. 1.6 [47].

Дані методи і методики досліджень використовуються для прогнозування міцності клейових з'єднань немодифікованої деревини, фанери тощо.

Щодо прогнозування міцності клейових з'єднань для термічно модифікованої деревини, то використовуються пришвидшені та тривалі методи досліджень та методики, які розроблені на їх основі.

Використання тривалих та пришвидшених методів і методик досліджень не завжди є раціональним, оскільки вони є тривалими у часі, матеріало-затратні, вимагають відповідного технологічного обладнання тощо. Їх використання є обмеженим, оскільки стрімко збільшується асортимент клейових матеріалів та результати досліджень міцності повинні бути обмежені у часі. Тому дослідники ведуть пошуки більш сучасних методів та раціональних методик досліджень прогнозування міцності клейових з'єднань деревини.

Перспективними для прогнозування міцності клейових з'єднань деревини є методи, які базуються на математичному та імітаційному моделюванні [47]. Дані методи не потребують затрат часу на їх проведення, значних матеріальних затрат, а результати досліджень є більш достовірними. Окрім того, при прогнозуванні міцності клейових з'єднань можна враховувати значно більшу кількість факторів, що впливають на зміну міцності, а саме: породу деревини, характеристику клею, вологість деревини

та навколишнього середовища, температуру навколишнього середовища, режимні параметри склеювання тощо. Разом з тим, дані методи прогнозування міцності клейових з'єднань деревини потребують відповідного програмного та комп'ютерного забезпечення.

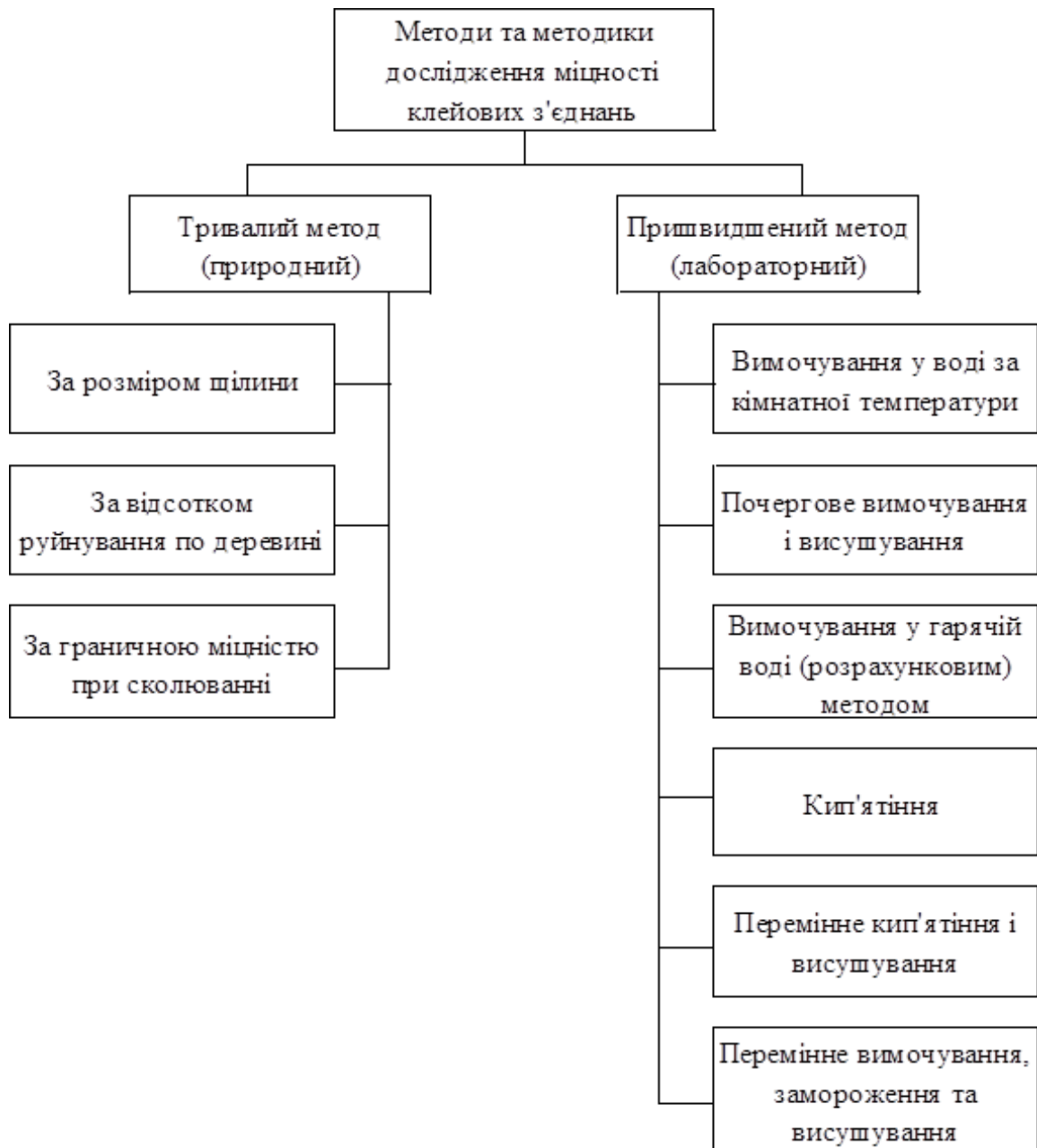


Рис. 1.6. Методи та методики дослідження зміни міцності клейових з'єднань деревини

Щодо прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини, то окремо пропонованих методів та методик

сьогодні немає. Тому для прогнозування міцності таких клейових з'єднань деревини використовують наявні методи та методики прогнозування міцності.

### **1.6 Висновки, мета та завдання дослідження**

На основі аналізу наукової літератури та джерел зроблено наступні висновки:

1. Склеювання є одним із найпоширеніших видів з'єднання деревини та деревинних матеріалів, що широко використовується при виготовленні виробів. Міцність такого з'єднання забезпечується адгезією до деревини та когезією між компонентами клею. Актуальним на сьогоднішній день є виготовлення деревинних клейових конструкцій на основі термічно модифікованої та немодифікованої деревини. Основною проблемою при виготовленні таких конструкцій є забезпечення належної міцності клейовим з'єднанням через незворотні хімічні зміни під час оброблення деревини високими температурами.

2. Деревина – це один із основних конструкційних матеріалів, що наділений певними фізичними, механічними і хімічними властивостями та широко використовується для склеювання. Найбільш вагомий вплив на міцність клейових з'єднань деревини має щільність, пористість, комбінація пізньої та ранньої зони та вологість, які можуть змінюватися, як під час механічної обробки, так і під час термічного модифікування.

3. Серед існуючих методів модифікування деревини найбільш перспективним є метод термічного модифікування деревини, який є екологічно безпечним, але за дії підвищених температур змінює хімічний склад деревини, а саме призводить до утворення фурфуролу на поверхні деревини, зменшує щільність деревини тощо. Це негативно впливає на адгезію клею до поверхні деревини та знижує міцність клейового з'єднання.

4. Для склеювання деревини використовують великий асортимент клеїв, які класифікуються за певними ознаками. Відповідно до класифікації для

склеювання деревини використовують термореактивні і термопластичні клеї, які забезпечують клейовим з'єднанням технологічні та експлуатаційні вимоги. Перспективними для склеювання є термопластичні клеї, які мають хороші адгезійні властивості до деревини і деревинних матеріалів, екологічно безпечні та забезпечують належні умови експлуатації для виробів.

5. Для клейових конструкцій, що експлуатуються, важливим є забезпечення належної міцності та довговічності. Досягнути цього можна за допомогою прогнозування, яке здійснюється за результатами пришвидшених (лабораторних) і тривалих (природних) методів. Дані методи прогнозування вимагають значних матеріальних затрат та тривалі у часі. Тому перспективним методом прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня та сосни немодифікованої є метод математичного та імітаційного моделювання.

На основі аналізу літератури сформована мета роботи.

Метою дисертаційної роботи є прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, склеєної полівінілацетатними клеями, за допомогою математичної моделі на основі тривалих експериментальних досліджень.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

1. Проаналізувати і підібрати методику дослідження міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, склеєної ПВА клеями.

2. Провести тривалі та пришвидшені експериментальні дослідження міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, склеєної ПВА клеями.

3. Здійснити статистичну обробку результатів експериментальних досліджень, побудувати графічні залежності зміни міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, склеєної ПВА клеями залежно від змінних температурно-вологісних навантажень.

4. Запропонувати математичну модель для прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і немодифікованої деревини сосни, склеєної ПВА клеями та здійснити аналіз отриманих результатів.

5. Розробити практичні рекомендації для використання отриманих результатів досліджень.

6. Розрахувати економічну ефективність від запропонованих рекомендацій.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ КЛЕЙОВИХ З'ЄДНАНЬ ТЕРМІЧНО МОДИФІКОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ ЯСЕНА ТА СОСНИ НЕМОДИФІКОВАНОЇ

#### 2.1 Теоретичні передбачення формування клейових з'єднань

Як зазначалось у розд. 1, використання клейових деревинних конструкцій із термічно-модифікованої і немодифікованої деревини є актуальним, оскільки зовнішня ламель із термічно модифікованої деревини, дозволяє підвищити їх довговічність при експлуатації у змінних температурно-вологісних умовах. Разом з тим, виникає проблема щодо отримання якісного клейового з'єднання між термічно модифікованою та немодифікованою деревиною, яке би забезпечило належну адгезійну і когезійну міцність як після їх виготовлення, так і під час експлуатації. Для клейових конструкцій із немодифікованої деревини є великий асортимент клеїв, які здатні забезпечити для них належну адгезійну і когезійну міцність під час експлуатації у знакозмінних температурно вологісних умовах експлуатації [44, 48].

Щодо забезпечення належної адгезійної і когезійної міцності для клейових з'єднань з термічно модифікованою деревиною ясена та сосни немодифікованої, то існують певні проблеми, які викликані незначним асортиментом клейових матеріалів, що здатні забезпечити належну адгезійну міцність до термічно модифікованої деревини.

Існують окремі дослідження щодо склеювання термічно модифікованої деревини між собою за допомогою поліуретанових, карбамідоформальдегідних та полівінілацетатних клеїв тощо. Щодо клейових конструкцій, в яких є поєднання термічно модифікована і немодифікована деревина, то вони вивчались частково [61, 74, 97, 142, 147].

Проблеми у склеюванні клейових конструкціях з термічно модифікованої деревини ясена та сосни немодифікованої виникають через

фізико-механічні характеристики, які є неоднаковими для модифікованої і немодифікованої деревини: зокрема, підвищена температура під час модифікування деревини ясена, призводить до руйнування основних компонентів, а саме целюлози і геміцелюлози та до збільшення кількості лігніну. Окрім того, при підвищених температурах у модифікованій деревині утворюється фурфурол, який погіршує адгезійні властивості клейових матеріалів до її поверхні [76, 78].

Термопластичні полівінілацетатні клеї, одні із небагатьох, які мають добру адгезію до термічно модифікованої деревини ясена та дуже добру до немодифікованої деревини сосни. Тому можна припустити, що при формуванні такого клейового з'єднання, міцність повинна забезпечуватися на рівні когезійної міцності немодифікованої деревини сосни, яка у кількісному значенні становить в 7,5 МПа. Нашими експериментальними дослідженнями встановлено, що міцність клейового з'єднання термічно модифікованої деревини ясена і немодифікованої деревини сосни становить 7,12 МПа. Тобто, вона знаходиться на межі міцності немодифікованої деревини сосни, але не забезпечує когезійну міцність для немодифікованої деревини ясена, яка мала б становити 13,5 МПа. Таке клейове з'єднання відповідає вимогам когезійної міцності для немодифікованої деревини сосни.

Тому забезпечення якісного клейового з'єднання деревинним конструкціям із термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, які ми досліджуємо, на сьогодні є проблематичним. Це підтвердили результати наших експериментальних досліджень (див. розд. 4), відповідно до яких, зміна міцності клейових з'єднань, після досліджень зменшується по спадаючій залежності, але залишкова міцність відповідає вимогам чинного на сьогодні стандарту ДСУ EN 204:2014.

Разом з тим під час склеювання та при руйнуванні експериментальних зразків наглядно було встановлено, що адгезійна міцність полівінілацетатної клейової композиції до термічно модифікованої деревини ясена є нижчою, ніж до немодифікованої деревини ясена та сосни.

Пояснити таку поведінку термічно модифікованої деревини ясена складно без додаткових експериментальних досліджень поверхні деревини, поверхневого натягу, поверхні змочування, збільшення кількості лігніну та фурфуролу на її поверхні тощо. Окрім того, такі дослідження у плани нашої дисертаційної роботи не входили. Тому, виходячи з теорій адгезії, нами здійснено припущення щодо зменшення адгезійної міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена та сосни немодифікованої.

Щодо термічно модифікованої деревини ясена, то згідно з дослідженнями [107, 137], встановлено, що за температури вище 100 °С відбувається деструкція основних компонентів деревини, а саме целюлози і геміцелюлози. Із підвищенням температури до 200°С їх розпад буде пришвидшуватися. Разом із тим, будуть змінюватися і фізико-механічні властивості деревини ясена, зокрема зменшиться її когезійна міцність, збільшиться крихкість, підвищиться стійкість до дії зовнішніх температурно вологісних навантажень тощо. Така зміна властивостей деревини ясена обмежує її використання як конструкційного матеріалу, але збільшує можливість її використання при експлуатації у змінному вологісному та температурному середовищах. Поверхня деревини ясена до і після термічної обробки наведена на рис. 2.1.

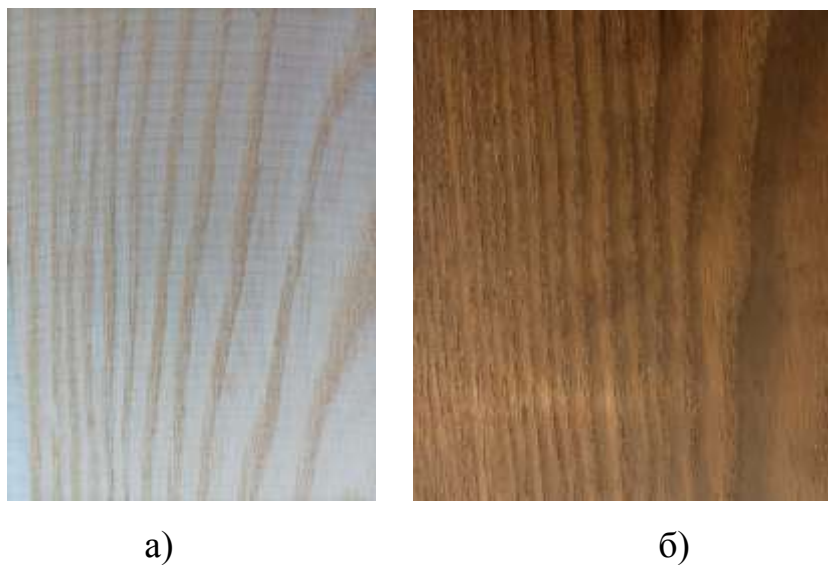
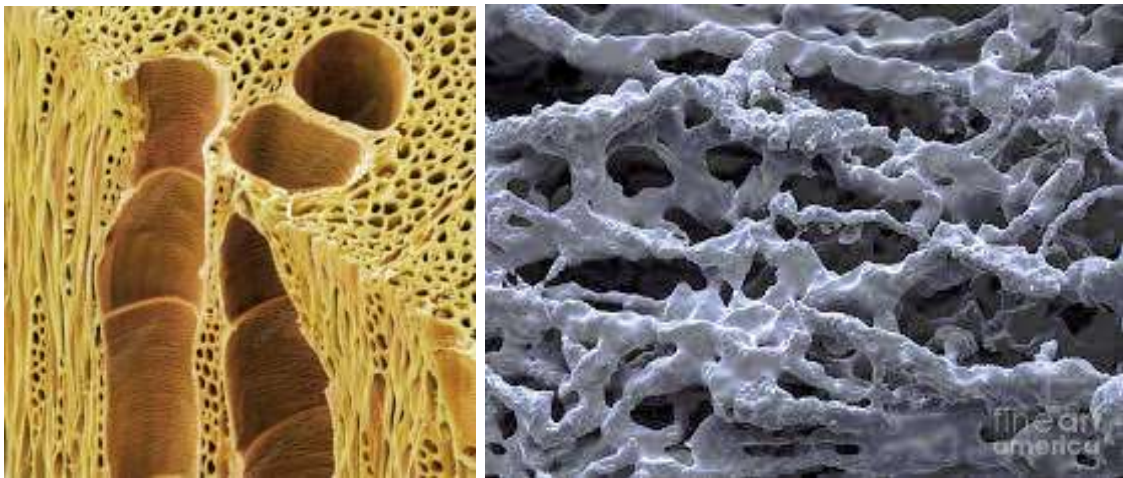


Рис. 2.1. Зовнішній вигляд поверхні деревини ясена  
а) до термічного модифікування; б) після термічного модифікування

На рис. 2.2. наведено структуру деревини ясена немодифікованого (а) і термічно модифікованого (б), отриману в збільшеному вигляді за допомогою мікроскопа.



а)

б)

Рис. 2.2. Поверхня деревини ясена отримана за допомогою мікроскопа: а) до термічного модифікування, б) після термічного модифікування

Як видно із рис. 2.1. і 2.2., поверхня деревини ясена піддається як візуальним так, і структурними змінам після обробки підвищеною температурою. Такі зміни погіршують її адгезійні властивості. Тому формування адгезійної міцності для клейових з'єднань з модифікованої деревини ясена та сосни немодифікованої важко теоретично описати, виходячи із існуючих теорій. На нашу думку, механізм формування таких клейових з'єднань можна описати механічною, дифузійною та частково хімічною теоріями.

Окрім того, враховуючи властивості деревини ясена (див. розд. 1.2.), а саме її пористість, фізичні, механічні, хімічні властивості, та склад, а саме: целюлозу, геміцелюлозу, лігнін, екстрактивні речовин, можна припустити, що все це матиме неоднозначний вплив на технологічний процес склеювання та експлуатацію клейових з'єднань.

Формування таких клейових з'єднань, на нашу думку, відбувається через потрапляння клею у пори, мікро та макронерівності деревини з

подальшим його затвердінням. Окрім того, відбуватиметься дифузійне проникнення компонентів клейової композиції у деревину.

Також потрібно враховувати стан поверхні деревини ясена після термічного модифікування, зокрема руйнування природної структури деревини, зміни у мікро і макронерівностях на поверхні деревини, утворення тангентальних тріщин у пізній зоні деревини, збільшення розмірів пор у деревині за рахунок видалення компонентів клітинної стінки тощо. Все це дає підстави вважати, що така деревина після обробки підвищеною температурою стане досить пористою, тим самим формування адгезійної міцності також має відбуватися за допомогою механічного щеплення. Разом з тим, як показали результати експериментальних досліджень (див розд 4.2), адгезійна міцність для клейових з'єднань із термічно модифікованою деревини є меншою в порівнянні із немодифікованою.

Зменшення адгезійної міцності поверхні термічно модифікованої деревини ясена, на нашу думку, відбувається через утворення значної кількості різного роду речовин під дією підвищеної температури. А саме: оцтової кислоти, фурфуролу, диметилгліоксалу, гідроксиацетону, толуолу, терпенів, особливо  $\alpha$ -пінен. Деякі із цих речовин утворюються у невеликій кількості, є леткими і не впливають на процес формування адгезійної міцності. А інші, такі як фурфурол, призводять до можливого формування дзеркальної поверхні деревини ясена. А це погіршує адгезійні властивості та призводить до зменшення дифузійної проникності клею у деревину, через фурфурол.

Фурфурол – це органічна сполука фуранового ряду ( $C_5H_4O_2$ ) із коефіцієнтом дифузії ( $D_p$ ),  $9,875 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ , яка утворюється в результаті дегідратації ксилози за температури вище  $100^\circ\text{C}$ . Окрім того, дана сполука полімеризується, діючи як термореактивний полімер. Молекулярна маса фурфуролу –  $96,082 \text{ г/моль}$ , температура кипіння ( $760 \text{ мм рт. ст.}$ ) –  $161,7^\circ\text{C}$ , а –  $36,5^\circ\text{C}$ . Питома вага –  $1,1610$ . Окрім того, фурфурол за такої температури обробки не випаровується і залишається на поверхні деревини ясена, тим

самим захищає поверхню від дії температурно-вологісного навантаження. Але одночасно робить поверхню ясена більш гладкою, тим самим погіршує адгезію поверхні до клейових матеріалів.

Щодо хімічної взаємодії між компонентами клейової композиції та деревини, то вона також, на нашу думку, можлива, хоча і незначна. Це може відбуватися між залишками целюлози і геміцелюлози, які не розклались в процесі термічного розпаду. Але кількість таких взаємодій буде незначною.

На рис 2.3. показано як впливає поверхня термічно модифікованої деревини на адгезію, розтікання клею по її поверхні та дифузійне проникнення [138, 160].

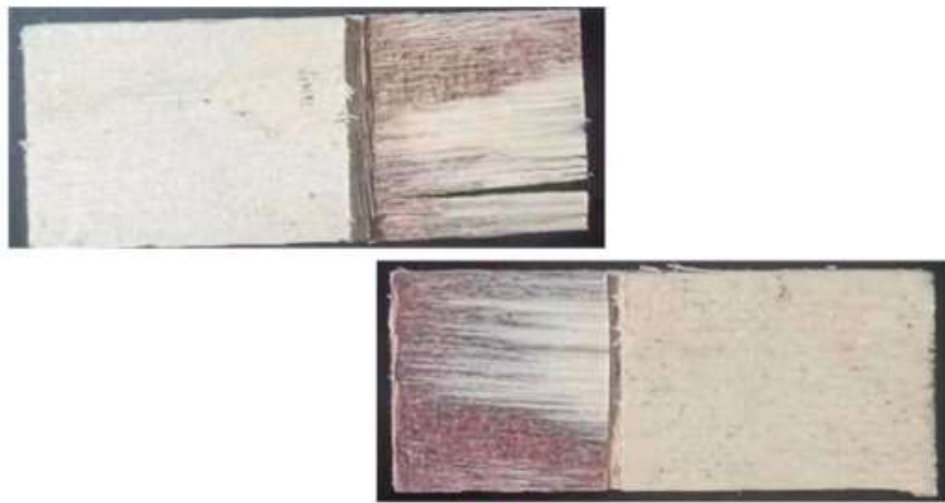


Рис. 2.3. Вплив поверхні термічно модифікованої деревини на адгезію.

Як видно із рис.2.3., поверхня термічно модифікованої деревини ясена має погане змочування, яке призводить до погіршення адгезії клею, і тим самим до зменшення адгезійної міцності.

Підсумовуючи, можна зазначити, що дія високих температур на деревину ясена призводить до розпаду целюлози та геміцелюлози, які супроводжуються утворенням фурфуролу та інших речовин на її поверхні. Це погіршує адгезійну здатність деревини до клею, що в кінцевому результаті, призводить до зменшення адгезійної міцності клейового з'єднання. Тому процес формування клейових з'єднань термічно

модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої буде відбуватися за рахунок механічного щеплення, дифузійного проникнення компонентів клейової композиції у деревину та утворення хімічної взаємодії між компонентами клейової композиції та деревини.

## **2.2 Вплив вологи та температури на зміну міцності клейових з'єднань**

Тривала дія вологи та температура навколишнього середовища на термопластичні полівінілацетатні клейові з'єднання з деревини під час експлуатації призводить до зменшення їх міцності та руйнування. Це встановлено дослідженнями багатьох науковців, які вивчали дану проблему. Не винятком є і клейові з'єднання термічно модифікованої деревини ясена та сосни немодифікованої, які склеєні термопластичними полівінілацетатними клеями. Це підтверджено результатами тривалих та пришвидшених експериментальних досліджень, які нами отримано. Тому важливо проаналізувати та вивчити вплив тривалої дії вологи та температури на такі клейові з'єднання.

Щодо впливу зазначених факторів на міцність клейових з'єднань із немодифікованої деревини різних порід, то механізми руйнування таких клейових з'єднань досліджено та описано. А саме, автори A Ralph M. Nussbaum і Research Chemist встановили вплив кип'ятіння на міцність полівінілацетатних клейових з'єднань деревини. Б. Кшивецький дослідив вплив вологи та температури на механізм формування та руйнування термопластичних полівінілацетатних клейових з'єднань деревини сосни, дуба, берези тощо [45]. Тобто, вплив вологи та температури на міцність клейових з'єднань немодифікованих порід деревини склеєних термореактивними та термопластичними клеями під час експлуатації досліджено.

Щодо впливу вологи та температури на міцність клейового з'єднання термічно модифікованої деревини, склеєної термопластичними

полівінілацетатними клеями, то дослідження у цьому напрямку ведуться. Але немає теоретичного пояснення фізичних, хімічних та пружно-деформаційних процесів, які проходять у таких клейових з'єднаннях під час дії вологи та температури. Не досліджено зміну міцності у клейових конструкціях із термічно модифікованої деревини ясена та сосни немодифікованої під час експлуатації у природніх умовах тощо. Складність дослідження таких клейових з'єднань у тому, що вони поєднують деревинні матеріали, які мають різні механічні, хімічні та фізичні властивості [140, 159].

Для деревини сосни немодифікованої механізм руйнування клейових з'єднань за дії вологи і температури під час експлуатації вивчено. Зокрема, доведено, що довготривала дія вологи на таке клейове з'єднання, призводить до зменшення його міцності і в кінцевому результаті до його руйнування. Разом з тим, недовготривала дія вологи на таке клейове з'єднання та його експлуатація при температурах, нижчих за нуль, призводять навпаки до зростання міцності. Така поведінка клейового з'єднання пояснюється утворенням водневих зв'язків як між компонентами клейової композиції, так і між компонентами клейової композиції та гідроксильними групами целюлози та геміцелюлози при попаданні додаткової вологи у з'єднання та високою стійкістю полівінілацетату до мінусових температур [46].

Для прикладу на рис.2.5 наведено можливий варіант утворення водневих зв'язків між компонентами клейової композиції та деревиною [ 47].

Щодо термічно модифікованої деревини ясена, то вплив вологи та температури на такі клейові з'єднання буде проходити дещо по-іншому, оскільки деревина ясена має меншу щільність, є більш крихкою, легшою та гідрофобною. Окрім того, фурфурол, який утворюється у термічно модифікованій деревині ясена, робить її поверхню гладкою, що призводить до збільшення крайового кута змочування клеєм та зменшує роботу адгезії [47].

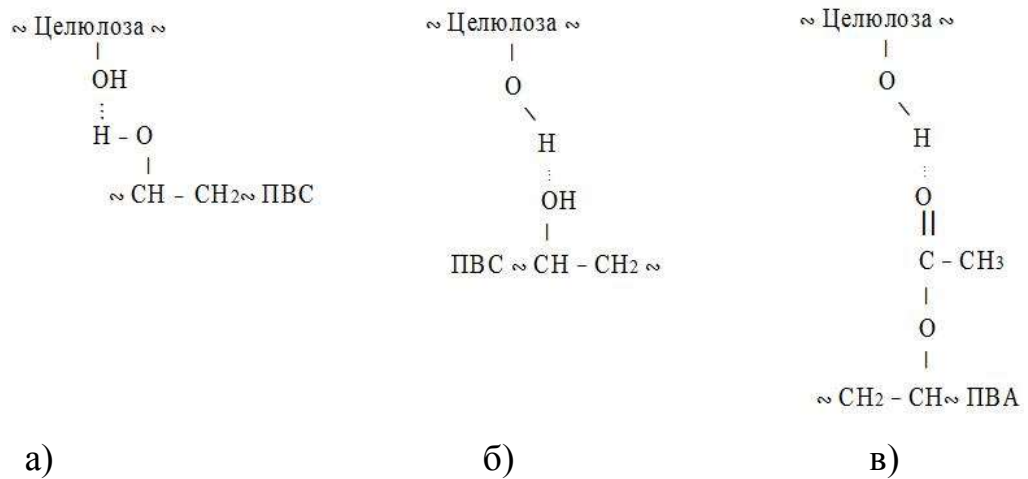


Рис. 2.5. Приклади водневих зв'язків, що можуть утворювати компоненти ПВА клейової композиції (а), (б) та деревиною (в)

Описати механізм руйнування такого клейового з'єднання під час експлуатації за наявними на даний час пружно-деформаційними процесами складно. Для прикладу, релаксаційно-деформаційні процеси для немодифікованої деревини сосни будуть відрізнятися від релаксаційно-деформаційних процесів термічно модифікованої деревини ясеня збільшенням деформаційного навантаження на таке клейове з'єднання. Також зміниться робота адгезії полівінілацетатних клеїв до такої поверхні.

На рис.2.4. наведено вплив природних факторів навколишнього середовища на зміну властивостей клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня та сосни немодифікованої під час експлуатації.



Рис. 2.4. Вплив навколишнього середовища на зміну властивостей клейових з'єднань.

Нами встановлено, що тривала експлуатація клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена та сосни немодифікованої у природних умовах протягом 24 місяців, призводить до зміни властивостей її поверхні. Ці зміни відбулися на незначній глибині деревини ясена (див. роз. 4.2).

Теоретично пояснити зміну міцності такого клейового з'єднання деревини можна тим, що термічно модифікована деревина є гідрофобною і не дає можливості попаданню вологи у клейове з'єднання. Тому така клейова конструкція повинна краще працювати у природних умовах із змінними температурно-вологісними навантаженнями. Разом з тим, поверхня термічно модифікованої деревини ясена є менш пористою, а фурфурол, який утворюється, робить її поверхню гладкою. Адгезія клейових матеріалів до такої поверхні різко зменшується. Це ускладнює процес формування якісного клейового з'єднання ще під час технологічного процесу склеювання, що у свою чергу призводить до негативного впливу вологи та температури під час експлуатації такого клейового з'єднання.

Оскільки фурфурол робить поверхню термічно модифікованої деревини гідрофобною, то попадання вологи у клейовий шов через термічно модифіковану деревину ясена є обмеженим. У клейовий шов волога може потрапляти через пори та клітини немодифікованої деревини сосни. Очевидно, що і зміна міцності для полівінілацетатних клейових конструкцій із термічно модифікованої деревини ясена і немодифікованої сосни, повинна бути менш інтенсивнішою, ніж для клейових з'єднань із немодифікованої деревини сосни та ясена, та відповідати когезійній міцності деревини сосни. Це підтверджено нашими тривалими експериментальними дослідженнями.

Щодо формування водневих зв'язків між ОН-групами та компонентами клейової композиції, а саме полівінілацетату та полівінілового спирту, то така взаємодія може відбуватися, оскільки значна частина целюлози і геміцелюлози у термічно модифікованій деревині все ж таки наявна. Єдиною перешкодою на поверхні деревини є фурфурол, який здатний блокувати процес формування водневих зв'язків між компонентами деревини та

клеєвої композиції. Ці дослідження є складними та вимагають додаткового їх вивчення, що не входило у задачі нашої дисертаційної роботи.

Підсумовуючи вплив вологи та температури навколишнього середовища на міцність клеєвих з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, необхідно зазначити, що тривала дія вологи під час експлуатації таких клеєвих з'єднань зможе більш інтенсивно проникати у клеєве з'єднання через структуру деревини сосни. Термічно модифікована деревина ясена навпаки забезпечує таким конструкціям меншу сорбційну здатність та у незначній кількості може формувати водневі зв'язки, як між компонентами клеєвої композиції, так і компонентами деревини, тим самим забезпечуючи належну міцність з'єднанню.

### **2.3 Побудова математичної моделі прогнозування міцності клеєвих з'єднань**

Прогнозувати міцність клеєвих з'єднань з деревини важливо, оскільки дає можливість наперед визначати характеристики клеєвої конструкції та зміну їх міцності під час експлуатації. У наш час для прогнозування міцності клеєвих з'єднань використовують існуючі методики, починаючи від щілин, які утворюються у клеєвому шві під час експлуатації і закінчуючи математичним та імітаційним моделюванням. Усі ці методи прогнозування міцності базуються на результатах тривалих або пришвидшених експериментальних досліджень.

Одним з найбільш поширених та перспективних методів прогнозування міцності клеєвих з'єднань деревини сьогодні є метод математичного моделювання, який враховує пружно-деформаційні процеси у клеєвому з'єднанні під час дії вологи та температури.

Для побудови математичної моделі прогнозування міцності клеєвих з'єднань термічно-модифікованої деревини ясена та сосни немодифікованої вибрано метод найменших квадратів та програмне забезпечення «MATLAB».

Дане програмне забезпечення включає пакет прикладних програм для числового аналізу та мову програмування [35, 51].

За допомогою програмного забезпечення «MATLAB» отримано математичну модель прогнозування міцності клейового з'єднання термічно модифікованої деревини ясена із деревиною сосни немодифікованої склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями. Зокрема отримано лінійну, поліноміальну та косинусоїдальну моделі прогнозування міцності.

У табл. 2.1. наведено результати тривалих експериментальних досліджень зміни міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, склеєної полівінілацетатними клеями із ступенем довговічності D4 за двадцять чотири місяці. Дані результати використано для побудови математичної моделі прогнозування міцності.

Таблиця 2.1 – Результати тривалих експериментальних досліджень міцності клейових з'єднань

Міцність зразків, МПа									
№ п/п	Контрольні	Після 3 міс.	Після 6 міс.	Після 9 міс.	Після 12 міс.	Після 15 міс.	Після 18 міс.	Після 21 міс.	Після 24 міс.
1	7.05	5.95	6.00	4.80	5.00	5.55	4.75	6.75	5.50
2	6.55	6.90	6.15	6.25	5.50	4.80	6.80	5.75	4.75
3	8.25	5.63	6.25	4.75	7.63	6.75	5.50	6.65	4.50
4	6.75	5.85	8.00	5.00	6.65	5.80	6.75	4.80	6.00
5	6.00	6.38	6.75	6.25	5.50	5.30	5.50	5.00	5.50
6	6.85	6.25	6.85	7.37	5.50	5.60	5.75	6.25	4.35
7	7.25	6.85	5.40	4.74	7.00	7.00	6.50	5.00	4.74
8	7.00	6.25	6.75	7.75	7.00	6.05	5.40	5.45	6.25
9	7.65	6.55	5.60	5.50	6.50	5.75	5.75	5.45	5.00
10	7.65	7.20	6.75	4.75	4.75	5.95	5.25	6.25	5.25
11	6.75	6.25	5.50	5.25	7.00	5.75	7.25	5.50	5.75
12	6.00	6.15	7.35	7.00	4.00	4.70	5.75	4.50	4.45
13	8.00	5.00	6.00	4.50	5.50	5.65	7.00	5.75	6.00
14	7.25	6.50	7.75	6.75	6.50	6.25	5.35	5.15	5.00
15	8.35	5.80	7.10	6.75	4.50	6.50	5.25	6.00	6.00
16	6.90	5.25	7.10	4.75	6.00	5.50	6.50	5.15	4.45
17	6.55	6.25	8.25	7.25	5.25	6.25	6.25	5.25	4.50
18	7.25	7.11	6.60	7.75	4.21	6.05	6.50	5.75	5.75
19	6.40	5.70	5.00	4.75	6.00	6.65	5.50	5.25	5.50

20	8.00	7.11	6.50	5.75	6.25	5.25	6.30	6.35	4.50
21	7.55	5.50	6.20	7.00	6.25	5.80	5.75	6.00	4.10
22	6.95	6.20	5.75	6.00	4.75	6.15	6.25	5.35	4.30
23	6.78	6.80	7.75	7.50	7.25	6.65	5.75	5.75	5.50
24	6.95	7.55	6.50	6.25	5.45	6.10	4.75	5.35	4.50
25	7.25	7.50	6.25	6.75	5.25	5.05	6.25	6.10	6.00

На рис. 2.5. наведено результати апроксимації тривалих експериментальних досліджень зміни міцності клейових з'єднань за лінійною моделлю першого порядку.

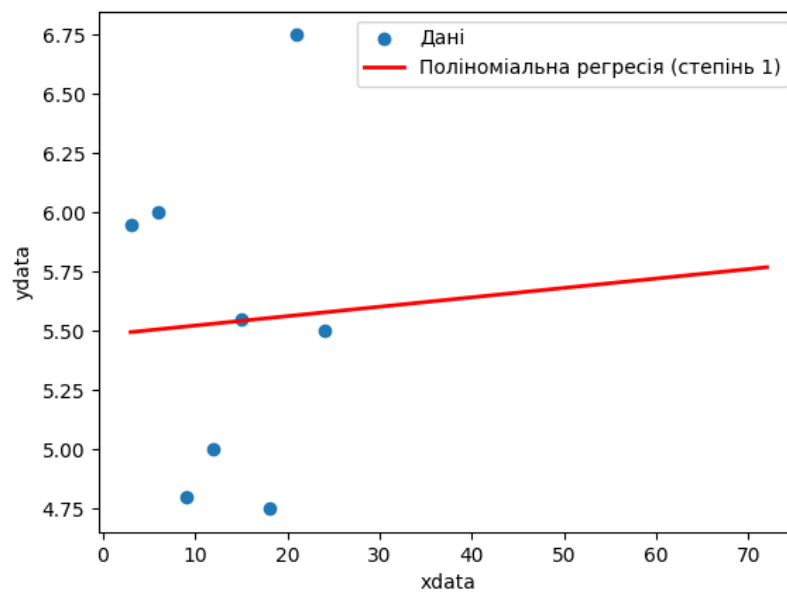


Рис. 2.5. Результати апроксимації за лінійною моделлю першого порядку

Як видно із рис 2.5., лінійною моделлю у вигляді поліному першого порядку не можна описати характер зміни міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, склеєної полівінілацетатним клеєм із ступенем довговічності D4 за результатами тривалих експериментальних досліджень. Оскільки дана модель не охоплює межі розсіювання масиву результатів досліджень.

На рис. 2.6. наведено результати апроксимації зміни міцності клейових з'єднань за поліноміальною моделлю другого порядку.

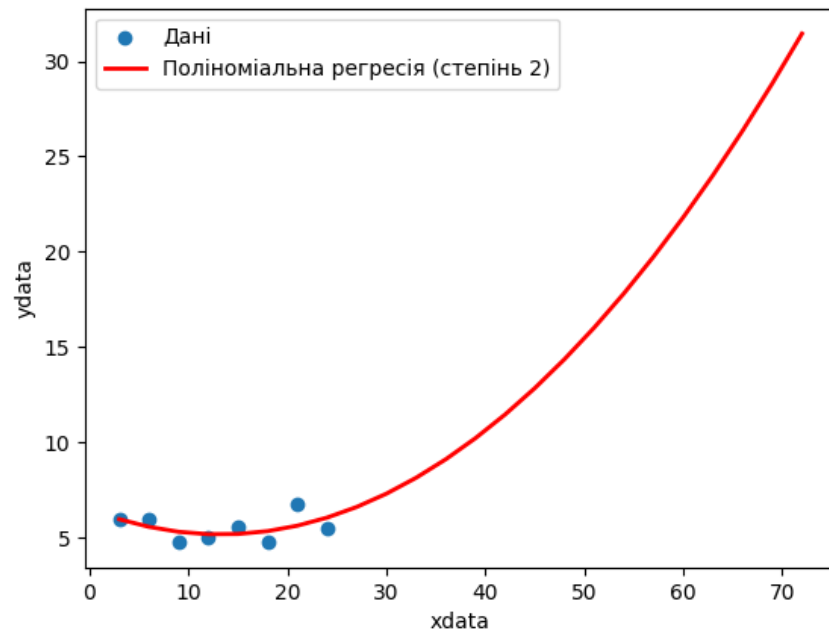


Рис. 2.6. Результати апроксимації за поліноміальною моделлю другого порядку

Аналіз графічної залежності на рис 2.6.свідчить, що дана модель у вигляді поліному другого порядку з достатньою точністю описує характер зміни міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена, склеєної із деревиною сосни немодифікованою полівінілацетатним клеєм із ступенем довговічності D4. Тому дану модель можна використовувати для математичного опису результатів досліджень зміни міцності у природних умовах за тривалим методом досліджень. Разом з тим, така модель не дає можливості прогнозувати міцність клейових з'єднань термічно-модифікованої деревини ясена, склеєної із деревиною сосни немодифікованої полівінілацетатними клеями. Окрім того, якщо взяти апроксимацію в межах від 3 до 24 місяців, то поліноміальна модель другого порядку непогано наближена до результатів дослідження. Але якщо продовжити прогноз на тривалий період, наприклад на 72 місяці, то за даною моделлю це зробити не можна.

Для прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, склеєної полівінілацетатними клеями із ступенем довговічності D4, використовуємо косинусоїдальну математичну модель у вигляді:

$$y = A * \cos(B * x) + C,$$

де: A, B, C – коефіцієнти моделі,

x – тривалість експлуатації.

На рис. 2.7. наведено результати прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня із сосною немодифікованою для першого зразка за косинусоїдальною моделлю.

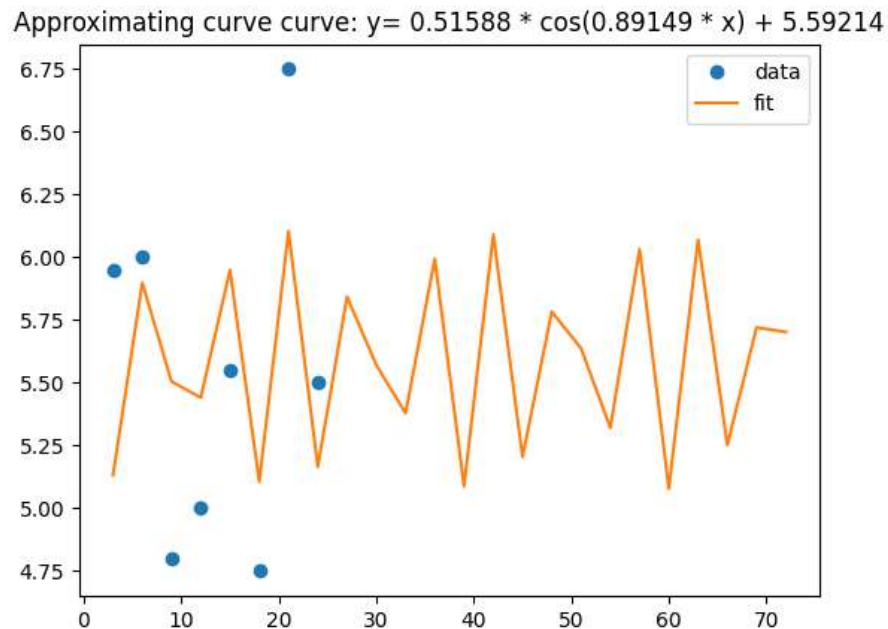


Рис. 2.7. Результати прогнозування міцності за косинусоїдальною моделлю.

Як видно із рис 2.7., косинусоїдальна модель дає можливість прогнозувати зміну міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня із сосною немодифікованою, склеєних полівінілацетатним клеєм із класом довговічності.

На рис 2.8. наведено результати прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня із сосною

немодифікованою для двадцяти зразків за косинусоїдальною математичною моделлю.

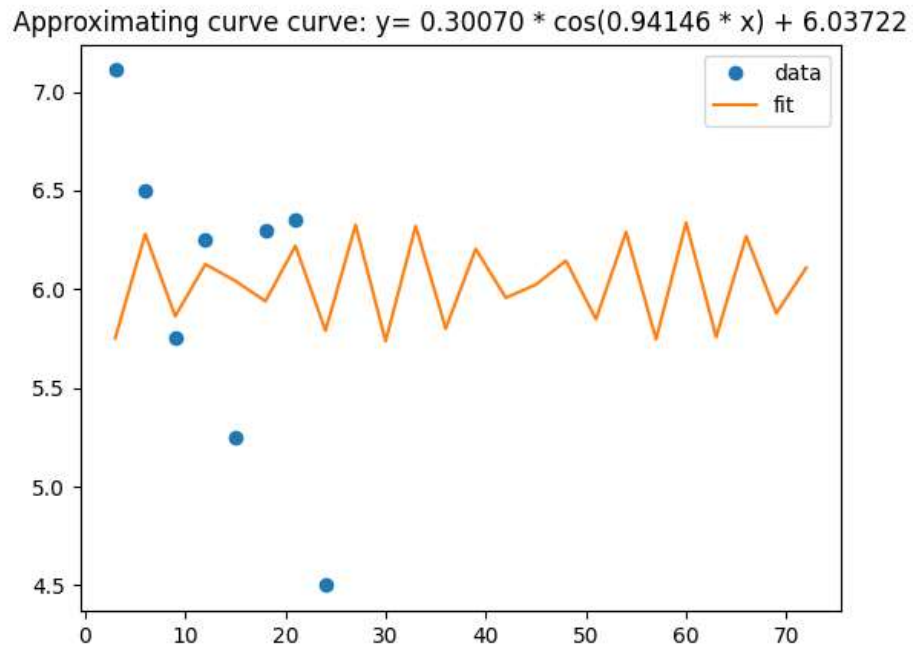


Рис. 2.9. Результати прогнозування міцності за косинусоїдальною моделлю.

Дана модель добре прогнозує міцність у період до двадцяти чотирьох місяців експлуатації таких клейових з'єднань,.

## 2.4 Висновки з розділу

Виходячи з теоретичних основ, які нами вивчено та досліджено у даному розділі, можна зробити наступні висновки:

1. При формуванні клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої необхідно враховувати процеси розпаду основних елементів деревини, що супроводжується утворенням різного роду речовин, в тому числі фурфуролу, тим самим погіршуючи адгезійну здатність клею до деревини. Тому процеси формування такого клейового з'єднання будуть відбуватися за рахунок механічного щеплення, дифузійного

проникнення та хімічних зв'язків між компонентами клейової композиції та деревини.

2. Вплив вологи та температури навколишнього середовища на міцність клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої буде відбуватися за рахунок проникнення води у клейове з'єднання через структуру деревини сосни. Термічно модифікована деревина ясена навпаки забезпечує таким конструкціям меншу сорбційну здатність та у незначній кількості може формувати водневі зв'язки як між компонентами клейової композиції, так і компонентами деревини.

3. Побудовано математичні моделі для опису зміни та прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена та сосни немодифікованої. Для прогнозування міцності таких клейових з'єднань використано косинусоїдальну математичну модель.

### **РОЗДІЛ 3**

## **МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МІЦНОСТІ КЛЕЙОВИХ З'ЄДНАНЬ ТЕРМІЧНО МОДИФІКОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ ЯСЕНА ТА СОСНИ НЕМОДИФІКОВАНОЇ**

Прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і немодифікованої сосни здійснювалась за результатами тривалих та пришвидшених експериментальних досліджень з використанням математичного моделювання. Експериментальні дослідження проводились з використанням наявних методів та методик, відповідно до діючих стандартів. Зокрема використовувались методи тривалого (природного) і пришвидшеного (лабораторного) досліджень.

Тривалий метод досліджень дає можливість отримати реальні результати і оцінити зміну міцності клейових з'єднань деревини під час експлуатації, враховуючи реальний вплив атмосферних факторів. Пришвидшений метод досліджень дозволяє за короткий проміжок часу дослідити вплив температури та вологості на міцність клейових з'єднань та підтвердити достовірність отриманих результатів тривалих досліджень.

Для проведення експериментальних досліджень за вказаними вище методами здійснювалась підготовка деревини та клейових матеріалів. Для цього використовувались дві породи деревини, а саме: ясен термічно модифікований і сосна немодифікована та термопластичний полівінілацетатний клей із класом довговічності D4.

Детальний опис проведення тривалих та пришвидшених експериментальних досліджень, підготовку деревинних матеріалів та клею відповідно до запропонованих методик та послідовність їх проведення наведено нижче.

### **3.1 Підготовка матеріалів для проведення експериментальних досліджень**

Підготовка зразків деревини відповідала вимогам стандарту ДСТУ EN 205:2014 [27], і включала наступні етапи: підготовка деревини сосни, підготовка деревини ясена, термічне модифікування деревини ясена, підготовка клею, склеювання, технологічна витримка, формування зразків відповідних розмірів та форми.

Експериментальні зразки з деревини виготовляли у виробничих умовах на базі підприємства «Long Life Wood». Для досліджень використовували деревину хвойних порід – сосну і твердолистяних порід – ясен.

Зразки для досліджень виготовляли з пиломатеріалів деревини сосни відповідно до стандарту ДСТУ EN 336:2003 [29] та піддавали механічній обробці для отримання ламелей товщиною  $5\pm 0,1$  мм. Пиломатеріали піддавали повздовжньому та поперечному розкрою з використанням круглопилкових верстатів. Після розкрою обробляли отримані заготовки в розмір за товщиною та шириною на повздовжньо-фрезерному верстаті. Розміри готових ламелей становили: довжина – 600 мм, ширина – 130 мм, товщина – 5 мм.

Зразки твердолистяної породи деревини ясена для досліджень відповідали стандарту ДСТУ EN 1313-2:2018 [31]. Пиломатеріали спочатку піддавали термічній обробці у термокамері за температури 195 °C протягом 12 годин. Після термічного модифікування здійснювали кондиціонування зразків на протягом 18 годин. Механічну обробку термічно модифікованої деревини ясена для отримання ламелей здійснювали так само як для деревини сосни. Розміри ламелей: довжина – 600 мм, ширина – 130 мм, товщина – 5 мм.

Вологість ламелей для деревини сосни становила  $12\pm 1,5\%$ , а для ламелей термічно модифікованої деревини ясена –  $6\pm 0,5\%$ . Визначали вологість за допомогою лабораторного аналізатора вологи марки RAD WAG WPS 110 S, принцип роботи якого базується на ваговому методі.

Лабораторний аналізатор вологи RAD WAG WPS 110 S зображено на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Лабораторний аналізатор вологи RAD WAG WPS 110 S.

Вага зразка визначалась з точністю до 0,001 г (1 мг), а точність вимірювання вологості становила 0,001%. Для вологоміра передбачено чотири програми сушіння, а саме: стандартна, плавна, покрокова та швидка. Розрахунок результатів вимірювань відбувався автоматично з відображенням на екрані вимірювача. Клас точності приладу відповідає стандарту ДСТУ EN 45501:2017 [30].

Для формування клейового з'єднання використовували термопластичний клей на основі полівінілацетату марки RAKOLL ECO 4 (стандарт DIN EN 14257:2006), із класом довговічності D4 [81]. Даний клей однокомпонентний. Його вибір було здійснено на основі технічної характеристики та здатності формувати клейове з'єднання, яке може експлуатуватися в умовах зі змінними температурно-вологісними навантаженнями.

Клей перед нанесенням наливали в посудину та здійснювали перемішування для отримання однорідної маси. Після цього визначали його в'язкість за допомогою віскозиметра ВЗ-4 (ДСТУ ISO 2431:2015), який наведено на рис. 3.2. Умовна в'язкість клею становила 80 с. [32].



Рис. 3.2. Віскозиметр ВЗ-4.

Після підготовки ламелей та клею здійснювали технологічний процес склеювання, який проводили за таких режимних параметрів: витрата клею –  $160 \text{ г/м}^2$ , питомий тиск пресування –  $0,6 \text{ МПа}$ , тривалість пресування –  $30 \text{ хв}$ , температура пресування –  $20^\circ\text{C}$ . Технологічна витримка після склеювання становила 7 днів. Склеєні ламелі наведено на рис. 3.3.



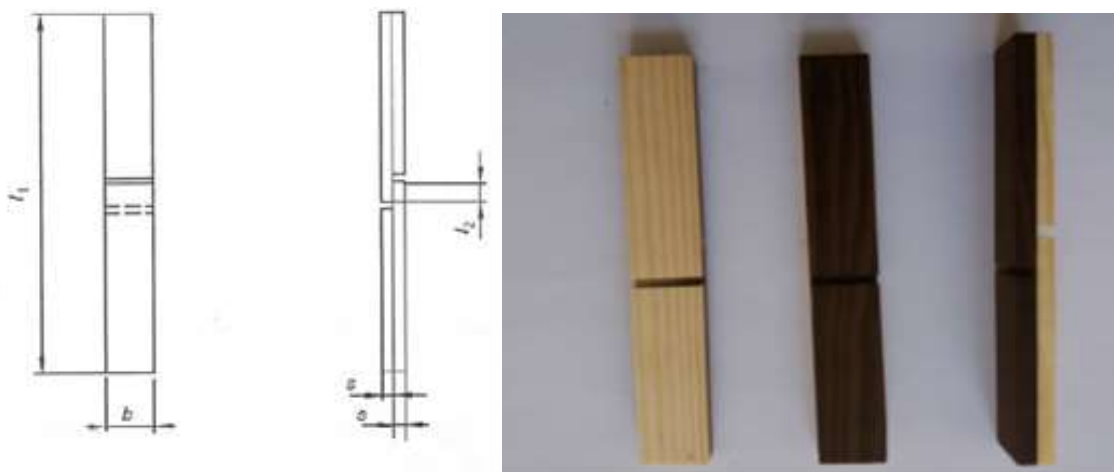
Рис. 3.3. Склеєні заготовки (ламелі).

Із склеєних ламелей формували експериментальні зразки наступних розмірів: довжина –  $150 \text{ мм}$ , ширина –  $20 \text{ мм}$ , товщина –  $10 \text{ мм}$ . Процес формування зразків подано на рис. 3.4.



Рис. 3.4. Формування зразків відповідних розмірів.

Наступним етапом було формування зразків відповідної форми відповідно стандарту ДСТУ EN 205:2014 у кількості 325 штук. Схема, загальний вигляд та форма зразка наведено на рис.3.5.



а)

б)

Рис. 3.5. Зразки для визначення міцності:

а) схема зразка, б) підготовлені зразки.

Випробування експериментальних зразків як за пришвидшеною, так і за тривалою методикою здійснювали на розривній машині марки Р-05 шляхом розтягу вздовж волокон з постійним навантаженням (50 мм/с). Розривна машина марки Р-05 наведена на рис. 3.6.



Рис. 3.6. Розривна машина для випробування зразків марки Р-05.

Результати випробувань записували в журнал спостережень (дод. А).

### **3.2 Методика проведення тривалих експериментальних досліджень клеювих з'єднань**

Тривалий метод експериментальних досліджень є достовірнішим, але трудомісткий і займає більше часу для його проведення. За його результатами можна оцінити зміну міцності клеювих з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої під дією реальних природних факторів. Дані дослідження проводились у Західному регіоні України, за прямої дії атмосферних факторів до повного руйнування зразків. Експериментальні дослідження були проведені у період з 7 листопада 2019 року до 7 листопада 2021 року згідно з методикою досліджень.

Дослідження проводилися у такій послідовності:

- виготовлення стенду для випробування зразків в атмосферних умовах;
- кріплення стенду з експериментальними зразками;
- періодичний огляд зразків;
- зняття зі стенду зразків через кожні три місяці;
- руйнування зразків;
- аналіз отриманих результатів.

Для експериментальних випробувань використовували спеціально виготовлений стенд, який наведено на рис. 3.7.

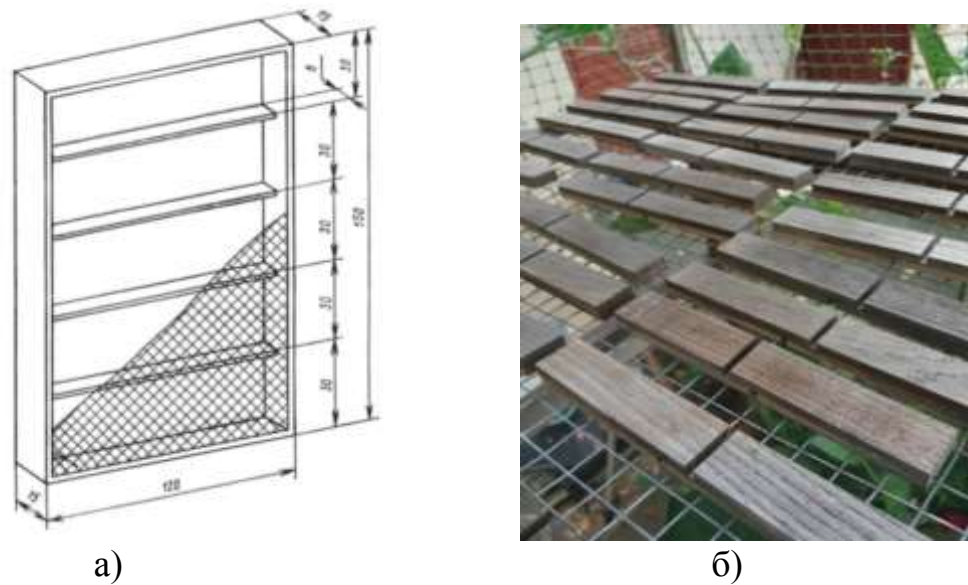


Рис. 3.7. Стенд для випробування експериментальних зразків в природних умовах:

а) схема стенду, б) стенд із експериментальними зразками.

Зміна кольору, контроль розмірів, жолобленість зразків та залишкова міцність після зняття зі стенду та руйнування записувались у журнал спостережень (див. дод. А та розд. 4.1, 4.2). Крім того, протягом всього експерименту здійснювався контроль температури та вологості навколишнього середовища (див. дод. В).

Зразки розкладали на полиці стенду на відстані 20 мм один від одного для забезпечення вільної циркуляції повітря (див. рис. 3.7).

Загальну кількість підготовлених експериментальних зразків (див. розд. 3.1) розділяли на дві частини. Одну частину зразків у кількості 225 штук використовували для тривалих експериментальних досліджень та виставляли на стенд для випробувань у природних умовах згідно з описаною методикою. Другу частину у кількості 25 штук використовували як контрольні зразки, для тривалих і для пришвидшених досліджень. Руйнування таких зразків здійснювали після семиденної технологічної витримки. Результати

руйнування контрольних зразків порівнювали з результатами тривалих експериментальних досліджень.

Під час тривалих експериментальних досліджень кожних три місяці від початку випробувань, тобто через три, шість, дев'ять, дванадцять, п'ятнадцять, вісімнадцять, двадцять один і двадцять чотири місяці, партію зразків у кількості 25 штук знімали із стенду і піддавали руйнуванню.

Міцність клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями, визначали методом їх руйнування (розтягом вздовж волокон), відповідно зі стандартом ДСТУ EN 204:2014 (див. розд. 3.1).

Крім того, візуально визначали характер руйнування клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями ( див. розд. 4.1).

Отримані результати після тривалих експериментальних досліджень піддавали статистичній обробці, будували графічні залежності та здійснювали їх аналіз.

### **3.3 Методика проведення пришвидшених експериментальних досліджень клейових з'єднань**

Паралельно з тривалими експериментальними дослідженнями проводили пришвидшені (лабораторні) дослідження зміни міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями. Даний метод ґрунтується на зміні релаксаційних і пружно-деформаційних процесів у клейовому з'єднанні. Це дало можливість більш детально вивчити вплив температури і вологості на зміну міцності клейових з'єднань. Дані дослідження проводились відповідно до стандарту ДСТУ EN 204:2014 [20, 21, 28].

Зразки для пришвидшених експериментальних досліджень виготовлялись відповідно до методики (див. розд. 3.1). Для склеювання використовували термопластичний клей на основі полівінілацетату марки

RAKOLL ECO 4, клас довговічності D4 (див. розд. 3.1). Згідно зі стандартом ДСТУ EN 204:2014, дослідження проводились послідовно у три етапи.

На першому етапі зразки витримувалися протягом 7-ми діб у стандартних умовах за температури  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ , та вологості навколишнього середовища  $65\pm 5\%$ .



Рис. 3.8. Перший етап. Випробування експериментальних зразків у стандартних умовах.

На другому етапі зразки після 7-ми діб витримання у стандартних умовах піддавались вимочуванню у воді протягом 4-х діб за температури  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ .



Рис. 3.9. Другий етап. Вимочування експериментальних зразків за температури  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ .

На третьому етапі зразки після 7-ми діб витримання у стандартних умовах піддавались шестигодинному кип'ятінню та двохгодинному витриманню у воді за температури  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$  аналогічно до другого етапу.



Рис. 3.10. Третій етап. Кип'ятіння експериментальних зразків.

Щодо зразків для пришвидшеного методу дослідження, то їх кількість становила 75 штук. Дана кількість зразків була розділена на три етапи випробувань, кожен етап якого складав 25 зразків. Контрольні зразки, які не піддавались жодним випробуванням були враховані у тривалих експериментальних дослідженнях і їх кількість становила 25 штук.

Після кожного етапу експериментальних досліджень зразки піддавались руйнуванню аналогічно як для зразків за тривалими експериментальними дослідженнями (див. розд. 3.1, 3.2). Відповідно до стандарту кількість зразків, які руйнуються по клейовому з'єднанню в одному етапі, мала бути не менше 10 штук.

Оскільки стандарт ДСТУ EN 204:2014 призначений для пришвидшеного методу визначення зміни міцності клейових з'єднань деревини бука, нами здійснено перерахунок міцності з деревини бука для термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої з метою порівняльного аналізу та підтвердження достовірності отриманих результатів досліджень.

Після пришвидшених експериментальних досліджень отримані результати піддавали статистичній обробці, на основі якої здійснювали побудову графічних залежностей та їх аналіз.

### **3.4 Статистична обробка результатів експериментальних досліджень**

Основною метою статистичної обробки є структурування експериментальних даних, розрахунок основних показників, побудова графічних залежностей, їх аналіз та визначення закономірностей поведінки. Для статистичної обробки при плануванні експерименту основним показником було кількість дубльованих спостережень ( $n$ ) або обсяг вибірки. Вибірка – це масив даних, випадкових величин вибраних із генеральної сукупності для статистичного спостереження. Вибірка повинна бути репрезентативною, тобто повністю відображати властивості та пропорції генеральної сукупності.

Виходячи з цього, нами були здійснені розрахунки вибірок для двох методів експериментальних досліджень з врахуванням їх поетапності. Згідно з розрахунками середній показник вибірок коливався в межах від 2 до 45 дубльованих спостережень (при  $p=5\%$ ). Тому у наших експериментальних дослідженнях було визначено середньозважений показник дубльованих спостережень вибірки, який становив 25 штук.

Отримані експериментальні дані піддавались структуруванню, розрахункам необхідних статистичних показників, побудові графічних залежностей та їх аналізу [34, 52, 119, 129] в такій послідовності:

- Визначали найбільше  $y_{\max}$  і найменше  $y_{\min}$  значення вибірки;
- Розбивали вибірку на кількість інтервалів ( $k$ ) і визначали їх величину за формулою:

$$\Delta y = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{k}, \quad (3.1)$$

де  $k$  – кількість інтервалів, яку розраховували за формулою  $k=3,2 \lg N+1$ .

• Здійснювали розрахунок середнього значення у кожному інтервалі за формулою:

$$y_i = \frac{y_{in.} + y_{iv.}}{2}, \quad (3.2)$$

де:  $y_{in.}$ ,  $y_{iv.}$  – відповідно значення нижньої і верхньої межі і-ого інтервалу;

• Визначали середнє значення вибірки за формулою:

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^k y_i \cdot m_i, \quad (3.3)$$

де  $m_i$  – кількість значень із вибірки  $N$ , що потрапили у відповідний інтервал.

• Визначали дисперсію:

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^k m_i (y_i - \bar{y})^2, \quad (3.4)$$

• Визначали середньоквадратичне відхилення:

$$S = \sqrt{S^2}, \quad (3.5)$$

• Визначали показник ймовірності:

$$P = 0.9973 - \Delta = \bar{y} \pm 3S, \quad (3.6)$$

• Визначали коефіцієнт варіації за формулою:

$$V = \frac{S}{\bar{y}} \cdot 100\%, \quad (3.7)$$

Коефіцієнт  $V$  показує ступінь мінливості даних у вибірці щодо середнього значення сукупності.

• Визначали середньоквадратичну похибку середнього значення:

$$S_y = \frac{S}{\sqrt{N}}, \quad (3.8)$$

• Визначали показник точності дослідження середнього значення:

$$P = \frac{S_y}{\bar{y}} \cdot 100\% = \frac{V}{\sqrt{N}}, \quad (3.9)$$

• Визначали інтервал довіри для математичного сподівання генеральної вибірки за формулою:

$$\bar{y} - t(\alpha, f) \sqrt{\frac{S^2}{N}} \leq m_y \leq \bar{y} + t(\alpha, f) \sqrt{\frac{S^2}{N}}, \quad (3.10)$$

де:  $t(\alpha, f)$  – табличне значення критерію Стюдента.

• Визначали необхідну кількість дубльованих спостережень у кожному експерименті за формулою:

$$n \geq \frac{V^2 \cdot t(q, f)^2}{p^2},$$

Результати статистичної обробки експериментальних досліджень наведені в додатку Б.

**РОЗДІЛ 4**  
**РЕЗУЛЬТАТИ ТА АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**  
**ЗМІНИ МІЦНОСТІ КЛЕЙОВИХ З'ЄДНАНЬ ТЕРМІЧНО**  
**МОДИФІКОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ ЯСЕНА І СОСНИ**  
**НЕМОДИФІКОВАНОЇ**

Відповідно до методики (див. розд. 3) були проведені тривалі та пришвидшені експериментальні дослідження міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями із класом довговічності D4. Результати тривалих та пришвидшених експериментальних досліджень зміни міцності порівнювались із міцністю контрольних зразків, відповідно до методики (див. розд. 3.2). Це дало можливість здійснити аналіз результатів досліджень, побудувати графічні залежності та отримати математичну модель прогнозування міцності.

У розділі 4.1 наведено результати міцності склеювання термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої для контрольних зразків та зміну міцності для тривалих експериментальних досліджень. У розділі 4.2 наведено результати зміни міцності пришвидшених експериментальних досліджень. У розділі 4.3 наведено порівняльний аналіз отриманих результатів тривалих та пришвидшених експериментальних досліджень. У розділі 4.4 наведено характер руйнування експериментальних зразків після тривалих і пришвидшених досліджень. Розділ 4.5 присвячений прогнозуванню міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої.

#### 4.1 Результати тривалих експериментальних досліджень міцності клейових з'єднань

Відповідно до методики проведення тривалих експериментальних досліджень (див. розд. 3.2) отримано масив даних щодо зміни міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена та сосни немодифікованої (див. дод. А), який піддавався статистичній обробці, згідно з методикою (див. розд. 3.4). Результати статистичної обробки наведено у додатку Б. Після цього за результатами статистичної обробки здійснено графічну інтерпретацію експериментальних досліджень зміни міцності термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, в залежності від кількості дубльованих спостережень [79]. Графічну інтерпретацію результатів досліджень для контрольних зразків наведено на рис. 4.1.



Рис. 4.1. Міцність контрольних зразків.

Як видно з рис. 4.1, міцність клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої для контрольних зразків знаходиться в межах від 6,00 МПа до 8,35 МПа, а її середнє значення становить 7,12 МПа. Як правило, міцність для клейових з'єднань деревини вважається задовільною, якщо адгезійна міцність клейового з'єднання забезпечується на рівні когезійної міцності склеєної деревини або є вищою від неї. Міцність деревини сосни на сколювання вздовж волокон при

вологості 12% перебуває в межах 7,5 МПа [12]. Міцність термічно модифікованої деревини ясена становить 8 МПа відповідно до наших досліджень [80]. Тому, на нашу думку, міцність склеювання термічно модифікованої деревини ясена і немодифікованої деревини сосни повинна бути на межі міцності деревини сосни.

За результатами наших досліджень встановлено, що кількість контрольних зразків, які руйнувались по клейовому шву, становила 64%, по немодифікованій деревині сосни 16%, а по термічно модифікованій деревині ясена 20%. Як бачимо, контрольні зразки у більшості випадків руйнувалися по клейовому з'єднанню. Це вказує на специфіку формування клейового з'єднання термічно модифікованої деревини ясена з немодифікованою деревиною сосни. Аналіз характеру руйнування клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої наведено у розд. 4.3.

Таку поведінку клейового з'єднання можна пояснити тим, що в термічно модифікованій деревині під час обробки її за температури 195°C та тривалості 12 год., проходять незворотні хімічні процеси, які змінюють фізичні та механічні властивості деревини ясена. В основному такі зміни проходять на молекулярному рівні, і призводять до зміни щільності деревини та утворення значної кількості фурфуролу на її поверхні (див роз. 2.1).

Тому адгезійна міцність клейового з'єднання термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями із класом довговічності D4, для контрольних зразків буде меншою в порівнянні із аналогічною міцністю клейового з'єднання немодифікованої деревини сосни і ясена, що й підтверджено результатами наших досліджень.

Наступним кроком стала побудова графічних залежностей та аналіз зміни міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої для тривалих експериментальних досліджень, які відповідно до методики (див. розд. 3.2) тривали протягом двох років у природних умовах. Їх результати наведено у додатку А (табл. 1-9). А

графічна інтерпретація даних результатів досліджень наведена на рис. 4.2 – 4.9.

На рис. 4.2 наведено зміну міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої після трьох місяців випробувань у природних умовах.



Рис. 4.2. Зміна міцності клейових з'єднань після трьох місяців випробувань у природних умовах.

З рис. 4.2 видно, що міцність клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої після трьох місяців природних випробувань перебуває в межах від 5,00 МПа до 7,55 МПа, що в середньому становить 6,34 МПа. Якщо порівняти дані результати дослідження міцності з міцністю контрольних зразків, то за три місяці міцність зменшилась на 11%. Така поведінка клейового з'єднання відповідає зміні міцності з'єднань у природних умовах під час експлуатації, а її характер можна пояснити впливом циклічної зміни вологості і температури навколишнього середовища, властивостями полівінілацетату (див. розд. 2.2), та підтвердити характером руйнування клейового з'єднання, що наведено у розд. 4.4.

На рис. 4.3 наведено зміну міцності клейових з'єднань після шести місяців випробувань у природних умовах.



Рис. 4.3. Зміна міцності клейових з'єднань після шести місяців випробувань у природних умовах.

Як видно з рис.4.3, міцність клейового з'єднання термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після шести місяців випробувань у природних умовах перебуває в межах від 5,00 МПа до 8,25 МПа. Середнє значення міцності становить 6,56 МПа. Якщо порівняти дані результати дослідження міцності з міцністю контрольних зразків, то за шість місяці вона зменшилась на 7,8%, а в порівнянні з трьома місяцями природних випробувань, вона навпаки збільшилась на 3,5%. Така поведінка клейового з'єднання відбувається у зимово-весняний період за мінусових температур. Це на нашу думку, можна пояснити здатністю полівінілацетату витримувати мінусові температури до  $-60^{\circ}\text{C}$ . (див. розд. 2.2). Опис характеру руйнування такого з'єднання наведено у розд. 4.3.

На рис. 4.4 наведена зміна міцності клейових з'єднань після дев'яти місяців випробувань у природних умовах.

Як видно з рис.4.4, міцність клейового з'єднання термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після дев'яти місяців випробувань у природних умовах перебуває в межах від 4,50 МПа до 7,75 МПа. Середнє значення міцності – 6,05 МПа. Якщо порівняти дані результати дослідження міцності з міцністю контрольних зразків, то за дев'ять місяців вона зменшилась на 15%, а в порівнянні з шістьма місяцями випробувань зменшилась на 8%.



Рис. 4.4. Зміна міцності клейових з'єднань після дев'яти місяців випробувань у природних умовах.

Таку поведінку зміни міцності клейового з'єднання термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої можна пояснити впливом підвищених температур у весняно-літній період на полівінілацетат, який відповідно до його характеристики за підвищених температур має здатність до пом'якшення та повзучості клейового шва (див. розд. 2.2). У даний період проведення експериментальних досліджень максимальна температура становила  $24^{\circ}\text{C}$ , тому міцність, на нашу думку, зменшилась несуттєво.

На рис. 4.5 наведена зміна міцності клейових з'єднань після дванадцяти місяців випробувань у природних умовах.



Рис. 4.5. Зміна міцності клейових з'єднань після дванадцяти місяців випробувань у природних умовах.

Як видно з рис.4.5, міцність клейового з'єднання термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після дванадцяти місяців випробувань у природних умовах перебуває в межах від 4,00 МПа до 7,63 МПа. Середнє значення міцності становить 5,81 МПа. Якщо порівняти дані результати дослідження міцності з міцністю контрольних зразків, то за дванадцять місяців вона зменшилась на 18%, а в порівнянні з дев'ятьма місяцями випробувань зменшилась на 4%. Опис такої поведінки клейового з'єднання наведено у розд. 2.2, а характер руйнування у розд. 4.4.

Щодо другого року тривалих експериментальних досліджень, які проходили з 07.11.2020 до 07.11.2021 року, то загальна зміна міцності є аналогічною до першого року випробувань. Тобто вона змінюється по спадаючій залежності, але враховує змінні температурно-вологісні навантаження в залежності від пори року. У зимово-весняний період міцність дещо збільшується, а у літньо-осінній зменшується аналогічно до першого року експериментальних досліджень. Результати даних досліджень та опис, такої поведінки термопластичних клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і немодифікованої деревини сосни наведено в розд. 4.3.

Графічна інтерпретація результатів досліджень зміни міцності після другого року тривалих експериментальних досліджень наведена на рис. 4.6-4.9.



Рис. 4.6. Зміна міцності клейових з'єднань після п'ятнадцяти місяців випробувань у природних умовах.



Рис. 4.7. Зміна міцності клейових з'єднань після вісімнадцяти місяців випробувань у природних умовах.



Рис. 4.8. Зміна міцності клейових з'єднань після двадцяти одного місяця випробувань у природних умовах.



Рис. 4.9. Зміна міцності клейових з'єднань після двадцяти чотирьох місяців випробувань у природних умовах.

Після п'ятнадцяти місяців випробувань у природних умовах (рис. 4.6) міцність клейового з'єднання перебуває в межах від 4,70 МПа до 7,00 МПа. Середнє значення міцності становить 5,87 МПа. Якщо це порівняти з міцністю клейового з'єднання контрольних зразків, то вона зменшилась на 17,5%.

Після вісімнадцяти місяців випробувань у природних умовах міцність клейового з'єднання перебуває в межах від 4,75 МПа до 7,25 МПа. Середнє значення міцності становить 5,93 МПа. Якщо порівняти з міцністю клейового з'єднання контрольних зразків, то вона зменшилась на 16,7%. Якщо порівняти з середньою міцністю після п'ятнадцяти місяців випробувань, то вона зросла на 0,8%.

Після двадцяти одного місяця випробувань у природних умовах міцність клейового з'єднання перебуває в межах від 4,50 МПа до 6,75 МПа. Середнє значення міцності становить 5,62 МПа. Якщо порівняти з міцністю клейового з'єднання контрольних зразків, то вона зменшилась на 21%.

Після двадцяти чотирьох місяців випробувань у природних умовах міцність клейового з'єднання перебуває в межах від 4,10 МПа до 6,25 МПа. Середнє значення міцності становить 5,13 МПа. Якщо порівняти з міцністю клейового з'єднання контрольних зразків, то вона зменшилась на 27,9%.

Підсумовуючи результати тривалих експериментальних досліджень зміни міцності термопластичних полівінілацетатних клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і немодифікованої деревини сосни, можна зробити висновок, що за два роки випробувань міцність клейових з'єднань зменшилась на 27,9%. У реальних величинах зміна міцності становить від 7,12 МПа до 5,13 МПа. Відповідно до методики експериментальних досліджень, міцність через 3 місяці зменшилась на 11%, через 6 місяців – на 7,8%, через 9 місяців – на 15%, через 12 місяців – 18%, через 15 місяців – 17,5%, через 18 місяців – 16,7%, через 21 місяць – 21% і через 24 місяці – на 27,9% від міцності контрольних зразків. Така закономірність зміни міцності клейових з'єднань відповідає поведінці

полівінілацетатних клеїв при дії знакозмінних температурно-вологісних навантажень.

#### 4.2 Результати пришвидшених експериментальних досліджень міцності клейових з'єднань

Відповідно до методики проведення пришвидшених експериментальних досліджень (див. розд. 3.3) отримано масив даних щодо зміни міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена та сосни немодифікованої (див. дод. А), який піддавався статистичній обробці, згідно методики (див. розд. 3.4). Результати статистичної обробки наведено у додатку Б. Після цього, за результатами статистичної обробки здійснено графічну інтерпретацію експериментальних досліджень зміни міцності термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, в залежності від кількості дубльованих спостережень [22].

Графічна інтерпретація зміни міцності термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої після першого етапу випробувань та її порівняння з контрольними зразками (див. розд. 4.1) наведена на рис. 4.10.



Рис. 4.10. Зміна міцності після першого етапу випробувань.

Як видно з рис.4.10, міцність клейового з'єднання термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої після першого етапу

випробувань перебуває в межах від 4,63 МПа до 7,75 МПа. Середнє значення міцності становить 6,21 МПа. Тобто, у відсотковому співвідношенні міцність зменшилась на 13% від початкової міцності контрольних зразків.

Незначний відсоток зменшення міцності клейового з'єднання термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями, можна пояснити впливом кімнатної температури і вологості навколишнього середовища за нормальних умов випробувань. Теоретичні припущення щодо поведінки клейового з'єднання наведено в розд. 2.3.

На рис. 4.11 наведено графічну інтерпретацію зміни міцності термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після другого етапу випробувань та її порівняння з контрольними зразками.



Рис. 4.11. Зміна міцності після другого етапу випробувань.

Як видно з рис. 4.11, міцність клейового з'єднання термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої перебуває в межах від 3,25 МПа до 6,00 МПа. Середнє значення міцності становить 4,56 МПа. Якщо порівняти дані результати експериментальних досліджень міцності з контрольними зразками (7,12 МПа), то можна побачити, що міцність зменшилась на 36% від початкової, а в порівнянні з першим етапом досліджень, міцність зменшилася на 26,5 %.

На рис. 4.12 наведено графічну інтерпретацію зміни міцності термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої після третього етапу випробувань та її порівняння з контрольними зразками.

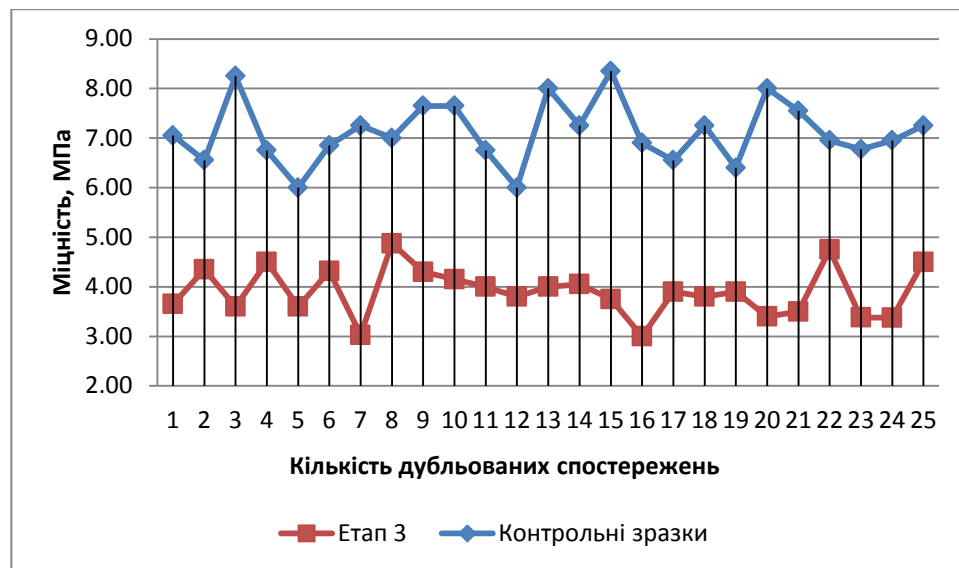


Рис. 4.12. Зміна міцності після третього етапу випробувань.

Як видно з рис. 4.12, мінімальна міцність клейового з'єднання становить 3,00 МПа, максимальна міцність 4,88 МПа, а середнє її значення становить 3,90 МПа. Якщо порівнювати дані результати досліджень з міцністю контрольних зразків, то можна побачити, що після третього етапу випробувань міцність зменшилась на 45%. А якщо їх порівняти з першим і другим етапом випробувань, то міцність зменшилась на 37% і 15% відповідно. Це свідчить про те, що клейові з'єднання термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, склесної термопластичними полівінілацетатними клеями, здатні витримувати вологісні навантаження із зміною температури води від 20 до 100°C.

На рис. 4.13. наведено графічну інтерпретацію зміни міцності термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої після трьох етапів випробувань та їх порівняння з контрольними зразками.

Як видно з рис. 4.13, міцність клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої як для контрольних

зразків, так і всіх етапів випробувань змінюється синусоїдально і перебуває в межах від 3 МПа до 8,35 МПа.

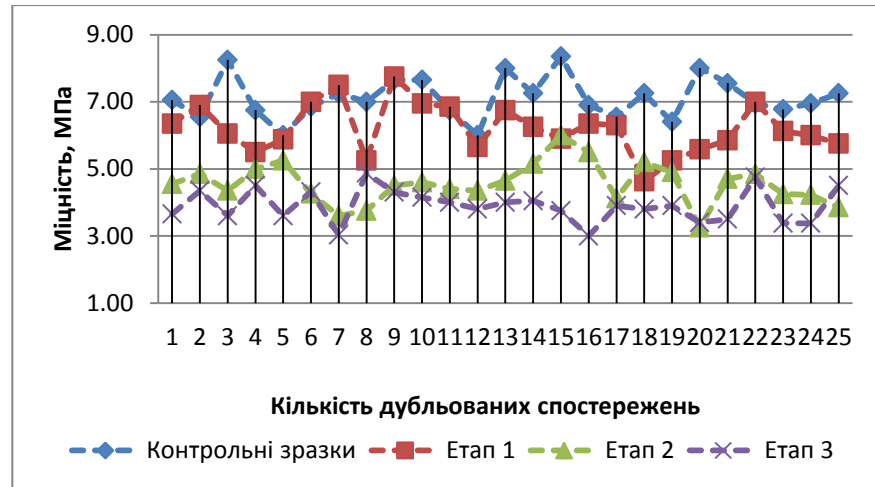


Рис. 4.13. Зміна міцності контрольних зразків та після трьох етапів випробування.

Це можна пояснити тим, що клейові з'єднання термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої на основі термопластичних клеїв із класом довговічності D4, забезпечують умови стандарту ДСТУ EN 204. Тобто після кожного етапу випробувань міцність таких клейових з'єднань поступово зменшується. Це закономірний процес зміни міцності для клейових з'єднань з деревини, оскільки міцність під дією певних температурно-вологісних навантажень повинна зменшуватись. Але не повинна бути меншою за нижню межу міцності відповідно до вимог стандарту [28].

Необхідно відзначити, що за результатами наших експериментальних досліджень, міцність клейового з'єднання термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після другого етапу випробувань на 41% вища, від міцності, яка прописана в стандарті. Таку поведінку клейового з'єднання, можна пояснити хімічними взаємодіями між компонентами полівінілацетатної клейової композиції та компонентами деревини (див. розд. 1.5 та 2.3). Експериментально це підтверджено результатами тривалих (див. розд. 4.1) та пришвидшених (див. розд. 4.2) експериментальних досліджень.

Щодо зміни міцності клейових з'єднань після третього етапу випробувань (під дією води при температурі вищій за 90°C), то це пояснюється теоретичними дослідженнями, які наведені у розд. 2.3, а саме: такі клейові з'єднання є стійкими до температурно-вологісних навантажень.

Підсумовуючи результати пришвидшених експериментальних досліджень, необхідно зазначити, що міцність клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і немодифікованої деревини сосни, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями із класом довговічності D4, відповідає умовам чинного стандарту: середня міцність контрольних зразків становить 7,12 МПа, а середня міцність після циклічних температурно-вологісних випробувань – 3,90 МПа. Виходячи з отриманих результатів температурно-вологісних навантажень, такі клейові з'єднання та конструкції на їх основі можуть експлуатуватися в умовах з підвищеною вологістю.

#### **4.3 Порівняльний аналіз тривалих та пришвидшених експериментальних досліджень**

У розд. 4.1 та 4.2 наведено результати тривалих та пришвидшених експериментальних досліджень зміни міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої залежно від впливу вологи та температури. Згідно з аналізом даних результатів дослідження встановлено, що як природні, так і лабораторні умови випробувань призводять до зменшення міцності клейових з'єднань.

Для вивчення впливу вологи та температури на міцність клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, нами здійснено порівняльний графічний аналіз між тривалими та пришвидшеними експериментальними дослідженнями. Зокрема порівняння другого етапу випробувань за пришвидшеним методом із зимовим періодом тривалого методу досліджень, та третього етапу пришвидшених випробувань із літнім періодом тривалих досліджень. Їх результати наведено на рис. 4.14 та рис. 4.15 відповідно.

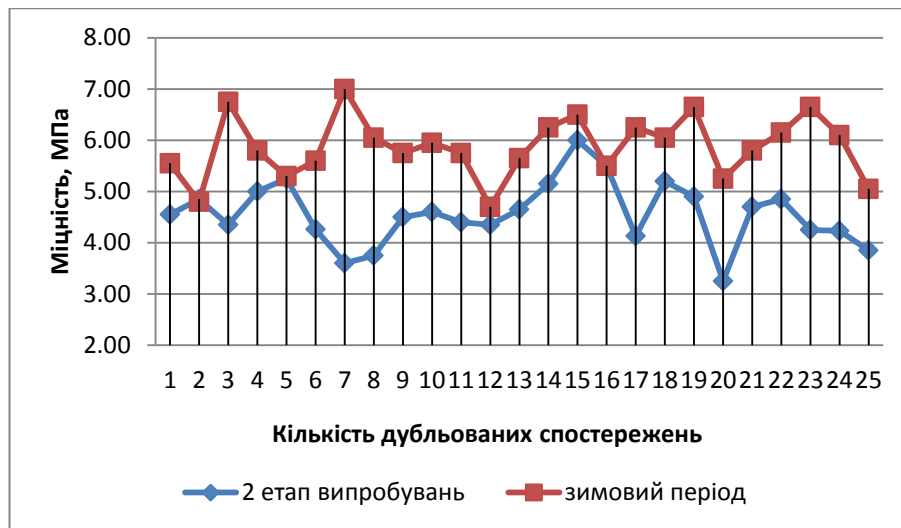


Рис. 4.14. Порівняльний аналіз другого етапу пришвидшених випробувань із зимових періодом тривалих досліджень.

Як видно з рис. 4.14, зміна міцності для тривалих та пришвидшених експериментальних досліджень описується синусоїдальними залежностями із різним характером її зміни. Відповідно до результатів пришвидшених експериментальних досліджень, міцність після другого етапу випробувань змінюється в діапазоні від 3,25 МПа до 6,00 МПа, а за результатами тривалих експериментальних досліджень зимового періоду – в межах від 4,70 МПа до 7,00 МПа. Дані результати досліджень відображають поведінку полівінілацетатної клейової композиції в залежності від тривалої дії вологи у лабораторних умовах (див. розд. 3.3), та дії вологи і температур, нижчих від нуля при тривалих експериментальних дослідженнях (див. розд. 3.2). Довготривала дія вологи на таке клейове з'єднання призводить до зміни міцності за рахунок сорбційної здатності деревини сосни та клейової плівки. Тривала дія вологи за температур до  $-15^{\circ}\text{C}$  також призводить до зменшення міцності клейового з'єднання, але із значно меншим числовим показником в порівнянні з результатами досліджень у літній період, оскільки він за своїми температурно-вологісними показниками наближений до другого етапу пришвидшених експериментальних досліджень.

Таку поведінку полівінілацетатного клейового з'єднання термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої можна пояснити характеристикою полівінілацетату, температура текучості якого становить  $+60^{\circ}\text{C}$ , температура склування  $-28^{\circ}\text{C}$ , а теплостійкість  $37-38^{\circ}\text{C}$ . Тому такі клейові з'єднання краще будуть експлуатуватися за знижених температур та підвищеної вологості навколишнього середовища.

Окрім того, таке порівняння результатів досліджень, на нашу думку, необхідне для підтвердження кореляційної взаємодії між пришвидшеними та тривалими експериментальними дослідженнями та прогнозуванням міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої.

На рис. 4.15 наведено порівняльний аналіз результатів третього етапу пришвидшених випробувань та літнього періоду тривалих досліджень.

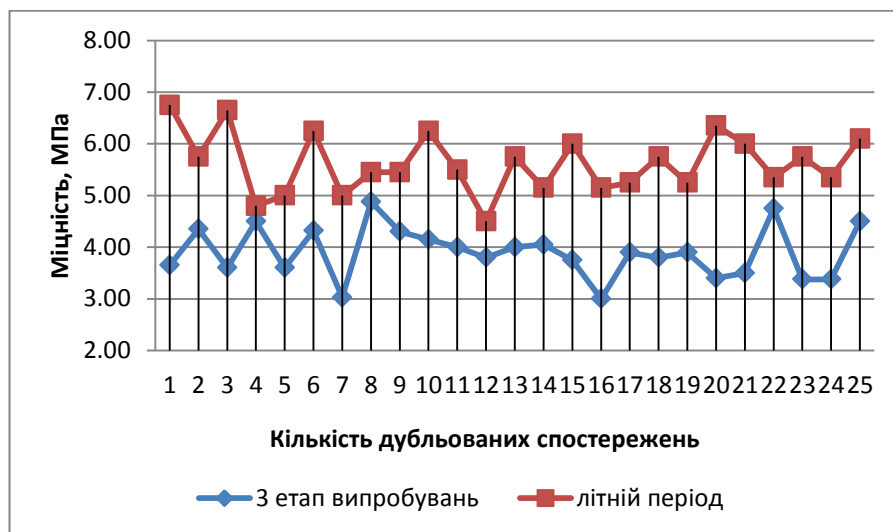


Рис. 4.15. Порівняльний аналіз третього етапу пришвидшених випробувань та літнього періоду тривалих досліджень.

За результатами пришвидшених експериментальних досліджень міцність клейового з'єднання після третього етапу випробувань змінюється в діапазоні від 3,00 МПа до 4,88 МПа, а за результатами тривалих експериментальних досліджень літнього періоду міцність змінюється від 4,50 МПа до 6,75 МПа. Дані результати досліджень характеризуються впливом підвищених температур на клейові з'єднання під час випробувань у літній

період досліджень та підвищеною температурою третього етапу пришвидшених експериментальних досліджень.

Довготривала дія підвищеної температури літнього періоду має негативний вплив на термопластичні полівінілацетатні клейові з'єднання термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, оскільки у таких з'єднаннях за підвищених температур відбувається повзучість клейового шару, що призводить до зміни пружно-деформаційного стану та в кінцевому результаті до зменшення міцності. Такий самий вплив на клейове з'єднання спостерігається при короткотривалій дії високих температур (кип'ятіння зразків) за пришвидшеним методом досліджень.

Підсумовуючи отримані результати досліджень, можна зазначити, що підвищені температури та невисока вологість під час експлуатації мають більш негативний вплив на термопластичні полівінілацетатні клейові з'єднання термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, ніж понижені температури та підвищена вологість навколишнього середовища. Це дає змогу зробити висновок, що існує кореляційний зв'язок між тривалими і пришвидшеними експериментальними дослідженнями, що дає можливість використовувати отримані результати експериментальних досліджень для побудови математичної моделі прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої під дією вологи та температури навколишнього середовища.

#### **4.4 Опис руйнування клейових з'єднань**

У розд. 4.1 і 4.2 наведено результати тривалих та пришвидшених експериментальних досліджень зміни міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями, а в розд. 4.3 вплив вологи та температури на зміну міцності таких клейових з'єднань.

У даному розділі проаналізуємо характер руйнування клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями, залежно від тривалості випробувань у природних умовах та етапів пришвидшених випробувань. На рис. 4.16 – 4.24 наведено характер руйнування клейових з'єднань для контрольних зразків, та для зразків після третього, шостого, дев'ятого, дванадцятого, п'ятнадцятого, вісімнадцятого, двадцять першого і двадцять четвертого місяців випробування у природних умовах.

На рис. 4.16 наведено характер руйнування контрольних зразків.



Рис. 4.16. Характер руйнування контрольних зразків.

Як видно з рис. 4.16, характер руйнування контрольних зразків клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої такий: по клейовому з'єднанню – 64%; по термічно модифікованій деревині ясена – 20% та по немодифікованій деревині сосни – 16%. Тобто, найбільший відсоток руйнування відбувається по клейовому з'єднанню, що характеризує когезійний розрив по клею. На другому місці руйнування по термічно модифікованій деревині ясена і на третьому – немодифікованій деревині сосни.

На рис. 4.17 наведено характер руйнування клейових з'єднань після трьох місяців випробувань.

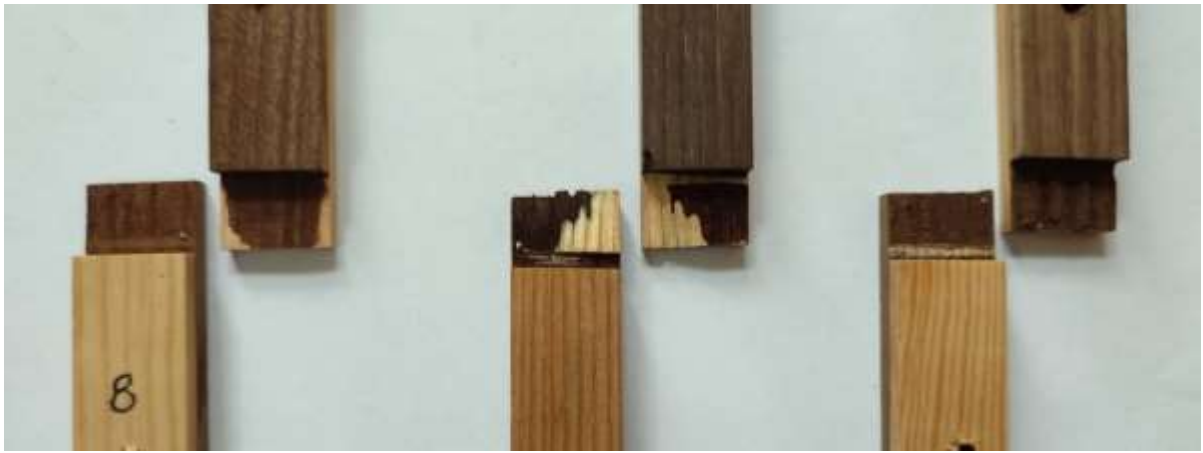


Рис. 4.17. Характер руйнування клейових з'єднань після трьох місяців випробувань.

Як видно з рис. 4.17, після трьох місяців випробувань зразки візуально дещо змінили зовнішній вигляд, особливо сосна. Значних змін у клейовому з'єднанні не виявлено. Щодо руйнування, то встановлено, що кількість зразків, які руйнувалися по клейовому з'єднанні, становить 56%, по термічно модифікованій деревині ясена – 24% та по немодифікованій деревині сосни – 20%. Тобто, так само як і для контрольних зразків, найбільший відсоток руйнування спостерігається по клейовому з'єднанню, що характеризує розрив по клею. На другому місці руйнування по термічно модифікованій деревині ясена і на третьому місці немодифікованій деревині сосни. Такий характер руйнування клейових з'єднань відбувається за максимальної  $w_{\max}$  95% і мінімальної  $w_{\min}$  52% вологості та температури  $t_{\max}$  12°C,  $t_{\min}$  -4°C.

На рис. 4.18 наведено характер руйнування клейових з'єднань після шести місяців випробувань.

Як видно з рис. 4.18, після шести місяців випробувань деревина термічно модифікованого ясена дещо змінила колір, а на ламелях деревини сосни почала появлятися синява. У клейовому шві не виявлено дефектних місць. Щодо руйнування, встановлено, що кількість зразків, які руйнувалися по клейовому з'єднанню становить 52%, по термічно модифікованій деревині ясена – 24% та по немодифікованій деревині сосни – 24%. Тобто найбільший відсоток руйнування спостерігається по клейовому з'єднанню, що також

характеризує когезійний розрив по клею. Тому, за вологості  $w_{\max}$  90% та  $w_{\min}$  40% і температури  $t_{\max}$  15°C,  $t_{\min}$  -3°C, переважає когезійне руйнування по клейовому шву.



Рис. 4.18. Характер руйнування клейових з'єднань після шести місяців випробувань.

На 4.19 наведено характер руйнування клейових з'єднань після дев'яти місяців випробувань.



Рис. 4.19. Характер руйнування клейових з'єднань після дев'яти місяців випробувань.

Як видно з рис. 4.19, після дев'яти місяців випробувань спостерігається більш інтенсивна зміна кольору як деревини ясена, так і сосни порівняно з попереднім періодом. Щодо характеру руйнування, то кількість зразків, які руйнувалися по клейовому з'єднанні становить 52%, по термічно

модифікованій деревині ясена – 16% та по немодифікованій деревині сосни – 32%. Такий характер руйнування клейових з'єднань відбувається за вологості  $w_{\max}$  93%,  $w_{\min}$  47% та температури  $t_{\max}$  24°C,  $t_{\min}$  3°C.

На рис. 4.20 наведено характер руйнування клейових з'єднань після дванадцяти місяців випробувань.

Як видно з рис. 4.20, після дванадцяти місяців випробувань у природних умовах деревина сосни значно змінила колір та покритлась синявою. Щодо характеру руйнування після дванадцяти місяців випробувань у природних умовах, то кількість зразків, які руйнувалися по клейовому з'єднанні становить 68%, по термічно модифікованій деревині ясена – 16% та по немодифікованій деревині сосни – 16%. Такий характер руйнування клейових з'єднань відбувався за вологості  $w_{\max}$  95%,  $w_{\min}$  57% та температури  $t_{\max}$  25°C,  $t_{\min}$  4°C.



Рис. 4.20. Характер руйнування клейових з'єднань після дванадцяти місяців випробувань.

Вище наведено рисунки за річний період досліджень. Тепер, проаналізуємо зміну характеру руйнування клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої за другий рік природних випробувань (рис. 4.21 – 4.24). А саме: після п'ятнадцяти (рис. 4.21), після вісімнадцяти (рис. 4.22), після двадцяти одного (рис. 4.23) і після двадцяти чотирьох місяців випробувань (рис. 4.24).



Рис. 4.21. Характер руйнування клейових з'єднань після п'ятнадцяти місяців випробувань за  $w_{\max}$  94%,  $w_{\min}$  57% та  $t_{\max}$  7°C,  $t_{\min}$  -15.



Рис. 4.22. Характер руйнування клейових з'єднань після вісімнадцяти місяців випробувань за  $w_{\max}$  92%,  $w_{\min}$  34% та  $t_{\max}$  12°C,  $t_{\min}$  -11.



Рис. 4.23. Характер руйнування клейових з'єднань після двадцяти одного місяця випробувань за  $w_{\max}$  88%,  $w_{\min}$  47% та  $t_{\max}$  28°C,  $t_{\min}$  9.



Рис. 4.24. Характер руйнування клейових з'єднань після двадцяти чотирьох місяців випробувань за  $w_{\max}$  94%,  $w_{\min}$  48% та  $t_{\max}$  23°C,  $t_{\min}$  3.

Як видно з рисунків, зовнішній вигляд зразків із наближенням до двадцяти чотирьох місяців випробувань не лише змінюється за кольором (появляється синява), але візуально помітні поодинокі випадки розшарування клейового шва. Така поведінка клейового з'єднання дає підстави вважати, що із збільшенням тривалості випробувань, зразки, які не відповідали технологічним параметрам склеювання (можливо похибка експерименту), почали розшаровуватись.

Щодо характеру руйнування зразків за другий рік природних випробувань, то він змінювався аналогічно до першого року випробувань, але із значним зменшенням кількісних показників міцності. Так після п'ятнадцяти місяців випробувань у природних умовах, кількість зразків, які руйнувалися по клейовому з'єднанню становить 48%, по термічно модифікованій деревині ясена – 28% та по немодифікованій деревині сосни – 24%. Після вісімнадцяти місяців випробувань, кількість зразків, які руйнувалися по клейовому з'єднанню – 52%, по термічно модифікованій деревині ясена – 28% та по немодифікованій деревині сосни – 20%. Після двадцяти одного місяця випробувань кількість зразків, які руйнувалися по клейовому з'єднанню – 48%, по термічно модифікованій деревині ясена – 24% та по немодифікованій деревині сосни – 28%. Після двадцяти чотирьох місяців випробувань кількість зразків, які руйнувалися по клейовому

з'єднанню – 56%, по термічно модифікованій деревині ясена – 28% та по немодифікованій деревині сосни – 16%.

Підсумовуючи результати дворічних природних досліджень міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, можна зробити висновок, що такі клейові з'єднання можуть експлуатуватися у природних умовах за знакозмінних температурно-вологісних навантажень, не руйнуючись та забезпечуючи належну міцність готових конструкцій.

Тепер проаналізуємо характер руйнування таких клейових з'єднань для пришвидшених експериментальних досліджень.

На рис. 4.25 – 4.27 наведено характер руйнування клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої після трьох етапів пришвидшених випробувань відповідно до методики (див. розд. 3.3), а саме, на рис. 4.25 – після першого етапу пришвидшених випробувань.



Рис. 4.25. Характер руйнування клейових з'єднань після першого етапу випробувань.

Як видно з рис. 4.25, після першого етапу випробувань кількість зразків, які руйнувалися по клейовому з'єднанню – 52%, по термічно модифікованій деревині ясена – 28% та по немодифікованій деревині сосни – 20%.

На рис. 4.26 наведено характер руйнування клейових з'єднань після другого етапу пришвидшених випробувань.



Рис. 4.26. Характер руйнування клейових з'єднань після другого етапу випробувань.

Як видно з рис. 4.26, характер руйнування після другого етапу випробувань становить: по клейовому з'єднанню – 80%, по термічно модифікованій деревині ясена – 16% та по немодифікованій деревині сосни – 4%.

На рис. 4.27 наведено характер руйнування клейових з'єднань після третього етапу пришвидшених випробувань.



Рис. 4.27. Характер руйнування клейових з'єднань після третього етапу випробувань.

Як видно з рис. 4.27, характер руйнування після третього етапу випробувань становить: по клейовому з'єднанню – 92%, по термічно модифікованій деревині ясена – 4% та по немодифікованій деревині сосни – 4%.

Щодо зовнішнього вигляду зразків після пришвидшених експериментальних досліджень, то він змінювався в залежності від етапу випробувань. А саме: після першого етапу, коли зразки піддавалися впливу вологості та температури навколишнього середовища, їх зовнішній вигляд та колір практично не змінювався. Після другого етапу випробувань, при вимочуванні зразків протягом чотирьох діб у воді за кімнатної температури, дещо змінився зовнішній вигляд деревини сосни (потемніла). Щодо термічно модифікованої деревини ясеня, то вона залишилась без змін. Після третього етапу випробувань, коли зразки піддавались кип'ятінню протягом шести годин, колір деревини сосни почав змінюватись більш інтенсивно, колір термічно модифікованої деревини ясеня став світлішим. Щодо розшарування або руйнування зразків, то їх не спостерігалося.

Підсумовуючи результати пришвидшених експериментальних досліджень міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, можна зробити висновок, що нетривале витримання в атмосферних умовах, вимочування у воді та кип'ятіння менше впливають на зміну зовнішнього вигляду зразків, ніж випробування у природних умовах, чого не можна сказати про зміну міцності таких клейових з'єднань, яка після третього етапу випробувань (кип'ятіння) зменшилась на 45%.

#### 4.5 Прогнозування міцності клейових з'єднань

Побудована математична модель прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, склесної термопластичними полівінілацетатними клеями, яка має вигляд:

$$y=A*\cos(B*x)+C$$

де: А, В, С – коефіцієнти моделі,

х – тривалість експлуатації.

Математична модель для прогнозування міцності має три коефіцієнти, а саме: А, В, С, які враховують умови експлуатації та основні характеристики клейової композиції та термічно модифікованої деревини ясена.

У натуральних показниках коефіцієнтів математична модель матиме вигляд:

$$Y=0.41581 * \cos (0.80149 * x) + 6.2007$$

За даною математичною моделлю можна прогнозувати міцність таких клейових з'єднань в залежності від умов їх експлуатації, а саме вологості і температури навколишнього середовища. Для прогнозування міцності умови навколишнього середовища мають відповідати Західному регіону України та бути в межах проведення тривалих експериментальних досліджень. Прогнозування здійснено для двадцяти чотирьох місяців відповідно до тривалості експериментальних досліджень.

На рис. 4.28 наведено графічну залежність зміни міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями, шляхом їх прогнозування за допомогою математичної моделі.

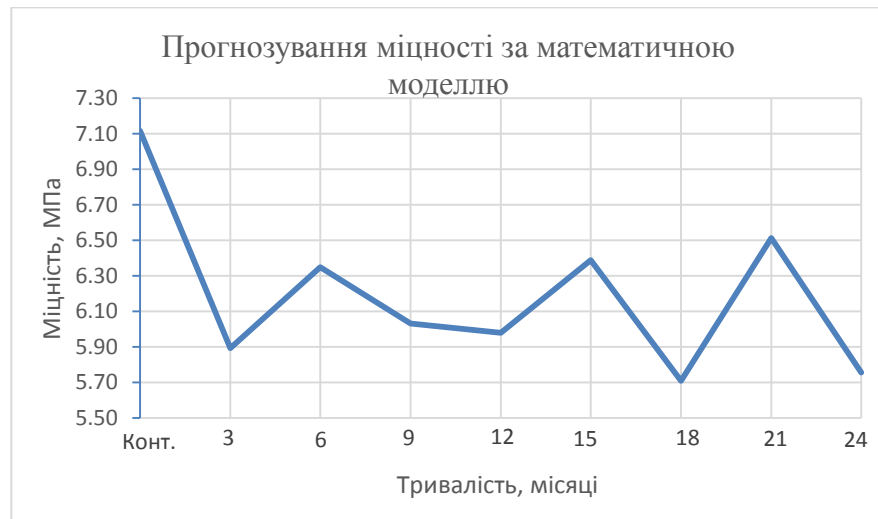


Рис. 4.28. Прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена за допомогою математичної моделі.

Як видно з рис. 4.28, використання косинусоїдальної моделі дає можливість отримати результати зміни міцності клейових з'єднань для

прогнозування міцності. Величина амплітуди коливань при прогнозуванні міцності за даною математичною моделлю вказує на те, що із збільшенням тривалості експлуатації даного клейового з'єднання, крива затухає і має спадаючий характер. Міцність клейових з'єднань для двадцяти чотирьох місяців прогнозування міцності зменшується від 7.12 МПа до 5.70 МПа. Отримана крива зміни міцності відображає результати реальних тривалих експериментальних досліджень, які були проведені нами протягом двох років (див. розд. 4.1).

Найбільш достовірні результати зміни міцності дана математична модель дозволяє відтворити за двадцять чотири місяці. Після двадцяти чотирьох місяців отримані результати прогнозування міцності є теоретичними, тобто вони не мають експериментального підтвердження і відображають кліматичні зміни навколишнього середовища аналогічні до кліматичних змін, які були в період з 7 листопада 2019 року до 7 листопада 2021 року.

Для порівняльного аналізу на рис. 4.29 наведено результати прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями, отримані за результатами тривалих експериментальних досліджень та за допомогою математичної моделі.

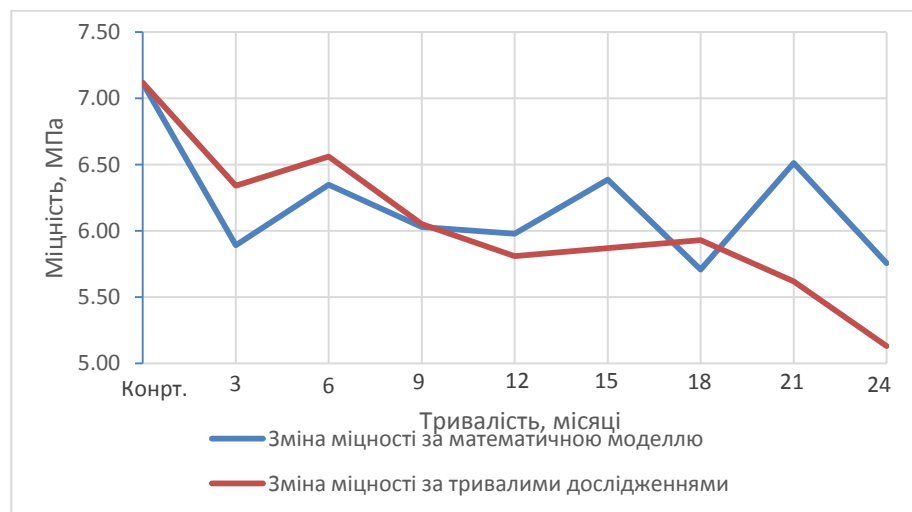


Рис. 4.29. Порівняльний аналіз зміни міцності клейових з'єднань за тривалими дослідженнями та математичною моделлю.

Як видно з рис. 4.29, зміна міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої склеєної, термопластичними полівінілацетатними клеями, для обох кривих відбувається практично однаково і має спадаючий характер. Це свідчить про достовірність отриманих результатів за допомогою математичної моделі. Окрім того, це дає можливість прогнозувати міцність таких клейових з'єднань у природних умовах з довготривалою дією температури та вологи навколишнього середовища протягом двадцяти чотирьох місяців експлуатації, з похибкою 6,87%, що дає підстави вважати, що отримані результати за допомогою математичної моделі є достовірними.

Для прогнозування міцності після двадцяти чотирьох місяців у змінних кліматичних умовах, прогнозування буде дещо відмінним від двадцятичотирьохмісячного періоду отриманих нами даних. Тому за математичною моделлю із такими розрахованими коефіцієнтами не можна здійснити прогнозування міцності з високою точністю результатів. Для точності отриманих даних необхідно вводити додатковий поправочний коефіцієнт на зміну кліматичних умов під час експлуатації. Ця задача вирішується за допомогою більш детального вивчення впливу пружно-деформаційних процесів у таких клейових з'єднаннях, які не входили в завдання нашої дисертаційної роботи.

Математична модель із поправочним коефіцієнтом для прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої матиме такий вигляд:

$$Y=0,36*(0.41581* \cos (0.80149*x) + 6.2007)$$

За результатами отриманої математичної моделі здійснено прогнозування міцності таких клейових з'єднань. Результати прогнозування міцності наведено на рис. 4.30.

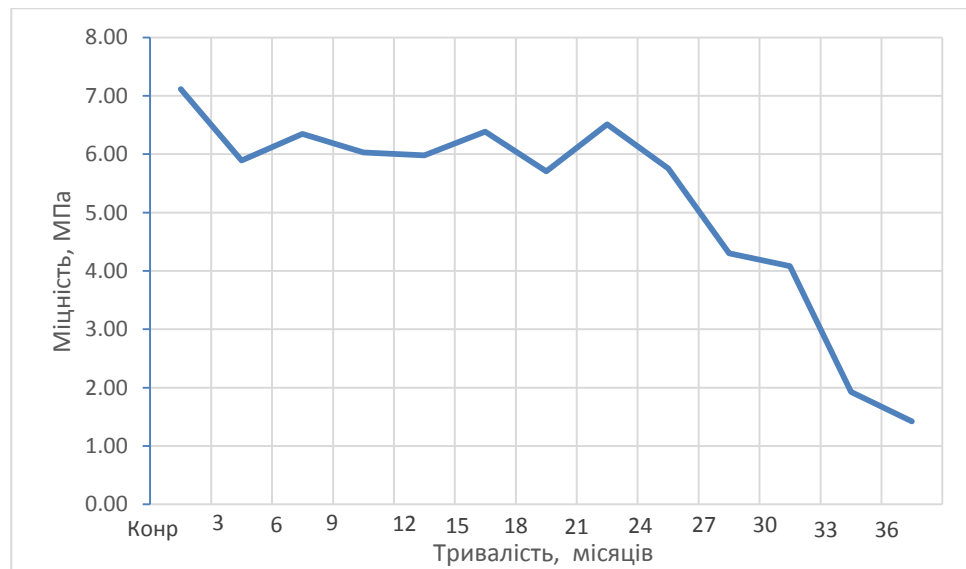


Рис. 4.30. Прогнозування міцності клейових з'єднань за математично моделлю за сорок вісім місяців.

Як видно з рис. 4.30, згідно з прогнозом після двадцяти чотирьох місяців експлуатації міцність клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої поступово зменшується. У натуральних показниках це 5,70 МПа до 1,59 МПа. Кінцева міцність перебуває на межі міцності для таких клейових з'єднань. Дані результати прогнозування підтвердженні нашими тривалими експериментальними дослідженнями. На стенді після двадцяти чотирьох місяців досліджень було залишено декілька зразків для подальшого спостереження. В результаті спостереження було встановлено, що через тридцять шість місяців витримування у природних умовах зразки почали руйнуватися на стенді, тобто вони не витримували подальших умов експлуатації. І до тридцяти шести місяців всі зразки, які були на стенді зруйнувались під дією зовнішніх кліматичних факторів.

Підсумовуючи, необхідно відзначити, що отримана математична модель дає можливість прогнозувати міцність клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня, склеєної із деревиною сосни полівінілацетатним клеєм із класом довговічності D4, з похибкою 6,87%, що підтверджує достовірність отриманих результатів досліджень.

#### 4.6 Висновки з розділу

Підсумовуючи результати експериментальних досліджень можна зробити такі висновки:

1. За два роки тривалих експериментальних досліджень у природних умовах міцність клейового з'єднання термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями, зменшилась на 27,9%, а саме: від 7,12 МПа до 5,13 МПа. В період експерименту міцність клейового з'єднання зменшувалася в залежності від тривалості випробувань, а саме: через 3 місяці – на 11%, через 6 місяців – на 7,8%, через 9 місяців – на 15%, через 12 місяців – 18%, через 15 місяців – 17,5%, через 18 місяців – 16,7%, через 21 місяць – 21% і через 24 місяці – на 27,9%, від міцності контрольних зразків. Така закономірність зміни міцності клейових з'єднань відповідає поведінці полівінілацетатних клеїв, при дії знакозмінних температурно-вологісних навантажень.

2. Міцність контрольних зразків клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і немодифікованої деревини сосни, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями із класом довговічності D4, становить 7,12 МПа, а середня міцність після трьох етапів пришвидшених експериментальних досліджень – 3,90 МПа. Тобто, після першого етапу міцність клейового з'єднання зменшилась на 13%, після другого – на 36% і після третього – на 45%, від міцності контрольних зразків. Виходячи з результатів пришвидшених експериментальних досліджень, такі клейові з'єднання можуть експлуатуватися в умовах з підвищеною вологістю навколишнього середовища.

3. Встановлено, що підвищена температура та невисока вологість під час експлуатації клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої більш негативно впливають на такі клейові з'єднання, ніж понижена температура та підвищена вологість навколишнього середовища. Це дозволяє зробити висновок, що існує кореляційний зв'язок між тривалими і пришвидшеними експериментальними дослідженнями, що в

свою чергу дає можливість використовувати отримані результати досліджень для побудови математичної моделі прогнозування міцності в залежності від дії вологи та температури навколишнього середовища.

4. Досліджено, що вимочування у воді та кип'ятіння клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, менше впливають на зміну зовнішнього вигляду зразків, ніж випробування у природних умовах. Щодо характеру руйнування, то після двох років випробувань у природних умовах зразки руйнувалися: по клейовому з'єднанні – 54%, по термічно модифікованій деревині ясена – 23,5% та по немодифікованій деревині сосни – 22,5%. Щодо характеру руйнування після трьох етапів пришвидшених досліджень, то зразки руйнувалися наступним чином, по клейовому з'єднанні – 74,7%, по термічно модифікованій деревині ясена – 16% та по немодифікованій деревині сосни – 9,3%.

5. На основі результатів тривалих та пришвидшених експериментальних досліджень, їх статистичної обробки і математичного моделювання, побудовано математичну модель для прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена, склеєну із деревною сосни немодифікованої полівінілацетатним клеєм із класом довговічності D4. Достовірність математичної моделі прогнозування міцності підтверджені результатами експериментальних досліджень. Похибка між результатами зміни міцності за тривалими дослідженнями та результатами отриманими за допомогою математичної моделі становить 6,87%.

## РОЗДІЛ 5

### ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

#### 5.1 Економічна ефективність від отриманих результатів досліджень

Новий технологічний процес передбачає зміни у складі матеріальних, енергетичних і трудових витрат. Тому доцільно розглянути окремі елементи виробничої собівартості виготовлення віконного блоку за базовим і проектним варіантом. До таких (змінних) елементів, на нашу думку, належать: сировина та матеріали, заробітна плата з відрахуваннями на соціальні потреби, амортизація активної частини основних засобів (технологічного обладнання), електроенергія. Саме за цими елементами відбудуться зміни у собівартості калькуляційної одиниці (1 віконного блоку визначеного типорозміру) пропонованого та базового варіанту.

Для зручності формування кошторису встановимо набір вихідних даних і параметрів та подано їх у табличній формі.

Таблиця 5.1 – Основні показники та норми, встановлені в дисертаційній роботі

№ з/п	Назва показників	Одиниці вимірювання	За базовим варіантом	За проектом
1	2	3	4	5
1.	Річний випуск віконних блоків (умовний)	шт	25 000	25 000
2.	Число днів роботи цеху на рік	днів	250	250
3.	Змінність роботи	змін	1	1
4.	Число одиниць технологічного устаткування	штук	10	11
5.	Чисельність виробничих робітників: на одну зміну	осіб	11	15
6.	Річне споживання електроенергії на технологічні потреби	тис.квт-год	66,191	66,191
7.	Річне споживання води на технологічні потреби	м <sup>3</sup>	121,4	—

Таблиця 5.2 – Технологічне обладнання

№ з/п	Назва	Марка, тип	Кількість одиниць	
			За базовим варіантом	За проектом
1	2	3	4	5
1.	Шипорізний верстат	MXB3515(S)	1	1
2.	Чотирибічний фрезерний верстат	STOMANA VS 20N1	1	1
3.	Вайма горизонтальна	STOMANA VS 20N1	4	4
4.	Фрезерний верстат	MAGIC MP27	1	1
5.	Шліфувальний верстат	PBP-200A	1	1
6.	Пневморозпилююча кабіна	ПК	1	—
7.	Пневморозпилювач	Walcom SLIM HVLP	1	—
8.	Робоче місце для нанесення клею	P.M.	—	1
9.	Розпилювач для нанесення клею	Walcom SLIM HVLP	—	1
10.	Прес для холодного склеювання	SL 14/8 (Stroj&Les.)	—	3
11.	Робочі місця для технологічної витримки	P.M.	—	2
12.	Робочі місця для нанесення олії	P.M.	—	1
13.	Місце технологічної витримки	P.M.	—	1
	Разом		10	11

Собівартість продукції з масивної деревини (матеріаломісткий тип виробництва) формується значною мірою за елементом «Сировина та матеріали». З огляду на це обчислимо матеріальні витрати на базовий і проектний варіант у натуральному та грошовому виразі.

Норми витрат сировини та матеріалів обчислені в основних розділах дисертаційної роботи. Ринкові ціни для відповідних позицій запозичені із вебсайтів виробників і трейдерів.

Значна економія на матеріальних витратах забезпечена заміною дорогого лакофарбового матеріалу на олію талеvu. Навіть використання

термічно модифікованої деревини не збільшує вартість матеріальних витрат, а навпаки – зменшує їх.

Таким чином, нова технологія виготовлення віконних блоків є менш витратною для виробника та безпечнішою для довкілля (з огляду на пропоновані опоряджувальні матеріали).

Таблиця 5.3 – Матеріальні витрати на 1 віконний блок (тис. грн.)

№ з/п	Назва сировини, матеріалів	Один. вимірювання	Ціна за одиницю, тис. грн.	Кількість на 1 вікно			Сума, тис. грн.
				Фактично	За проектом	Різниця (+, -)	
1	Брус клеєний (сосна) ЧЗ	м <sup>3</sup>	29,770	0,16	0,16	0	0
2	Термічно модифікована деревина ясена	м <sup>3</sup>	63,000	—	0,003	0,003	0,189
3	Клей Rakoll ECO D-4	кг	0,199	—	0,18	0,18	0,0358 2
4	Лак поліуретановий (FO MO25)	кг	0,877	0,3	—	-0,3	-0,2631
5	Затверджувач (30 U)	кг	0,253	0,27	—	-0,27	- 0,0683 1
6	Грунтівка (FL MO25)	кг	0,370	0,3	—	-0,3	-0,111
7	Барвник (Renner SW900 RC-750)	кг	2,825	0,004	—	-0,004	-0,0113
8	Шліфувальна стрічка:						
	280	м <sup>2</sup> .	0,147	0,011	0,011	—	—
	320	м <sup>2</sup> .	0,120	0,009	0,009	—	—
9	Марля	м <sup>2</sup> ..	0,029	0,012	0,012	—	—
10	Міткаль	м <sup>2</sup> .	0,040	0,014	0,014	—	—
11	Олія (галева)	кг	0,770	—	0,07	0,07	0,0539
12	Вода	м <sup>3</sup>	0,029	0,005	—	-0,005	-0,0001
	Разом:						-0,1751

Витрати на оплату праці різних категорій працівників є вагомою складовою кошторису виробничої собівартості.

Розташування основних робітників за логікою технологічного процесу.

Табл. 5.4 – Базовий варіант

№ з/п	Назва обладнання	Кількість, шт.	Чисельність основних робітників (на одну зміну) на один верстат, осіб
1	Шипорізний верстат	1	1
2	Чотирибічний фрезерний верстат	1	2
3	Вайма горизонтальна	4	1
4	Фрезерний верстат	1	1
5	Шліфувальний верстат	1	2
6	Кабіна пневморозпилююча	1	1
	Разом:	—	11

Табл. 5.5 – Проектний варіант

№ з/п	Назва обладнання	Кількість, шт.	Чисельність основних робітників (на одну зміну) на один верстат, осіб
1	Робоче місце (Р.М.) для нанесення клею	1	1
2	Прес для холодного склеювання	3	1
3	Р.М. для технологічної витримки	2	—
1	Шипорізний верстат	1	1
2	Чотирибічний фрезерний верстат	1	2
3	Вайма горизонтальна	4	1
4	Фрезерний верстат	1	1
5	Шліфувальний верстат	1	2
6	Робочі місця для нанесення олії	1	1
	Разом:	—	15

Наведену в таблицях 5.4 і 5.5 наявну чисельність основних робітників перераховуємо у спискову за допомогою коефіцієнта 1,15 (співвідношення між річним ефективним фондом робочого часу підприємства та робітника), а чисельність допоміжних робітників і керівників розраховуємо укрупнено щодо основних робітників (25% і 8% відповідно).

Для обчислень витрат на заробітну плату різним категоріям працівників беремо за основу середньомісячну заробітну плату для: виробничих робітників (18 000,0 грн.), допоміжних робітників (15 000,0 грн.), керівників (28 000 грн.) – за даними Держкомстату на 2023 р.

Таблиця 5.6 – Чисельність працівників, фонд оплати праці та трудомісткість продукції

№ п/п	Назва показників	Одиниці вимір.	За базовим варіантом	За проектом	Зміна +, —
1	Спискова чисельність персоналу:				
	➤ виробничі робітники	осіб	13	17	+4
	➤ допоміжні робітники	- “ -	3	4	+1
	➤ керівники, службовці	- “ -	1	1	—
	Разом	- “ -	17	22	+5
2	Фонд оплати праці:	тис. грн.	2808,0	3672,0	+864,0
	➤ виробничих робітників	- “ -	540,0	720,0	+180,0
	➤ допоміжних робітників	- “ -	336,0	336,0	—
	➤ керівників, службовців	- “ -	3684,0	4728,0	+1044,0
	Разом	- “ -	3684,0	4728,0	+1044,0
3	Річний випуск віконних блоків	шт	25 000	25 000	—
4	Зарплатомісткість 1 віконного блока	грн.	112,32	146,88	+ 34,56

База даних для обчислення вартості основних засобів та їх енергетичної потужності за базовим і проектним варіантами розміщена в таблицях 5.7 і 5.8.

Чинна норма амортизаційних відрахувань для активної частини основних засобів – 21,93%. Річна сума амортизаційних відрахувань за двома варіантами становитиме:

$$A_{\text{баз.}} = 2710,4 * 0,2193 = 594 \text{ 39 тис. грн.}$$

$$A_{\text{проект.}} = 4656,62 * 0,2193 = 1021,2 \text{ тис. грн.}$$

Енергетична потужність обладнання за двома варіантами є однаковою та становить 39,4 кВт. За даними «Львівенерго», середня вартість однієї кВт-год

складає на 01.09.2023 р. 2,4 грн. Отже, річні витрати на електроенергію для технологічних потреб за двома варіантами складуть:

$$E_{\text{баз., проект.}} = 39,4 * 8 * 250 * 0,83 (K_{\text{пол.}}) * 2,4 = 158,86 \text{ тис. грн.}$$

Кошторис виробничої собівартості за змінними елементами витрат містить: вартість сировини та матеріалів, заробітну плату з відрахуваннями на соціальні потреби, суму амортизаційних відрахувань активної частини основних засобів, вартість електроенергії на технологічні потреби. Зведений розрахунок такого кошторису на річну програму та на 1 калькуляційну одиницю (віконний блок визначеного типорозміру) подано в таблицях 5.9 і 5.10.

Таблиця 5.7 – Базовий варіант (вартість та енергетична потужність)

№ з/п	Назва обладнання	Марка (тип)	Кількість, шт.	Вартість, тис. грн.		Потужність одиниці, кВт	Загальна потужність, кВт
				Одиниці	Разом		
1	Шипорізний верстат	MXB3515(S)	1	196,00	196,00	5,5	5,5
2	Чотирибічний фрезерний верстат	STOMANA VS 20N1	1	560,70	560,70	17,1	17,1
3	Вайма горизонтальна	STOMANA VS 20N1	4	240,16	960,64	0,3	1,2
4	Робочі місця для технологічної витримки	P.M.	2	0,77	1,54	0,0	0,0
5	Фрезерний верстат	MAGIC MP27	1	112,32	112,32	7,5	7,5
6	Шліфувальний верстат	PBP-200A	1	720,12	720,12	3,0	3,0
7	Пневморозпилююча кабіна	ПК	1	147,00	147,00	4,5	4,5
8	Пневморозпилювач	Walcom SLIM HVLP	1	12,05	12,05	0,6	0,6
	Разом:		—	—	2710,4	—	39,4

Таблиця 5.8 – Проектний варіант (вартість та енергетична потужність)

№ з/п	Назва обладнання	Марка (тип)	Кількість, шт	Вартість, тис. грн.		Потужність одиниці, кВт	Загальна потужність, кВт
				Одиниці	Разом		
1	Робоче місце для нанесення клею	P.M.	1	1,77	1,77	—	—
2	Розпилювач для нанесення клею	Walcom SLIM HVLP	1	12,05	12,05	0,6	0,6
3	Прес для холодного склеювання	SL 14/8 (Stroj&Les.)	3	900,87	2702,62	1,5	4,5
4	Робочі місця для технологічної витримки	P.M.	2	0,77	1,54	—	—
5	Шипорізний верстат	MXB3515(S)	1	196,00	196,00	5,5	5,5
6	Чотирибічний фрезерний верстат	STOMANA VS 20N1	1	652,58	652,58	17,1	17,1
7	Вайма горизонтальна	STOMANA VS 20N1	4	240,16	960,64	0,3	1,2
8	Робочі місця для технологічної витримки	P.M.	2	0,77	1,54	—	—
9	Фрезерний верстат	MAGIC MP27	1	98,97	98,97	7,5	7,5
10	Шліфувальний верстат	PBP200A	1	112,0	112,00	3,0	3,0
11	Робочі місця для нанесення олії	P.M.	1	7,70	7,70	—	—
12	Місце технологічної витримки	P.M.	1	1,10	1,10	—	—
13	Разом:		—	—	4656,6	—	39,4

Таблиця 5.9 – Кошторис елементної виробничої собівартості 25000 віконних блоків, тис. грн.

№ з/п	Назва елемента	Базовий варіант	Проектний варіант	Економія (-), перевитрата (+)
1	Сировина та матеріали	130785	126407,5	-4377,5
2	Заробітна плата	3684	4728	1 044,0
3	ЄСВ (єдиний соціальний внесок) 22%	810,48	1040,16	229,7
4	Амортизація (21,93%)	594,39	1021,2	426,8
5	Електроенергія	158,86	158,86	—
	Разом:	136032,73	133355,72	-2 677,0

Таблиця 5.10 – Кошторис по елементній виробничій собівартості 1 віконного блоку, грн.

№ з/п	Назва елемента	Базовий варіант	Проектний варіант	Економія (-), перевитрата (+)
1	Сировина та матеріали	5 231,40	5 056,30	-175,10
2	Заробітна плата	147,36	189,12	41,76
3	ЄСВ (єдиний соціальний внесок) 22%	32,42	41,61	9,19
4	Амортизація (21,93%)	23,78	40,85	17,07
5	Електроенергія	6,35	6,35	0,00
	Разом:	5 441,31	5 334,23	-107,08

Графічна інтерпретація даних таблиці 5.10 подана на рис. 5.1.

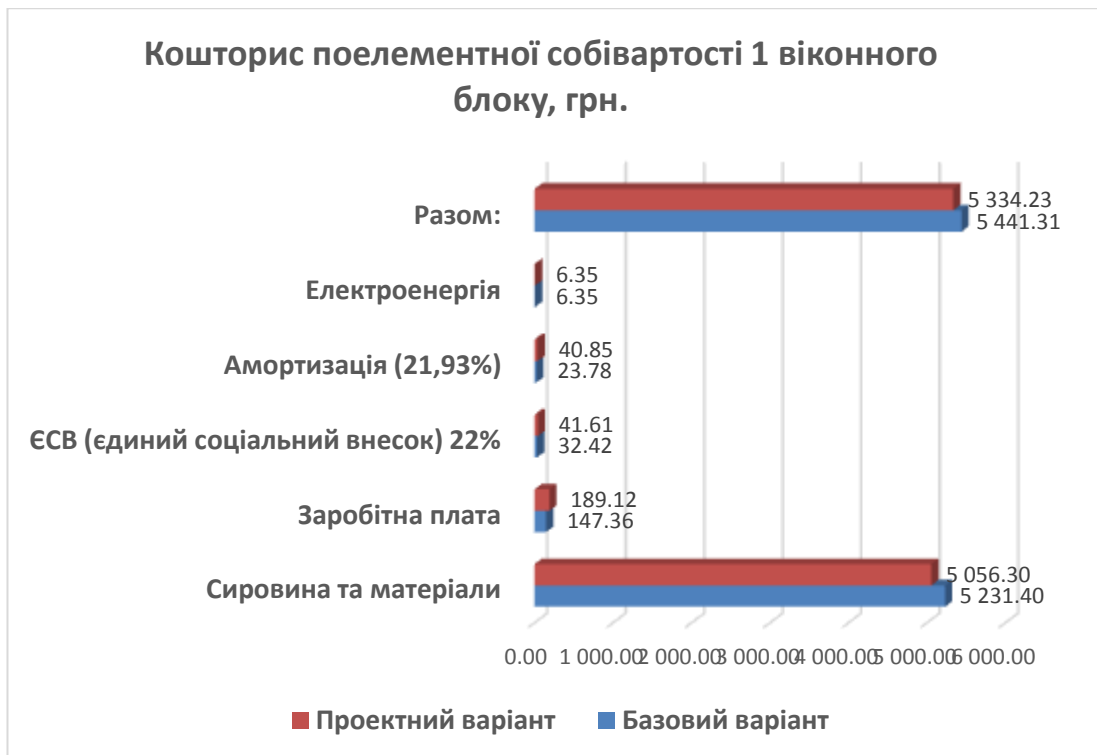


Рис. 5.1. Порівняльна структура виробничої собівартості 1 віконного блоку

Для обґрунтування фінансової доцільності дисертаційних пропозицій слід розглянути такі параметри, як інвестиційні витрати в основні засоби та обігові кошти.

Впровадження дисертаційних пропозицій потребуватиме інвестиційних витрат (капіталовкладень) в основні засоби в сумі 2726,8 тис. грн. На придбання необхідного обладнання та оснащення додаткових робочих місць.

При цьому, зі складу діючих основних засобів вибувають у першому році засоби виробництва на суму 159,1 тис. грн. (147,0 + 12,05), котрі можуть бути реалізовані. Візьмемо витрати на реалізацію рівними 20,0% вартості та одержимо дохід у сумі:

$$\text{ОФ}_{\text{виб.}} = 159,1 * 0,8 = 127,2 \text{ тис. грн.}$$

Різницю у формуванні обігових коштів визначимо за двома варіантами лише за тими видами сировини та матеріалів, які змінюються (табл. 3), та нормативу їх запасів у розмірі 50 календарних днів.

Обігові кошти за двома варіантами:

$$\text{ОК}_{\text{баз.}} = (0,2631+0,068+0,111+0,0113+0,00014) * 25 = 11338,5 \text{ тис. грн.}$$

$$\text{ОК}_{\text{проект.}} = (0,189+0,027+0,054) * 25 = 6753,5 \text{ тис. грн.}$$

$$\text{ОК}_{\text{баз. зап.}} = (11338,5 * 50)/360 = 1574,8 \text{ тис. грн.}$$

$$\text{ОК}_{\text{проект. зап.}} = (6753,5 * 50)/360 = 937,4 \text{ тис. грн.}$$

$$\Delta\text{ОК} = 937,4 - (1574,8*0,8) = - 322,4 \text{ тис. грн.}$$

Таким чином, отримуємо не поповнення обігових коштів, а їх вивільнення. Навіть за умови реалізації непотрібних за проектом опоряджувальних матеріалів за мінусом витрат на реалізацію у розмірі 20,0%.

Для коректності розрахунків грошових потоків слід визначитися з відсотком їх дисконтування та застосувати його у визначенні чистої теперішньої вартості (ЧТВ) і рентабельності інвестицій.

Формування відсотка дисконтування грошових потоків виконаємо за факторним методом (сумарна оцінка окремих видів ризику):

- облікова ставка НБУ станом на 01.09.2023 р. – 22,0 %;
- інфляція за прогнозом НБУ на 2023 р. – 14,8 %;

- ризики виходу на ринок (немає даних вивчення попиту на нову продукцію) – 4,0 %;
- ризики воєнного стану в Україні (можливості для розвитку бізнесу) – 10,0 %

Сумарний відсоток дисконтування:

$$22,0 + 14,8 + 4,0 + 10,0 = 50,8 \%$$

Коефіцієнти дисконтування для коректного розрахунку грошових потоків з урахуванням фактору часу:

$$K_{2024} = 1,000; K_{2025} = 1/(1+0,508) = 0,6631; K_{2026} = 1/(1+0,508)^2 = 0,4398$$

Таблиця 5.11 – Розрахунок показників ефективності інвестицій

№ з/п	Показники	Початковий стан 2024	Значення показників за роками розрахункового періоду			
			2025	2026	2027	2028
1	Інвестиційна діяльність	-2404,4	127,2			
1.1	Надходження від продажу активів (основних фондів), тис. грн.	-	127,2	-	—	—
1.2	Затрати на придбання активів (основних фондів), тис. грн.	2726,8	-	-	—	—
1.3	Затрати на поповнення обігових коштів, тис. грн	322,4	-	-	—	—
2	Операційна діяльність	-	2758,24	2533,0	—	—
2.1	Додатковий прибуток від виробничої діяльності (зниження собівартості ТП) до оподаткування	-	2677,01	2552,92	—	—
2.2	Податок на додатковий прибуток за чинною ставкою (18,0 %)	-	481,86	459,52	—	—
2.3	Додатковий чистий (оподаткований) прибуток	-	2195,14	2093,39	—	—
2.4	Додаткові амортизаційні відрахування	-	563,1	439,61	—	—
	Ефективність проєкту в цілому				—	—
3	Потік (сальдо) від операційної та інвестиційної діяльності (1+2)	-2404,4	2885,4	2533,0	—	—
4	Коефіцієнт дисконтування при відсотку дисконтування 50,8 %	1,0000	0,6631	0,4398	—	—
5	ЧТВ проєкту за роками розрахункового періоду	-2404,4	1919,1	1114,0	—	—

Продовження табл. 5.11

6	ЧТВ наростаючим підсумком (накопичений дисконтован.потік)	- 2404,4	- 485,3	628,7	—	—
7	Сумарна ЧТВ проекту (економічний ефект) за 3 роки: 628,7 тис. грн.					
	Рентабельність інвестицій (PI) 27,1 %					
8	Термін окупності проекту ( $T_{ок}$ ) 2 роки і 5 місяців					

Додаткові амортизаційні відрахування за роками розрахункового періоду:

$$\Delta A_{2025} = (2726,78 - 159,05) * 0,2193 = 2567,73 * 0,2193 = 563,1 \text{ тис. грн.}$$

$$\Delta A_{2026} = (2567,73 - 563,1) * 0,2193 = 439,61 \text{ тис. грн.}$$

Рентабельність інвестицій:

$$PI = (628,7 * 100) / (2404,4 - 127,2 * 0,6631) = 27,1\%$$

Термін окупності інвестиційних витрат настає на третьому році:

$$T_{ок} = 2 \text{ роки і } 485,3 / (1114,0 / 12) = 2 \text{ р. } 5 \text{ міс.}$$

Таблиця 5.12 – Техніко-економічні показники впровадження проектних пропозицій

№ з/п	Показники	Один. вимір.	Базовий варіант	Проектний варіант	Зміна (+, -)
1	Річний обсяг випуску віконних блоків	штук	25 000	25 000	—
2	Собівартість обробки річного обсягу виробництва продукції	тис. грн.	136032,7	133355,7	-2677,0
3	Витрати сировини та матеріалів на одиницю продукції	тис. грн.	5441,3	5334,2	-107,1
4	Чисельність ПВП	осіб	17	22	5
7	Середньорічна заробітна плата одного працівника ПВП	тис. грн.	216,7	238,4	+21,7
8	Сума інвестиційних витрат на проект всього, в т. ч.	тис. грн.		2404,4	
	➤ в основні засоби		—	2726,8	—
	➤ в обігові кошти		—	-322,4	—
9	Чиста теперішня вартість проекту за розрахунковий період	тис. грн.	—	628,7	—
10	Рентабельність інвестицій	%	—	27,1	—
11	Дисконтований термін окупності інвестиційних витрат	років, місяців	—	2,5	—

Подані вище розрахунки стосуються фінансової вигоди виробника віконних блоків у разі застосування ним пропонованої технології виготовлення.

Ринкові відносини передбачають паритетність вигоди продавця та покупця (споживача). Розглянемо можливу фінансову вигоду покупця – споживача віконних блоків. Підвищення довговічності продукції за збереження існуючої ціни не вигідне виробникам, оскільки означає для них скорочення обсягу споживання продукції. І навпаки, споживачі безпосередньо зацікавлені у покращенні таких властивостей продукції за ту ж ціну. У нашому випадку компроміс інтересів досягається повністю: виробник матиме нижчий рівень витрат, що компенсує йому умовне скорочення попиту за наявної ціни, а споживач реалізує свою вигоду через придбання продукції з довшим терміном експлуатації за ту ж саму ціну [54, 148].

Для розрахунку вигоди споживача нам потрібні такі параметри:

- середній фактичний гарантійний термін експлуатації віконних блоків (визначеного типу та опоряджених лаком) за ринковими даними їх виробників – 7 років;
- середнє можливе продовження терміну експлуатації завдяки дисертаційним пропозиціям – у 3 рази (до 21 року);
- цехова собівартість (оскільки ми маємо справу із незавершеним технологічним циклом) 1 віконного блоку – 5,44 тис. грн. (136032,7/25);
- відсоток дисконтування грошових потоків можна зменшити на величину інфляції, зазначену в попередніх розрахунках, оскільки ми не маємо її довгострокового прогнозу; це припустимо, бо інфляція, якою б вона не була, однаково вплине на всі компоненти розрахунків – 36,0 % (50,8 - 14,8); так само можна (на такий тривалий період) елімінувати ризики воєнного стану на такий тривалий період 26 % (36,0 - 10,0);

- коефіцієнт дисконтування для приведення майбутніх вигод споживача до розрахункового року –  $0,0078$  ( $1/(1,26)^{21}$ ), оскільки вигода споживача матиме місце не зараз, а лише через 21 рік;
- об'єм деревини, що витрачається на виготовлення 1 віконного блоку (за даними табл. 5.3) –  $0,163 \text{ м}^3$  ( $0,16 + 0,003$ ).

Тобто, зростання корисності продукції складе 14 років (21 - 7), а зростання ціни практично не відбудеться або дорівнюватиме нулю.

Вигода споживача від підвищення довговічності 1 вікна складе:

$$(14/7)*5,44 - 0 = 10,88 \text{ тис. грн.}$$

На річний обсяг реалізованої продукції (вважаємо, що обсяг випуску рівним обсягу реалізації) вигода складе:

$$25000 * 10,88 * 0,0078 = 2121,6 \text{ тис. грн.}$$

Цю вигоду можна подати не лише у грошовому виразі. Підвищення довговічності означає зменшення ринкової потреби у даній продукції. Оскільки продукція виготовляється з деревини, то можна обчислити об'єм останньої у  $\text{м}^3$ .

У натуральному виразі вигода (відмова від їх потреби) складе:

$$2121,6 / 5,44 = 390 \text{ вікон}$$

або

$$390 * 0,163 = 63,57 \text{ м}^3.$$

Для візуалізації розрахованих результатів подамо їх графічно (рис. 5.2).



Рис. 5.2 Вигоди споживачів від реалізації дисертаційних пропозицій

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливе наукове-практичне завдання із прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої, склеєної клеями на основі ПВА, яке має важливе значення для склеювання термічно модифікованої деревини та прогнозування міцності клейових з'єднань на її основі. Відповідно до проведених досліджень та їх аналізу зроблено такі висновки:

1. Згідно з аналізом літературних джерел встановлено, що клейові конструкції з термічно модифікованої і немодифікованої деревини є перспективними для виготовлення столярно-будівельних виробів. Особливостями даних конструкцій є технологічний процес склеювання та належна міцність під час експлуатації. Тому важливим є прогнозування міцності таких клейових з'єднань.

2. Припущено, що формування клейового з'єднання термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої супроводжується механічними, хімічними та дифузійними процесами між адгезивом та деревиною. Це відбувається через незворотні структурні зміни у термічно модифікованій деревині ясена в процесі термічної обробки.

3. Експериментальні дослідження міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями із класом довговічності D4 проводили двома методами – тривалим (природним) та пришвидшеним (лабораторним). Статистичну обробку отриманих результатів досліджень проводили відповідно до наявної методики.

4. На основі тривалих експериментальних досліджень встановлено, що міцність клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої за два роки випробувань у природних умовах зменшилась на 27,9%, а саме через: 3 місяці – на 11%, 6 місяців – на 7,8%, 9 місяців – на 15%, 12 місяців – 18%, 15 місяців – 17,5%, 18 місяців – 16,7%, 21 місяць –

21% і через 24 місяці – на 27,9%, від міцності контрольних зразків. У натуральних показниках міцність зменшилась від 7,12 МПа до 5,13 МПа.

5. На основі пришвидшених експериментальних досліджень встановлено, що міцність клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої після трьох етапів випробувань зменшилась на 45%, а саме після: першого – на 13%, другого – на 36%, та третього – на 45% від міцності контрольних зразків. У натуральних показниках міцність зменшилась від 7,12 МПа до 3,90 МПа.

6. Встановлено, що за результатами тривалих експериментальних досліджень характер руйнування зразків наступний: по клейовому з'єднанню – 54%, по термічно модифікованій деревині ясена – 23,5% та по немодифікованій деревині сосни – 22,5%. А за результатами пришвидшених досліджень: по клейовому з'єднанню – 74,7%, по термічно модифікованій деревині ясена – 16% та по немодифікованій деревині сосни – 9,3%.

7. За результатами тривалих експериментальних досліджень побудовано математичну модель прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясена та сосни немодифікованої, склеєної термопластичними полівінілацетатними клеями. Це дає змогу прогнозувати міцність таких клейових з'єднань з врахуванням властивостей деревини і клейової композиції та умов експлуатації. Достовірність результатів прогнозування міцності клейових з'єднань підтверджено експериментальними дослідженнями.

8. На основі запропонованих заходів розраховано економічний ефект використання клейової конструкції з термічно модифікованої деревини ясена та сосни немодифікованої, для виготовлення вікон, який за 3 роки у грошовому еквіваленті складе 628,7 тис. грн.. Результати роботи впроваджені у виробничі та навчальні процеси.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрашек Й.В., Максимів В.М., Петросюк О.М. Експериментальні дослідження кінцевої вологості термічно модифікованої деревини ясеня. Науковий вісник НЛТУ України, – Львів, 2019. №Вип. 29(2), 120-123. <https://doi.org/10.15421/40290224>.
2. Андрашек Й.В., Щупаківський Р.Б. Аналіз зміни механічних властивостей термічно модифікованої деревини клена (*Asper pseudoplatanus* L.) та ялини звичайної (*Picea abies* K.) шляхом дослідження її пористої структури. Науковий вісник НЛТУ: зб. наук. - техн. праць. – Львів : НЛТУ. – 2012. – Вип. 22.01. – С. 97-100.
3. Бехта П.А., Салабай Р.Г., Салабай І.І., Нощенко Г.В. Властивості карбамідоформальдегідних клеїв наповнених деревинним волокнистим шламом. Наукові праці Лісівничої академії наук України : зб. наук. праць НЛТУ України, Лісівнича академія наук України. – Львів : Камула, 2015. – №Вип. 13. – С.217-223.
4. Бехта П.А., Бехта Н.С., Кузьмин О.М. Термообробка деревини і деревних композиційних матеріалів. Наукові праці : зб. наук. праць Лісівничої академії наук України; наук. ред. П.Р. Третяк. – Львів : Вид-во Нац. ун-ту „Львів. політехн.”, 2005. – №Вип. 4. – С.124-131.
5. Бехта П.А., Козак Р.О., Кусняк І.І. Математичне моделювання процесу прогрівання пакета шпону, склеєного термопластичною плівкою. Науковий вісник НЛТУ України. 2020. Т. 30, №3. С. 93–98. DOI: <https://doi.org/10.36930/40300317>.
6. Бехта П.А., Кусняк І.І. Властивості фанери з використанням як клею термопластичної плівки. Наукові праці Лісівничої академії наук України. Львів, 2019. Вип. 19. С. 209–222. DOI: <https://doi.org/10.15421/411943>.
7. Бехта П.А., Кусняк І.І. Термопластичні полімери у виробництві фанерної продукції: переваги, можливості та перспективи застосування. Наукові праці Лісівничої академії наук України. Львів, 2018. Вип. 16. С. 131–140. DOI: <https://doi.org/10.15421/411815>.

8. Білик С.І. Про безпеку експлуатації будівель після вичерпання встановленого строку служби. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Вип. 38. – Одеса: ОДАБА, 2012. – С. 67-71.
9. Біць Г.Є. Біоклеї як альтернатива для надійного склеювання деревини. Науковий вісник : зб. наук.-техн. праць НЛТУ. – Львів, 2007. – №Вип. 17.4. – С.126-127.
10. Божок О.П., Вінтонів І.С. Деревинознавство з основами лісового товарознавства: Навчальний посібник. – К.: НМК ВО, 1992. – 320 с.
11. Вінтонів І.С., Сопушинський І. М., Вінтонів Р. В. Щільність деревини. Науковий вісник НЛТУ України, – Львів, 2012. – С. 62-66.
12. Вінтонів І.С., Сопушинський І. М., Тайшінгер А. Деревинознавство: навч. посіб:2-е вид., доповн. Львів: Апріорі. 2007. 321 с.
13. Войтович І.Г., Кійко В.С., Прокопович Б.В. Аналіз способів нанесення клею на шкантові з'єднання у деревообробленні. Науковий вісник : зб. наук.-техн. праць УкрДЛТУ. М-во освіти України, УкрДЛТУ. – Львів, 2002. – № Вип. 12.5 : Сучасні теоретичні розробки в деревообробному і меблевому виробництвах. – С.40-43.
14. Войтович І.Г. Основи технології виробів з деревини: підручник. Львів: ТЗОВ «Країна ангелів», 2010. 305 с.
15. Горбачова О.Ю., Мазурчук С.М. Дослідження ефективності додаткового оброблення поверхні. XI Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». Том 1. 26 – 27 травня 2021 р., м. Чернігів. С. 172.
16. Горбачова О.Ю. Термічне модифікування деревини граба: автореф. канд. техн. наук: спец. 05.23.06 – «Технологія деревообробки, виготовлення меблів та виробів з деревини». Київ, 2016. 24с.
17. Губер Ю.М., Ільків М.М., Гаврилюк Л.А. Експериментальні дослідження зміни кольору деревини ясеня в процесі вакуумно-кондуктивного термічного оброблення. Науковий вісник НЛТУ України : зб.

наук.-техн. праць НЛТУ України. – Львів : НЛТУ України, 2011. – №Вип. 21.8. – С.115-129.

18. Гупало О. П., Тушницький О. П. Хімія деревини. Підручник. – 2-ге вид., випр. і доп. – К.: Знання, 2008. – 276 с.

19. Дацків Г. М., Кшивецький Б. Я. Щодо методики склеювання термічно модифікованої деревини. ІХ Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» Том 1. 14 – 16 травня 2019 р., С. 211-212.

20. Дацків Г.М., Кшивецький Б.Я. Методика проведення експериментальних досліджень міцності з'єднань термічно модифікованої деревини клеями на основі ПВА. Х Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» Том 1. 29 – 30 квітня 2020 р., С. 202.

21. Дацків Г.М., Кшивецький Б.Я. Щодо пришвидшених експериментальних досліджень міцності клейового з'єднань термічно модифікованої деревини клеями на основі ПВА. ХІ Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» Том 1. 26 – 27 травня 2021 р., С. 175.

22. Дацків Г.М., Кшивецький Б.Я. Щодо результатів пришвидшених експериментальних досліджень міцності склеювання термічно модифікованої деревини клеями на основі ПВА. ХІІ Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» Том 1. 26 – 27 травня 2022 р., С. 168.

23. Дацків Г. М., Кшивецький Б. Я. Встановлення міцності клейових з'єднань термічно модифікованої та звичайної деревини із використанням різних методик. Науковий вісник НЛТУ України. 2022, т. 32, № 5. С. 63–68. <https://doi.org/10.36930/40320509>.

24. Дацків Г.М., Кшивецький Б.Я. Щодо зміни міцності з'єднань термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої при впливі природних факторів. ХІІІ Міжнародна науково-практична конференція

«Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» Том 1.  
25 – 26 травня 2023 р., м. Чернігів. С. 241-242.

25. Дебринюк Ю. М. Фізичні властивості деревини *Picea abies* [L.] Karst. Науковий вісник НЛТУ України. 2008. Вип. 18. 11. С. 10–21.

26. ДСТУ 4922:2008 Лісоматеріали та пилопродукція. Методи визначення вологості.

27. ДСТУ EN 205:2014 Клеї несиллові для деревини. Метод визначання міцності з'єднання внапусток під час поздовжнього розтягування на зсув (EN 205:2003, IDT).

28. ДСТУ EN 204:2014 Клеї термопластичні несиллові для деревини. Класифікація (EN 204:2001, IDT).

29. ДСТУ EN 336:2003 Пиломатеріали конструкційні із хвойних порід та тополі. Розміри. Допустимі відхилення (EN 336:1995, IDT).

30. ДСТУ EN 45501:2017 Метрологічні аспекти неавтоматичних зважувальних приладів (EN 45501:2015, IDT).

31. ДСТУ EN 1313-2:2018 Лісоматеріали круглі та пиляні. Допустимі відхилення та переважні розміри. Частина 2. Пиломатеріали твердолистяних порід (EN 1313-2:1998/AC:1999, IDT)

32. ДСТУ ISO 2431:2015. Фарби та лаки. Визначення часу витікання з використанням лійок (ISO 2431:2011, IDT).

33. Ільків М.М., Солонинка В.Р., Гуменюк Ж.Я., Губер Ю.М. Дослідження міцності клейових з'єднань термодеревини ясена, отриманої за технологією вакуумно-кондуктивного термічного оброблення. Науковий вісник НЛТУ України. – 2017. – Вип. 27(3). – С. 136–139.

34. Кійко О.А. Статистичні методи підвищення якості продукції деревооброблення. – Львів: електрон. навч. пос. – 228 с.

35. Коржик М. В. Моделювання об'єктів та систем керування засобами MatLab: навч. посіб. Для студ. вищ. навч. закл. / М. В. Коржик. – Київ : НТУУ “КПІ”, 2016. – 174 с. : іл.

36. Кусняк І.І. Екологічність фанери склеєної термопластичною плівкою. Сучасний рух науки: тези доп. X міжнар. наук.-практ. інтер.-конф., 2–3 квітня 2020 р. Дніпро: Міжнародний електронний науково-практичний журнал "WayScience", 2020. Т1. С. 660–664.

37. Кусняк І.І. Розроблення режимів склеювання шпону з використанням термопластичних полімерів: Дис...канд. техн. наук: 05.23.06. Л., 2020. - 172 с.

38. Кшивецький Б.Я., Гупало О.П. Проблеми використання клейових з'єднань на основі термопластичних клеїв. Науковий вісник УкрДЛТУ. – 2001. – Вип. 11.2.- С. 23-26.

39. Кшивецький Б.Я., Максимів В.М., Прокопович Б.В. Вплив вологості деревних матеріалів на міцність клейових з'єднань. Науковий вісник Національного аграрного університету. К. – 2002. - № 49. – С. 180-182.

40. Кшивецький Б.Я., Гупало О.П., Ацбергер Й.Л. Дослідження зміни міцності з'єднань деревини берези клеями на основі ПВА. Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук-техн. праць. Львів: РВЦ НЛТУ України. – 2005. – Вип. 15.5. – С. 186-189.

41. Кшивецький Б.Я. Дослідження міцності та довговічності з'єднань шпилькових порід деревини залежно від вологості. Науковий вісник НЛТУ України. – 2006. – Вип. 16.5. – С. 126-130.

42. Кшивецький Б.Я. Дослідження міцності з'єднань шпилькових порід деревини залежно від знакозмінних навантажень. Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук-техн. праць. Львів: РВЦ НЛТУ України. – 2006. – Вип. 16.7. – С. 98-102.

43. Кшивецький Б.Я. Дослідження міцності та довговічності з'єднань твердолистяних порід деревини залежно від вологості. Науковий вісник НЛТУ України. – 2007. – Вип. 17.1. – С. 107-111.

44. Кшивецький Б.Я., Солонинка В.Р. Термопластичні композиції на основі полівінілацетату (ПВА) та їх використання в деревообробній галузі / Науковий вісник НЛТУ України. – 2007. – Вип. 17.6. – С. 92-95.

45. Кшивецький Б.Я. Механізм формування термопластичних клейових з'єднань деревини. Науковий вісник НЛТУ України. Львів. – 2012. – Вип. 22.12. – С. 117-122.
46. Кшивецький Б.Я., Тивунька І.Й. Міцність та довговічність термопластичних клейових з'єднань деревини: монографія. – Львів : ТЗОВ Галицька видавнича спілка, 2018. – 232с.
47. Кшивецький Б.Я. Прогнозування довговічності з'єднань деревини клеями на термопластичній основі. Дис док.. техн. наук: 05.23.06. Львів, 2013. 315с.
48. Кшивецький Б.Я., Дацків Г.М., Андрашек Й.В. Загальні відомості про клеї, склеювання та термічно модифіковану деревину. Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук-техн. праць. Львів: РВВ НЛТУ України. – 2019. Т. 25.9, №3 – С. 81-85.
49. Максимів В.М., Андрашек Й.В., Щупаківський Р.Б. Використання методу високочастотної денситометрії для оцінки зміни щільності деревини дуба при термічному модифікуванні в середовищі вуглекислого газу. наукові праці Лісівничої академії наук України: зб. наук. - техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2012. – вип.10 – С.83-90.
50. М'якуш Б.М. Формування міцності та формостійкості паркетної дошки, склеєної термопластичними клеями : дис...канд. тех. наук : 05.23.06 / Національний лісотехнічний університет України. Львів, 2021. – 164 с.
51. Моделювання динамічних систем у Matlab. Електронний навчальний посібник. – Київ: НТУУ "КПІ", 2011. – 421 с.
52. Пилипчик М.І., Григор'єв А.С., Шостак В.В. Основи наукових досліджень. Київ: Знання, 2007. 207 с.
53. Сопушинський І.М., Вінтонів І.С. Пористість та властивості деревини ясена звичайного. Український ліс. – 2017. – № 2. – С.34-39.
54. Термодеревина: технологія, застосування, перспективи: [Інтернет ресурс]. URL: <https://derevynnyk.com/termoderevyna-tehnologiya-zastosuvannya-perspektyvy/>.

55. Тлумачний словник з деревооброблення / уклад.: Б. Прокопович, І. Войтович, С. Гайда, Б. Кшивецький. – Львів.: Ромус-Поліграф, 2002. – 280 с.
56. Щупаківський Р.Б. Закономірності термічного модифікування деревини дуба у вуглекислому газі: дис. канд. тех. наук: 05.23.06. – Львів, 2013. – 164 с.
57. Юськевич Т.В., Тереля І.П. Щільність деревини лісових хвойних видів України. Науковий вісник НЛТУ України. – 2013. – С. 27-31.
58. Afshar R. Characterisation of Mechanical Properties of Wood: Size Effect. Theoretical Analyses, Computations, and Experiments of Multiscale Materials, A Tribute to Francesco dell'Isola: 659-669. – 2022. DOI:10.1007/978-3-031-04548-6\_30.
59. Alen R. Structure and Chemical Composition of Wood, January 2000.
60. Andrashek J. V., Petrosiyk O.M, The methods of imhpregnation and thermal modification of the wood Woodworking Industry. Collection of scientific and technical works. – Lviv: UNFU. – 2019, pub. 39.1. – P. 157-160.
61. Andromachi M., Ekaterini R. Adhesive bond performance of heat-treated fir wood (*Abies Borrissiregis*). Wood Research 63(5):909-916. – 2018.
62. Bächle H, Zimmer B, Windeisen E, Wegener G. Evaluation of thermally modified beech and spruce wood and their properties by FT-NIR spectroscopy. Wood Science and Technology 44(3):421-433, 2010.
63. Barlović N., Čavlović A.O., Pervan S., Klarić M. Chemical Changes and Environmental Issues of Heat Treatment of Wood. Drvna Industrija 73(2):245-251. – 2022. DOI:10.5552/drvind.2022.0005.
64. Bekhta P., Niemz P. Effect of temperature on color and strength of spruce wood, Holzforschung 57, 2003, P. 539–546.
65. Biazzon J.C., Junior M.L., Munis R., Araujo V. Shear Strength of Eucalyptus saligna Wood Joints Bonded with Polyvinyl Acetate Adhesive. Bioresources 14(2):4590-4602. – 2019. DOI:10.15376/biores.14.2.4590-4602.
66. Bosshard H.H. Holzkunde: Zur Biologie, Physik, und Chemie des Holzes. – Basel-Boston-Studgart: Birkhaeuser Verlag, 1984. – Band 2. – 312 S.

67. Bourgois J., Guyonnet R. Characterisation and analysis of torrefied wood. *Wood Sci. Technol.* 22, 1988, P. 143-155.
68. Budhe S., Banea M.D., Ghugal S., Barros S. Effects of heat treatment on the behavior of teak wood adherends bonded joints. *Applied Adhesion Science* 8(1). 2020. DOI:10.1186/s40563-020-00124-5.
69. Burdurlu E., Kiliç Y., Elibol G.C., Kilic M. The shear strength of Calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) bonded with polyurethane and polyvinyl acetate adhesives. *Journal of Applied Polymer Science* 99(6):3050 – 3061. March 2006. – DOI:10.1002/app.22905
70. Burmester A. Dimensional stabilisation of wood. International Research Group on Wood Preservation, Doc. No. IRG/WP 3171, 1981.
71. Callum A.S. Hill. *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. School of Agricultural and Forest Sciences, University of Wales, Bangor. – 2006.
72. Callum A.S. Hill. Why does acetylation protect wood from microbiological attack? *Wood Material Science and Engineering* 4 (1-2). 2009. P 37-45.
73. Callum A. S. Hill, Altgen M., Rautkari L. Thermal modification of wood—a review: chemical changes and hygroscopicity. *Journal of Materials Science* 56(11). 2021. DOI:10.1007/s10853-020-05722-z.
74. Can A., Krystofiak T., Lis B. Shear and adhesion strength of open and closed system heat-treated wood samples. *Maderas, Cienc. tecnol.* vol.23 Epub 20-Abr-2021 <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2021000100432>.
75. Candelier K., Hannouz S., Thévenon M.F., Guibal D., Gérardin P., Pétrissans M., Collet R. “Resistance of thermally modified ash (*Fraxinus excelsior* L.) wood under steam pressure against rot fungi, soil-inhabiting micro-organisms and termites,” *European Journal of Wood and Wood Products* 75(2), 2017. P. 249-262. DOI: 10.1007/s00107-016-1126-y.
76. Cao Y., Gao J., Zhang C., Tsang D., Fan J., James H. Clark, Luo G., Zhu X., Zhang S.. Fast and Selective Production of Aromatics via Efficient Lignin

Depolymerization: Critical Factors and Mechanism Studies. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 2022, 10 (46), 15273-15283. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c05018>.

77. Chang C.-W., Kuo W.-L., Lu K.-T. On the Effect of Heat Treatments on the Adhesion, Finishing and Decay Resistance of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) and Formosa acacia (*Acacia confusa* Merr.(Leguminosae)). *Forests* 10(7):586. 2019. DOI:10.3390/f10070586.

78. Cronin D., Schmidt A.J., Billing J., Hart T.R., Fox S.P., Fonoll X., Norton J., Thorson M.R. Comparative Study on the Continuous Flow Hydrothermal Liquefaction of Various Wet-Waste Feedstock Types. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 2022, 10 (3), 1256-1266.

79. Datskiv H., Kshyvetsky B. Results of experimental studies on the strength of adhesive-bonded joints of thermally modified ash wood. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*. Vol. 14, No. 1, 2023 c. 27- 38.4. <https://doi.org/10.31548/forest/1.2023.27>.

80. Kshyvetsky B.Y, Datskiv H.M. Strength of adhesive joints of thermally modified ash wood glued with polyvinyl acetate - based adhesives. *Drewno. Prace naukowe. Doniesienia. Komunikaty*. 2023, 66 (211): 5-8. <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.XXX.XX>

81. DIN EN 14257:2006. Adhesives - Wood Adhesives - Determination Of Tensile Strength Of Lap Joints At Elevated Temperature (WATT'91); German Version EN 14257:2006.

82. Dirol D., Guyonnet R. (1993). Durability by rectification process. In: International Research Group Wood Pre, Section 4-Processes, N IRG/WP 93-40015

83. Dunky M. Adhesives in the Wood Industry. August 2003. DOI:10.1201/9780203912225.ch47.

84. Eckelmann, C.A. A Brief Survey of Wood Adhesives, (2017) <https://extension.purdue.edu/extmedia/FNR/FNR-154.pdf> ).

85. Esteves B., Pereira H. Wood modification by heat treatment: A review . // *Bioresources* 4(1):370-404 - February 2009. – DOI:10.15376/biores.4.1.370-404.
86. Fengel D., Wegener G. *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions.* Walter DeGruyter, Berlin, Germany. – 1989.
87. Findlay W.P.K. Preservative methods, In book: *Preservation of timber in the tropics* (pp.43-57), January 1985. DOI:10.1007/978-94-017-2752-5\_3.
88. Gerardin P., Petric M., Petrissans M., Lambert J., Ehrhardt, J. “Evolution of wood surface free energy after heat treatment,” *Polymer Degrad. Stabil.* 92. – 2007. P. 653-657.
89. Giridhar B.N., Pandey K.K. *Wood Modification for Wood Protection.* *Science of Wood Degradation and its Protection.* – 2022. (pp.647-663). DOI:10.1007/978-981-16-8797-6\_19.
90. Hill C., Altgen M., Rautkari L. Thermal modification of wood – a review: chemical changes and hygroscopicity. *Journal of Materials Science*, 56, 6581-6614, 2021. doi: [10.1007/s10853-020-05722-z](https://doi.org/10.1007/s10853-020-05722-z).
91. Gunduz G., Aydemir D. The influence of mass loss on the mechanical properties of heat-treated black pine wood, *Wood Research* 54(4).– 2009. P. 33-42.
92. Inari G.N., Petrissans M., Gerardin P. Chemical reactivity of heat-treated wood. *Wood Science and Technology* 41. – 2007. P. 157-168. <https://doi.org/10.1007/s00226-006-0092-7>.
93. Jones D., Callum A.S. Hill. Wood modification - a brief overview of the technology. In: *Proceedings of the “5th COST E34 International Workshop”* (Sernek M ed). Bled (Slovenia) 6-7 Sept 2007. University of Ljubljana, Slovenia, pp. 1-9.
94. Jones D., Sandberg D. A Review of Wood Modification Globally – Updated Findings from COST FP1407. *Interdisciplinary Perspectives on the Built Environment (IPBE)*, 2020, 1, 1-31. doi: [10.37947/ipbe.2020.voll.1](https://doi.org/10.37947/ipbe.2020.voll.1).
95. Kaboorani A., Faezipour M. Effects of Wood Preheat Treatment on Thermal Stability of HDPE Composites. December 2009 *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 28(24):2945-2009. DOI:10.1177/0731684408094064.

96. Kariz M., Sernek M. Bonding of heat-treated spruce with phenol formaldehyde adhesive. *Journal of Adhesion Science and Technology* 24(8), - 2010. P. 1703-1716. DOI: 10.1163/016942410X507768.
97. Kol H.S. Ozbay G. Adhesive bond performance of heat-treated wood at various conditions. *Journal of Environmental Biology* 37(4):557-564.- July 2016.
98. Kol H.S., Ozbay G., Altun S. Shear strength of heat-treated tali (*Erythrophleum ivorense*) and iroko (*Chlorophora excelsa*) woods, bonded with various adhesives. *BioResources* 4(4), - 2009. P. 1545-1554.
99. Kollmann F., Schneider A. "On the sorption behaviour of heat stabilized wood," *Holz Roh-Werkst.* 21(3). – 1963. P. 77-85.
100. Korkut S. The effects of heat treatment on some technological properties in Uludağ fir (*Abies bornmuelleriana* Mattf.) wood. *Building and Environment* 43(4). – 2007. P. 422-426. DOI:10.1016/j.buildenv.2007.01.004.
101. Korkut S., Budakci M. Effect of high-temperature treatment on the mechanical properties of Rowan (*Sorbus aucuparia* L.) wood. *Dry Technol* 27. – 2009. P. 1240-1247. <https://doi.org/10.1080/07373930903267161>.
102. Kozakiewicz P., Drożdżek M., Laskowska A.K., Grzeskiewicz M. Chemical Composition as a Factor Affecting the Mechanical Properties of Thermally Modified Black Poplar (*Populus nigra* L.). *Bioresources* 15(2):3915-3929. – 2020. DOI:10.15376/biores.15.2.3915-3929.
103. Král P., Klímek P., Děcký D. Comparison of the bond strength of oak (*Quercus* L.) and beech (*Fagus sylvatica* L.) wood glued with different adhesives considering various hydrothermal exposures. *Journal of Forest Science* 61(5). – 2015. P. 189-192. DOI:10.17221/95/2014-JFS.
104. Kristak L., Réh R., Kubovský I. New Challenges in Wood and Wood-Based Materials. *Polymers* 13(15). – 2021. P. 2538. DOI:10.3390/polym13152538.
105. Krystofiak T., Lis B., Muszyńska M., Sobota K. Gluability of thermally modified ash wood with EPI adhesives. Conference: Characterization of Modified Wood in Relation to Wood Bonding and Coating Performance At: Zreče, Rogla, SLOVENIA. – 2013. DOI:10.13140/2.1.2201.6961.

106. Krzysik F. Nauka o drewnie. – Warszawa, 1978. – 653 s.

107. Kumar A., Srivastava R. Rose-like Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub> Nanostructure for Visible-Light-Assisted Oxidation of Lignocellulose-Derived 5-Hydroxymethylfurfural and Vanillyl Alcohol. ACS Applied Nano Materials 2021, 4 (9), 9080-9093. <https://doi.org/10.1021/acsnm.1c01679>.

108. Łebkowska M., Załęska-Radziwiłł M., Tabernacka A. Adhesives based on formaldehyde – environmental problems. BioTechnologia 1(1):53-65, 2017. DOI:10.5114/bta.2017.66617.

109. Li Y., Case S.W., Lattimer B.Y. Measurement and modelling of thermal and physical properties of wood construction materials. Construction and Building Materials 284(1):122780. – 2021. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.122780.

110. Maksymiv V.M., Andrashek J. V., Shchupakivskyy R.B., Bilyk S.I. Statistical simulation of wood density changes due to thermal treatment in carbon dioxide atmosphere. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry. Collection of scientific and technical works. – Lviv: NUFWT of Ukraine. – 2012, pub. 38 – P. 56-61.

111. Mayes D., Oksanen O. Thermowood Handbook, Finnforest, Finland. – 2002.

112. Mazri S., Benotmane B. Chemical characterization of sapwood and heartwood of *Fraxinus angustifolia* growing in Algeria, November 2021 Journal of Wood Chemistry and Technology. DOI:10.1080/02773813.2021.2004165.

113. Moliński W., Roszyk E., Jabłoński A., Puszyński J. Mechanical parameters of thermally modified ash wood determined by compression in radial direction. Maderas: Ciencia y Tecnologia 18(ahead):577-586 - July 2016. – DOI: [10.4067/S0718-221X2016005000050](https://doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000050).

114. Navi P., Sandberg D. Thermo hydro mechanical processing of wood. – 2012. EPFL Press, Lausanne, Switzerland, pp. 376.

115. Noether D., Noether H. Encyclopedia Dictionary of Chemical Technology. Wiley (December 8, 1992). p. 297. ISBN-13: 978-0471186946.

116. Nuopponen M., Vuorinen T., Jamsä S., Viitaniemi P. Thermal modifications in softwood studied by FTIR and UV resonance Raman spectroscopies, *Journal of Wood Chemistry and Technology* 24(1), 2004, 13-26. DOI: 10.1081/WCT-120035941.

117. Präßler J., Gebhardt M., Elsner P. Adhesives and glues. January 2012. DOI: [10.1007/978-3-642-02035-3\\_59](https://doi.org/10.1007/978-3-642-02035-3_59).

118. Pavlo B., Niemz P. Effect of temperature on color and strength of spruce wood, *Holzforschung* 57(5). – 2003. P. 539-546.

119. Palonna T.A., Bokovnia A.O., Serhiienko O.A. Product quality and methods of its evaluation. December 2021. Proceedings of Scientific Works of Cherkasy State Technological University Series Economic Sciences. DOI: [10.24025/2306-4420.63.2021.249031](https://doi.org/10.24025/2306-4420.63.2021.249031).

120. Pfriem A., Zauer M., Wagenführ A. Alteration of the pore structure of spruce (*Picea abies* (L) Karst) and maple (*Acer pseudoplatanus* L) due to thermal treatment as determined by helium pycnometry and mercury intrusion porosimetr, *Holzforschung*. - 2009, 63:94–98.

121. Ramage M.H, Burrige H, Busse-Wicher M, et al. The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 68:333–359. Doi: 10.1016/j.rser.2016.09.107.

122. Repič R., Pondelak A., Kržišnik D., Humar M., Škapin A.S. Combining mineralisation and thermal modification to improve the fungal durability of selected wood species. *Journal of cleaner production* V. 351. – 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131530>.

123. Rowell R.M. Chemical modification of wood: a review. Commonwealth Forestry Bureau, Oxford, UK, 1983. – vol. 6, pp. 363-382.

124. Rowell R.M. Handbook of wood chemistry and wood composites (2nd edn). CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL, USA, pp. 703. – 2012.

125. Rowell R.M. Dimensional stability and fungal durability of acetylated wood. *Drewno* 59 (197): 139-150. – 2016.

126. Rusakov D., Sokolova E., Varankina G., Chubinsky A. Research of strength of gluing of wood. IOP Conference Series Earth and Environmental Science 574(1):012070, 2020. DOI:10.1088/1755-1315/574/1/012070.

127. Sandberg D., Kutnar A., Mantanis G. Wood modification technologies - a review. // iForest - Biogeosciences and Forestry, Volume 10, Issue 6, Pages 895-908. December 2017. doi: <https://doi.org/10.3832/ifor2380-010>.

128. Sandoval-Torres S., Jomaa W., Françoise Marc, Puiggali, J.-R. Colour alteration and chemistry changes in oak wood (*Quercus pedunculata* Ehrh) during plain vacuum drying. Wood Science and Technology 46 (1-3). – 2012. P. 177-191. DOI:10.1007/s00226-010-0381-z.

129. Šatanová A., Figuli L., Sedliačiková M. Optimization of Production Process through Selected Statistical Methods. December 2015. Procedia Economics and Finance 23:959-963. DOI:10.1016/S2212-5671(15)00494-3.

130. Sedliačik J., Šmidriaková M. Heat resistance of adhesive joints for wood constructions. January 2012. Acta Facultatis Xylogologiae 54(2):79-94.

131. Sernek M., Boonstra M., Pizzi A., Despres A., Gérardin P. Bonding performance of heat treated wood with structural adhesive. Holz als Roh- und Werkstoff, 66(3). – 2008. P. 173-180. DOI: 10.1007/s00107-007-0218-0.

132. Shchupakivskyy R., Clauder L., Linke N., Pfriem A. Application of high-frequency densitometry to detect changes in early- and latewood density of oak (*Quercus robur* L.) due to thermal modification. European Journal of Wood and Wood Products volume 72, p. 5–10, 2013. DOI: [10.1007/s00107-013-0744-x](https://doi.org/10.1007/s00107-013-0744-x).

133. Shebani A., Reenen A., Meincken M. The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood species. May 2008 Thermochemica Acta 471(1):43-50. DOI:10.1016/j.tca.2008.02.020.

134. Sivonen H., Maunu S., Sundholm F., Jämsä S., Viitaniemi P. Magnetic resonance studies of thermally modified wood. Holzforschung 56(6). – 2002. P. 648-654.

135. Sogutlu C., Dongel N. Tensile shear strengths of some local woods bonded with polyvinyl acetate and polyurethane adhesives. *Journal of Polytechnic* 10(3), 287-293. DOI: 10.2339/2007.10.3.287-293 – 2007.
136. Stevanovic T. Chemical Composition and Properties of Wood. In book: *Lignocellulosic Fibers and Wood Handbook: Renewable Materials for Today's Environment* (pp.49-106). April 2016. DOI:10.1002/9781118773727.
137. Subramanya S. M., Rios N., Kollar A., Stofanak R., Maloney K., Waltz K., Powers L. Chinmayee Rane, Phillip E. Savage. Statistical Models for Predicting Oil Composition from Hydrothermal Liquefaction of Biomass. *Energy & Fuels* 2023, 37 (9), 6619-6628. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c00297>.
138. Taghiyari H.R. Effects of heat-treatment on permeability of untreated and nanosilver-impregnated native hardwoods. *Maderas-Cienc Tecnol* 15(2). – 2013. P. 183-194. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2013005000015>.
139. Taghiyari H.R., Esmailpour A., Adamopoulos S., Zereshki K. Shear strength of heat-treated solid wood bonded with polyvinyl-acetate reinforced by nanowollastonite. *Wood Research* 65(2). – 2020. P. 183-194. DOI:10.37763/wr.1336-4561/65.2.183194.
140. Tai L., Caprariis B., Scarsella M., Filippis P., Marra F. Improved Quality Bio-Crude from Hydrothermal Liquefaction of Oak Wood Assisted by Zero-Valent Metals. *Energy & Fuels* 2021, 35 (12), 10023-10034. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c00889>.
141. *ThermoWood: Handbook – Helsinki*. 2003. FINLAND: International ThermoWood Association.
142. Tiryaki S., Bardak S., Bardak T. Experimental investigation and prediction of bonding strength of Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) bonded with polyvinyl acetate adhesive, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 29:23. – 2015. P. 2521-2536, DOI: 10.1080/01694243.2015.1072989.
143. Tjeerdsma B., Militz H. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. *Holz als Roh- und Werkst* 63(2). – 2005. P. 102-111.

144. Tjeerdsma F., Boonstra M., Pizzi A., Militz H. Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. *Holz Roh Werkst.* 56:1 49-1 53. – 1998.

145. Tumen I., Aydemir D., Gündüz G., Uner B. Changes in the chemical structure of thermally treated wood. *Bioresources* 5(3). – 2010. P. 1936-1944. DOI:10.15376/biores.5.3.1936-1944.

146. Ülker O. Wood Adhesives and Bonding Theory. Adhesives - Applications and Properties. November 2016. DOI:10.5772/65759.

147. Uzun O., Percin O., Altınok M., Kureli I. Bonding strength of some adhesives in heat-treated hornbeam (*Carpinus betulus* L.) wood used of interior and exterior decoration, *BioRes.* 11(3), 7686-7696. – 2016.

148. VELUX: [Інтернет ресурс]. URL:[https://www.velux.ua/uk-ua/products/mansardni\\_vikna/premium-top-operated-classic-ggl](https://www.velux.ua/uk-ua/products/mansardni_vikna/premium-top-operated-classic-ggl).

149. Vidholdová Z., Ciglian D., Reinprecht L. Bonding of the thermally modified norway spruce wood with the pur and pvac adhesives. – 2021. DOI:10.17423/afx.2021.63.1.06.

150. Vybohova E., Kučerová V., Andor T., Balazova Z. The Effect of Heat Treatment on the Chemical Composition of Ash Wood. September 2018 *BioResources* 13(4). DOI:10.15376/biores.13.4.8394-8408.

151. Wang D., Lin L., Fu F. Molecular-level characterization of changes in the mechanical properties of wood in response to thermal treatment. *Cellulose* 29(6). – 2022. DOI:10.1007/s10570-022-04471-3.

152. Weiland J.; Guyonnet R. Study of chemical modifications and fungi degradation of heatly modified wood using DRIFT spectroscopy. *Holz als Roh und Werkst* 61(3). – 2003. P. 216-220.

153. Welzbacher C.R., Brischke A.O., Rapp1 S., Koch S. Hofer Performance of Thermally modified timber (TMT) in outdoor application - durability, abrasion and optical appearance. In: *Drvna Industrija* 60 (2009), Nr. 2, S. 75-82.

154. Willems W., Altgen M., Rautkari L. A molecular model for reversible and irreversible hygroscopicity changes by thermal wood modification. *Holzforschung* 74(4). – 2019. P. 420-425. [DOI:10.1515/hf-2019-0057](https://doi.org/10.1515/hf-2019-0057).
155. Winandy J.E., Rowell M.R. Chemistry of wood strength. In: *Wood Chemistry and Wood Composites*. Ed. Rowell, M.R. Taylor & Francis, Boca Raton, FL. – 2005. pp. 303-347.
156. Windeisen E, Wegener G, Bächle H, Zimmer B. Relations between the chemical changes and mechanical properties of thermally treated wood. *Holzforschung* 63. – 2009. P. 773–778.
157. Zelinka S.L., Altgen M., Emmerich L., Guigo N. Review of wood modification and wood functionalization technologies. *Forests*, 13(7), 2022, article number 1004. <https://doi.org/10.3390/f13071004>.
158. Zhang X, Li L, Xu F. Chemical Characteristics of Wood Cell Wall with an Emphasis on Ultrastructure: A Mini-Review. *Forests*. 2022; 13(3):439. <https://doi.org/10.3390/f13030439>.
159. Zhang B., Biswal B. K., Zhang J., Balasubramanian R. Hydrothermal Treatment of Biomass Feedstocks for Sustainable Production of Chemicals, Fuels, and Materials: Progress and Perspectives. *Chemical Reviews* 2023, 123 (11) , 7193-7294. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00673>.
160. Zigon J., Wålinder M., Moghaddam M.S. Wettability and surface interactions of natural and thermally modified beech wood with water and water-based coatings: the effect of surface pre-treatment type. *European Journal of Wood and Wood Products* 81(4). – 2022. [DOI: 10.1007/s00107-022-01875-7](https://doi.org/10.1007/s00107-022-01875-7).

## ДОДАТКИ

## Додаток А

Таблиця А. 1 – Міцність термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої

Всі зразки, які піддавали руйнуванню.					
№ п/п	Навантаження, F max, кН	Довжина, l, мм	Ширина, b, мм	Міцність, $\sigma$ , МПа	Характер руйнування
1	1,41	10	20	7,05	к.
2	1,31	10	20	6,55	с.
3	1,65	10	20	8,25	я.
4	1,35	10	20	6,75	к.
5	1,20	10	20	6,00	к.
6	1,37	10	20	6,85	к.
7	1,45	10	20	7,25	к.
8	1,40	10	20	7,00	я.
9	1,53	10	20	7,65	к.
10	1,53	10	20	7,65	к.
11	1,35	10	20	6,75	с.
12	1,20	10	20	6,00	я.
13	1,60	10	20	8,00	к.
14	1,45	10	20	7,25	к.
15	1,67	10	20	8,35	к.
16	1,38	10	20	6,90	с.
17	1,31	10	20	6,55	с.
18	1,45	10	20	7,25	я.
19	1,28	10	20	6,40	к.
20	1,52	10	19	8,00	к.
21	1,51	10	20	7,55	я.
22	1,39	10	20	6,95	к.
23	1,36	10	20	6,78	к.
24	1,39	10	20	6,95	к.
25	1,45	10	20	7,25	к.

Таблиця А. 2 – Міцність термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після трьох місяців випробувань у природних умовах

Всі зразки, які піддавали руйнуванню.					
№ п/п	Навантаження, F max, кН	Довжина, l, мм	Ширина, b, мм	Міцність, $\sigma$ , (МПа)	Характер руйнування
1	1,19	10	20	5,95	к.
2	1,38	10	20	6,90	к.
3	1,13	10	20	5,63	с.
4	1,17	10	20	5,85	с.
5	1,28	10	20	6,38	к.
6	1,25	10	20	6,25	к.
7	1,37	10	20	6,85	к.
8	1,25	10	20	6,25	к.
9	1,31	10	20	6,55	я.
10	1,44	10	20	7,20	я.
11	1,25	10	20	6,25	к.
12	1,23	10	20	6,15	я.
13	1,00	10	20	5,00	с.
14	1,30	10	20	6,50	к.
15	1,16	10	20	5,80	я.
16	1,05	10	20	5,25	с.
17	1,25	10	20	6,25	к.
18	1,35	10	19	7,11	к.
19	1,14	10	20	5,70	с.
20	1,35	10	19	7,11	к.
21	1,10	10	20	5,50	с.
22	1,24	10	20	6,20	я.
23	1,36	10	20	6,80	к.
24	1,51	10	20	7,55	к.
25	1,50	10	20	7,50	я.

Таблиця А. 3 – Міцність термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після шести місяців випробувань у природних умовах

Всі зразки, які піддавали руйнуванню.					
№ п/п	Навантаження, F max, кН	Довжина, l, мм	Ширина, b, мм	Міцність, $\sigma$ , (МПа)	Характер руйнування
1	1,20	10	20	6,00	к.
2	1,23	10	20	6,15	к.
3	1,25	10	20	6,25	к.
4	1,60	10	20	8,00	я.
5	1,35	10	20	6,75	к.
6	1,37	10	20	6,85	к.
7	1,08	10	20	5,40	с.
8	1,35	10	20	6,75	с.
9	1,12	10	20	5,60	с.
10	1,35	10	20	6,75	к.
11	1,10	10	20	5,50	с.
12	1,47	10	20	7,35	я.
13	1,20	10	20	6,00	к.
14	1,55	10	20	7,75	я.
15	1,42	10	20	7,10	к.
16	1,42	10	20	7,10	к.
17	1,65	10	20	8,25	я.
18	1,32	10	20	6,60	к.
19	1,00	10	20	5,00	с.
20	1,30	10	20	6,50	к.
21	1,24	10	20	6,20	с.
22	1,15	10	20	5,75	к.
23	1,55	10	20	7,75	я.
24	1,30	10	20	6,50	к.
25	1,25	10	20	6,25	к.

Таблиця А. 4 – Міцність термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після дев'яти місяців випробувань у природних умовах

Всі зразки, які піддавали руйнуванню.					
№ п/п	Навантаження, F max, кН	Довжина, l, мм	Ширина, b, мм	Міцність, $\sigma$ , (МПа)	Характер руйнування
1	0,96	10	20	4,80	к.
2	1,25	10	20	6,25	к.
3	0,95	10	20	4,75	к.
4	1,00	10	20	5,00	к.
5	1,25	10	20	6,25	я.
6	1,40	10	19	7,37	к.
7	0,90	10	19	4,74	с.
8	1,55	10	20	7,75	я.
9	1,10	10	20	5,50	с.
10	0,95	10	20	4,75	с.
11	1,05	10	20	5,25	с.
12	1,40	10	20	7,00	к.
13	0,90	10	20	4,50	с.
14	1,35	10	20	6,75	к.
15	1,35	10	20	6,75	к.
16	0,95	10	20	4,75	с.
17	1,45	10	20	7,25	я.
18	1,55	10	20	7,75	к.
19	0,95	10	20	4,75	с.
20	1,15	10	20	5,75	с.
21	1,40	10	20	7,00	к.
22	1,20	10	20	6,00	я.
23	1,50	10	20	7,50	к.
24	1,25	10	20	6,25	к.
25	1,35	10	20	6,75	к.

Таблиця А. 5 – Міцність термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після дванадцяти місяців випробувань у природних умовах

Всі зразки, які піддавали руйнуванню.					
№ п/п	Навантаження, F max, кН	Довжина, l, мм	Ширина, b, мм	Міцність, $\sigma$ , (МПа)	Характер руйнування
1	1,00	10	20	5,00	с.
2	1,10	10	20	5,50	я.
3	1,45	10	19	7,63	к.
4	1,33	10	20	6,65	к.
5	1,10	10	20	5,50	с.
6	1,10	10	20	5,50	к.
7	1,40	10	20	7,00	к.
8	1,40	10	20	7,00	к.
9	1,30	10	20	6,50	к.
10	0,95	10	20	4,75	я.
11	1,40	10	20	7,00	к.
12	0,80	10	20	4,00	с.
13	1,10	10	20	5,50	к.
14	1,30	10	20	6,50	к.
15	0,90	10	20	4,50	я.
16	1,20	10	20	6,00	к.
17	1,05	10	20	5,25	я.
18	0,80	10	19	4,21	с.
19	1,20	10	20	6,00	к.
20	1,25	10	20	6,25	к.
21	1,25	10	20	6,25	к.
22	0,95	10	20	4,75	к.
23	1,45	10	20	7,25	к.
24	1,09	10	20	5,45	к.
25	1,05	10	20	5,25	к.

Таблиця А. 6 – Міцність термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після п'ятнадцяти місяців випробувань у природних умовах

Всі зразки, які піддавали руйнуванню.					
№ п/п	Навантаження, F max, кН	Довжина, l, мм	Ширина, b, мм	Міцність, $\sigma$ , (МПа)	Характер руйнування
1	1,11	10	20	5,55	я.
2	0,96	10	20	4,80	с.
3	1,35	10	20	6,75	к.
4	1,16	10	20	5,80	я.
5	1,06	10	20	5,30	с.
6	1,12	10	20	5,60	к.
7	1,40	10	20	7,00	к.
8	1,21	10	20	6,05	к.
9	1,15	10	20	5,75	я.
10	1,19	10	20	5,95	к.
11	1,15	10	20	5,75	к.
12	0,94	10	20	4,70	с.
13	1,13	10	20	5,65	я.
14	1,25	10	20	6,25	к.
15	1,30	10	20	6,50	к.
16	1,10	10	20	5,50	с.
17	1,25	10	20	6,25	к.
18	1,21	10	20	6,05	я.
19	1,33	10	20	6,65	к.
20	1,05	10	20	5,25	я.
21	1,16	10	20	5,80	к.
22	1,23	10	20	6,15	к.
23	1,33	10	20	6,65	к.
24	1,22	10	20	6,10	с.
25	1,01	10	20	5,05	с.

Таблиця А. 7 – Міцність термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після вісімнадцяти місяців випробувань у природних умовах

Всі зразки, які піддавали руйнуванню.					
№ п/п	Навантаження, F max, кН	Довжина, l, мм	Ширина, b, мм	Міцність, $\sigma$ , (МПа)	Характер руйнування
1	0,95	10	20	4,75	с.
2	1,36	10	20	6,80	я.
3	1,10	10	20	5,50	к.
4	1,35	10	20	6,75	к.
5	1,10	10	20	5,50	с.
6	1,15	10	20	5,75	к.
7	1,30	10	20	6,50	к.
8	1,08	10	20	5,40	с.
9	1,15	10	20	5,75	к.
10	1,05	10	20	5,25	я.
11	1,45	10	20	7,25	к.
12	1,15	10	20	5,75	к.
13	1,40	10	20	7,00	к.
14	1,07	10	20	5,35	я.
15	1,05	10	20	5,25	я.
16	1,30	10	20	6,50	к.
17	1,25	10	20	6,25	я.
18	1,30	10	20	6,50	к.
19	1,10	10	20	5,50	с.
20	1,26	10	20	6,30	к.
21	1,15	10	20	5,75	я.
22	1,25	10	20	6,25	к.
23	1,15	10	20	5,75	я.
24	0,95	10	20	4,75	с.
25	1,25	10	20	6,25	к.

Таблиця А. 8 – Міцність термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після вісімнадцяти місяців випробувань у природних умовах

Всі зразки, які піддавали руйнуванню.					
№ п/п	Навантаження, F max, кН	Довжина, l, мм	Ширина, b, мм	Міцність, $\sigma$ , (МПа)	Характер руйнування
1	1,35	10	20	6,75	к.
2	1,15	10	20	5,75	к.
3	1,33	10	20	6,65	к.
4	0,96	10	20	4,80	я.
5	1,00	10	20	5,00	с.
6	1,25	10	20	6,25	к.
7	1,00	10	20	5,00	с.
8	1,09	10	20	5,45	я.
9	1,09	10	20	5,45	я.
10	1,25	10	20	6,25	к.
11	1,10	10	20	5,50	я.
12	0,90	10	20	4,50	с.
13	1,15	10	20	5,75	к.
14	1,03	10	20	5,15	с.
15	1,20	10	20	6,00	к.
16	1,03	10	20	5,15	с.
17	1,05	10	20	5,25	я.
18	1,15	10	20	5,75	к.
19	1,05	10	20	5,25	я.
20	1,27	10	20	6,35	к.
21	1,20	10	20	6,00	к.
22	1,07	10	20	5,35	с.
23	1,15	10	20	5,75	к.
24	1,07	10	20	5,35	с.
25	1,22	10	20	6,10	к.

Таблиця А. 9 – Міцність термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після двадцяти чотирьох місяців випробувань у природних умовах

Всі зразки, які піддавали руйнуванню.					
№ п/п	Навантаження, F max, кН	Довжина, l, мм	Ширина, b, мм	Міцність, $\sigma$ , (МПа)	Характер руйнування
1	1,10	10	20	5,50	к.
2	0,95	10	20	4,75	я.
3	0,90	10	20	4,50	к.
4	1,20	10	20	6,00	к.
5	1,10	10	20	5,50	с.
6	0,87	10	20	4,35	к.
7	0,90	10	19	4,74	к.
8	1,25	10	20	6,25	с.
9	1,00	10	20	5,00	я.
10	1,05	10	20	5,25	к.
11	1,15	10	20	5,75	я.
12	0,89	10	20	4,45	к.
13	1,20	10	20	6,00	с.
14	1,00	10	20	5,00	к.
15	1,20	10	20	6,00	к.
16	0,89	10	20	4,45	я.
17	0,90	10	20	4,50	к.
18	1,15	10	20	5,75	я.
19	1,10	10	20	5,50	к.
20	0,90	10	20	4,50	к.
21	0,82	10	20	4,10	с.
22	0,86	10	20	4,30	к.
23	1,10	10	20	5,50	я.
24	0,90	10	20	4,50	к.
25	1,20	10	20	6,00	я.

Таблиця А. 10 – Міцність термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після першого етапу випробувань

Всі зразки, які піддавали руйнуванню.					
№ п/п	Навантаження, F max, кН	Довжина, l, мм	Ширина, b, мм	Міцність, $\sigma$ , (МПа)	Характер руйнування
1	1,27	10	20	6,35	я.
2	1,38	10	20	6,90	к.
3	1,15	10	19	6,05	я.
4	1,10	10	20	5,50	к.
5	1,18	10	20	5,88	к.
6	1,40	10	20	7,00	к.
7	1,50	10	20	7,50	к.
8	1,05	10	20	5,25	к.
9	1,55	10	20	7,75	я.
10	1,39	10	20	6,95	я.
11	1,37	10	20	6,85	я.
12	1,13	10	20	5,65	к.
13	1,35	10	20	6,75	я.
14	1,25	10	20	6,25	с.
15	1,18	10	20	5,90	я.
16	1,27	10	20	6,35	к.
17	1,26	10	20	6,30	с.
18	0,88	10	19	4,63	к.
19	1,05	10	20	5,25	к.
20	1,06	10	19	5,58	к.
21	1,17	10	20	5,85	к.
22	1,40	10	20	7,00	с.
23	1,23	10	20	6,13	с.
24	1,20	10	20	6,00	к.
25	1,15	10	20	5,75	с.

Таблиця А. 11 – Міцність термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після другого етапу випробувань

Всі зразки, які піддавали руйнуванню.					
№ п/п	Навантаження, F max, кН	Довжина, l, мм	Ширина, b, мм	Міцність, $\sigma$ , (МПа)	Характер руйнування
1	0,91	10	20	4,55	к.
2	0,97	10	20	4,85	к.
3	0,87	10	20	4,35	к.
4	1,00	10	20	5,00	к.
5	1,05	10	20	5,25	к.
6	0,81	10	19	4,26	я.
7	0,72	10	20	3,60	к.
8	0,75	10	20	3,75	к.
9	0,90	10	20	4,50	я.
10	0,92	10	20	4,60	к.
11	0,88	10	20	4,40	к.
12	0,87	10	20	4,35	к.
13	0,93	10	20	4,65	к.
14	1,03	10	20	5,15	к.
15	1,20	10	20	6,00	к.
16	1,10	10	20	5,50	к.
17	0,83	10	20	4,13	к.
18	1,04	10	20	5,20	к.
19	0,98	10	20	4,90	я.
20	0,65	10	20	3,25	к.
21	0,94	10	20	4,70	к.
22	0,97	10	20	4,85	к.
23	0,85	10	20	4,25	я.
24	0,85	10	20	4,23	с.
25	0,77	10	20	3,85	к.

Таблиця А. 12 – Міцність термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після третього етапу випробувань

Всі зразки, які піддавали руйнуванню.					
№ п/п	Навантаження, F max, кН	Довжина, l, мм	Ширина, b, мм	Міцність, $\sigma$ , МПа	Характер руйнування
1	0,73	10	20	3,65	к.
2	0,87	10	20	4,35	к.
3	0,72	10	20	3,60	к.
4	0,90	10	20	4,50	к.
5	0,72	10	20	3,60	к.
6	0,82	10	19	4,32	к.
7	0,58	10	19	3,03	к.
8	0,98	10	20	4,88	к.
9	0,86	10	20	4,30	к.
10	0,83	10	20	4,15	к.
11	0,8	10	20	4,00	к.
12	0,76	10	20	3,80	к.
13	0,80	10	20	4,00	к.
14	0,81	10	20	4,05	к.
15	0,75	10	20	3,75	к.
16	0,60	10	20	3,00	я.
17	0,78	10	20	3,90	к.
18	0,76	10	20	3,80	к.
19	0,78	10	20	3,90	к.
20	0,68	10	20	3,40	к.
21	0,70	10	20	3,50	с.
22	0,95	10	20	4,75	к.
23	0,68	10	20	3,38	к.
24	0,68	10	20	3,38	к.
25	0,90	10	20	4,50	к.

## Додаток Б

Додаток Б.1. Результати статистичної обробки експериментальних даних визначення міцності термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої для контрольних зразків

1. Визначення найбільшого та найменшого значення вибірки:

$Y_{\max} =$	8,35
$Y_{\min} =$	6,00
$Y_c =$	7,12

2. Визначення величини інтервалів:

$N =$	25
$K =$	8
$\Delta Y =$	0,293

Розрахунок проміжних показників:

№ інт.	$Y_{ін}$	$Y_{ів}$	$Y_i$	$m_i$	$Y_i * m_i$	$(Y_i - Y_c)^2$	$(Y_i - Y_c)^2 * m_i$
1	6,00	6,29	6,15	2	12,29	0,951	1,902
2	6,29	6,59	6,44	3	19,32	0,464	1,393
3	6,59	6,88	6,73	4	26,94	0,150	0,601
4	6,88	7,18	7,03	5	35,14	0,009	0,044
5	7,18	7,47	7,32	4	29,29	0,040	0,160
6	7,47	7,76	7,62	3	22,85	0,244	0,731
7	7,76	8,06	7,91	2	15,82	0,620	1,240
8	8,06	8,35	8,20	2	16,41	1,169	2,337
$\Sigma =$	-	-	-	25	178,05	-	8,408

3. Визначення дисперсії та середньоквадратичного:

$S^2 =$	0,350
$S =$	0,592

4. Визначення інтервалу розсіювання:

5,346	$\leq Y \leq$	8,898
-------	---------------	-------

5. Визначення коефіцієнту варіації:

$V =$	8,311
-------	-------

6. Визначення середньоквадратичної похибки середнього значення:

$S_y =$	0,118
---------	-------

7. Визначення показника точності дослідження:

$P =$	1,662
-------	-------

8. Визначення інтервалу довіри для математичного сподівання генеральної вибірки:

6,84	$\leq M_y \leq$	7,40
------	-----------------	------

9. Визначення необхідної кількості дубльованих спостережень у кожному досліді основного експерименту:

$n_1 \Rightarrow$	522,31	при :	$p =$	1	$\tau =$	2,75
$n_2 \Rightarrow$	11,497	при :	$p =$	5	$\tau =$	2,04
$n_3 \Rightarrow$	1,996	при :	$p =$	10	$\tau =$	1,7

Додаток Б.2. Результати статистичної обробки експериментальних даних визначення міцності термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після трьох місяців природних випробувань

1. Визначення найбільшого та найменшого значення вибірки:

$Y_{\max} =$	7,55
$Y_{\min} =$	5,00
$Y_c =$	6,34

2. Визначення величини інтервалів:

$N =$	25
$K =$	8
$\Delta Y =$	0,318

Розрахунок проміжних показників:

№ інт.	$Y_{\text{ін}}$	$Y_{\text{ів}}$	$Y_i$	$m_i$	$Y_i * m_i$	$(Y_i - Y_c)^2$	$(Y_i - Y_c)^2 * m_i$
1	5,00	5,32	5,16	2	10,32	1,230	2,461
2	5,32	5,64	5,48	2	10,96	0,625	1,250
3	5,64	5,96	5,80	4	23,19	0,223	0,890
4	5,96	6,28	6,12	6	36,69	0,023	0,140
5	6,28	6,59	6,43	3	19,30	0,027	0,082
6	6,59	6,91	6,75	3	20,26	0,235	0,704
7	6,91	7,23	7,07	3	21,22	0,645	1,936
8	7,23	7,55	7,39	2	14,78	1,259	2,518
$\Sigma =$	-	-	-	25	156,72	-	9,981

3. Визначення дисперсії та середньоквадратичного:

$S^2 =$	0,416
$S =$	0,645

4. Визначення інтервалу розсіювання:

4,334	$\leq Y \leq$	8,203
-------	---------------	-------

5. Визначення коефіцієнту варіації:

V =	10,288
-----	--------

6. Визначення середньоквадратичної похибки середнього значення:

$S_y =$	0,129
---------	-------

7. Визначення показнику точності дослід:

P =	2,058
-----	-------

8. Визначення інтервалу довіри для математичного сподівання генеральної вибірки:

5,96	$\leq M_y \leq$	6,57
------	-----------------	------

9. Визначення необхідної кількості дубльованих спостережень у кожному досліді основного експерименту:

$n_1 \Rightarrow$	800,38	при :	p =	1	$\tau =$	2,75
$n_2 \Rightarrow$	17,618	при :	p =	5	$\tau =$	2,04
$n_3 \Rightarrow$	3,059	при :	p =	10	$\tau =$	1,7

Додаток Б.3. Результати статистичної обробки експериментальних даних визначення міцності термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої після шести місяців природних випробувань

1. Визначення найбільшого та найменшого значення вибірки:

$Y_{\max} =$	8,25
$Y_{\min} =$	5,00
$Y_c =$	6,56

2. Визначення величини інтервалів:

N =	25
K =	8
$\Delta Y =$	0,406

Розрахунок проміжних показників:

№ інт.	$Y_{ін}$	$Y_{ів}$	$Y_i$	$m_i$	$Y_i * m_i$	$(Y_i - Y_c)^2$	$(Y_i - Y_c)^2 * m_i$
1	5,00	5,41	5,20	2	10,41	1,819	3,638
2	5,41	5,81	5,61	3	16,83	0,888	2,665
3	5,81	6,22	6,02	4	24,06	0,288	1,150
4	6,22	6,63	6,42	5	32,11	0,017	0,084
5	6,63	7,03	6,83	4	27,31	0,076	0,305
6	7,03	7,44	7,23	3	21,70	0,466	1,397
7	7,44	7,84	7,64	2	15,28	1,185	2,371
8	7,84	8,25	8,05	2	16,09	2,235	4,470
$\Sigma =$	-	-	-	25	163,80	-	16,081

3. Визначення дисперсії та середньоквадратичного:

$S^2 =$	0,670
$S =$	0,819

4. Визначення інтервалу розсіювання:

4,096	$\leq Y \leq$	9,008
-------	---------------	-------

5. Визначення коефіцієнту варіації:

$V =$	12,494
-------	--------

6. Визначення середньоквадратичної похибки середнього значення:

$S_y =$	0,164
---------	-------

7. Визначення показнику точності дослід:

$P =$	2,499
-------	-------

8. Визначення інтервалу довіри для математичного сподівання генеральної вибірки:

6,16	$\leq M_y \leq$	6,94
------	-----------------	------

9. Визначення необхідної кількості дубльованих спостережень у кожному досліді основного експерименту:

$n_1 \Rightarrow$	1180,45	при :	$p =$	1	$\tau =$	2,75
$n_2 \Rightarrow$	25,984	при :	$p =$	5	$\tau =$	2,04
$n_3 \Rightarrow$	4,511	при :	$p =$	10	$\tau =$	1,7

Додаток Б.4. Результати статистичної обробки експериментальних даних визначення міцності термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої після дев'яти місяців природних випробувань

1. Визначення найбільшого та найменшого значення вибірки:

$Y_{\max} =$	7,75
$Y_{\min} =$	4,50
$Y_c =$	6,05

2. Визначення величини інтервалів:

$N =$	25
$K =$	8
$\Delta Y =$	0,41

Розрахунок проміжних показників:

№ інт.	$Y_{\text{ін}}$	$Y_{\text{ів}}$	$Y_i$	$m_i$	$Y_i * m_i$	$(Y_i - Y_c)^2$	$(Y_i - Y_c)^2 * m_i$
1	4,50	4,91	4,70	7	32,92	1,819	12,734
2	4,91	5,31	5,11	2	10,22	0,888	1,777
3	5,31	5,72	5,52	1	5,52	0,288	0,288
4	5,72	6,13	5,92	2	11,84	0,017	0,034
5	6,13	6,53	6,33	3	18,98	0,076	0,229
6	6,53	6,94	6,73	3	20,20	0,466	1,397
7	6,94	7,34	7,14	3	21,42	1,185	3,556
8	7,34	7,75	7,55	4	30,19	2,235	8,940
$\Sigma =$	-	-	-	25	151,30	-	28,954

3. Визначення дисперсії та середньоквадратичного:

$S^2 =$	1,206
$S =$	1,098

4. Визначення інтервалу розсіювання:

2,757	$\leq Y \leq$	9,347
-------	---------------	-------

5. Визначення коефіцієнту варіації:

$V =$	18,149
-------	--------

6. Визначення середньоквадратичної похибки середнього значення:

$S_y =$	0,220
---------	-------

7. Визначення показнику точності дослідження:

$P =$	3,630
-------	-------

8. Визначення інтервалу довіри для математичного сподівання генеральної вибірки:

5,53	$\leq M_y \leq$	6,57
------	-----------------	------

9. Визначення необхідної кількості дубльованих спостережень у кожному досліді основного експерименту:

$n_1 \Rightarrow$	2491,09	при :	$p =$	1	$\tau =$	2,75
$n_2 \Rightarrow$	54,833	при :	$p =$	5	$\tau =$	2,04
$n_3 \Rightarrow$	9,520	при :	$p =$	10	$\tau =$	1,7

Додаток Б.5. Результати статистичної обробки експериментальних даних визначення міцності термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після дванадцяти місяців природних випробувань

1. Визначення найбільшого та найменшого значення вибірки:

$Y_{max} =$	7,63
$Y_{min} =$	4,00
$Y_c =$	5,81

2. Визначення величини інтервалів:

$N =$	25
$K =$	8
$\Delta Y =$	0,453

Розрахунок проміжних показників:

№ інт.	$Y_{ін}$	$Y_{ів}$	$Y_i$	$m_i$	$Y_i * m_i$	$(Y_i - Y_c)^2$	$(Y_i - Y_c)^2 * m_i$
1	4,00	4,45	4,23	2	8,45	2,496	4,991
2	4,45	4,91	4,68	3	14,04	1,267	3,802
3	4,91	5,36	5,13	3	15,40	0,451	1,354
4	5,36	5,82	5,59	5	27,94	0,047	0,237
5	5,82	6,27	6,04	4	24,17	0,056	0,223
6	6,27	6,72	6,50	3	19,49	0,476	1,428
7	6,72	7,18	6,95	3	20,85	1,309	3,926
8	7,18	7,36	7,40	2	14,81	2,553	5,107
$\Sigma =$	-	-	-	25	145,17	-	21,068

3. Визначення дисперсії та середньоквадратичного:

$S^2 =$	0,878
$S =$	0,937

4. Визначення інтервалу розсіювання:

2,996	$\leq Y \leq$	8,618
-------	---------------	-------

5. Визначення коефіцієнту варіації:

V =	16,135
-----	--------

6. Визначення середньоквадратичної похибки середнього значення:

$S_y =$	0,187
---------	-------

7. Визначення показнику точності досліджу:

P =	3,227
-----	-------

8. Визначення інтервалу довіри для математичного сподівання генеральної вибірки:

5,36	$\leq M_y \leq$	6,25
------	-----------------	------

9. Визначення необхідної кількості дубльованих спостережень у кожному досліді основного експерименту:

$n_1 \Rightarrow$	1968,91	при :	$p =$	1	$\tau =$	2,75
$n_2 \Rightarrow$	43,339	при :	$p =$	5	$\tau =$	2,04
$n_3 \Rightarrow$	7,524	при :	$p =$	10	$\tau =$	1,7

Додаток Б.6. Результати статистичної обробки експериментальних даних визначення міцності термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після п'ятнадцяти місяців природних випробувань

1. Визначення найбільшого та найменшого значення вибірки:

$Y_{\max} =$	7,00
$Y_{\min} =$	4,70
$Y_c =$	5,87

2. Визначення величини інтервалів:

N =	25
K =	8
$\Delta Y =$	0,29

Розрахунок проміжних показників:

№ інт.	$Y_{ін}$	$Y_{ів}$	$Y_i$	$m_i$	$Y_i * m_i$	$(Y_i - Y_c)^2$	$(Y_i - Y_c)^2 * m_i$
1	4,70	4,99	4,84	2	9,69	1,048	2,095
2	4,99	5,28	5,13	2	10,26	0,542	1,083
3	5,28	5,56	5,42	3	16,26	0,201	0,603
4	5,56	5,85	5,71	6	34,24	0,026	0,156
5	5,85	6,14	5,99	4	23,98	0,016	0,064
6	6,14	6,43	6,28	3	18,84	0,171	0,514
7	6,43	6,71	6,57	3	19,71	0,492	1,476
8	6,71	7,00	6,86	2	13,71	0,978	1,956
$\Sigma =$	-	-	-	25	146,68	-	7,948

3. Визначення дисперсії та середньоквадратичного:

$S^2 =$	0,331
$S =$	0,575

4. Визначення інтервалу розсіювання:

4,141	$\leq Y \leq$	7,594
-------	---------------	-------

5. Визначення коефіцієнту варіації:

$V =$	9,808
-------	-------

6. Визначення середньоквадратичної похибки середнього значення:

$S_y =$	0,115
---------	-------

7. Визначення показнику точності дослідження:

$P =$	1,962
-------	-------

8. Визначення інтервалу довіри для математичного сподівання генеральної вибірки:

5,59	$\leq M_y \leq$	6,14
------	-----------------	------

9. Визначення необхідної кількості дубльованих спостережень у кожному досліді основного експерименту:

$n_1 \Rightarrow$	727,54	при :	$p =$	1	$\tau =$	2,75
$n_2 \Rightarrow$	16,014	при :	$p =$	5	$\tau =$	2,04
$n_3 \Rightarrow$	2,780	при :	$p =$	10	$\tau =$	1,7

Додаток Б. 7. Результати статистичної обробки експериментальних даних визначення міцності термічно модифікованої деревини ясена і сосни немодифікованої після вісімнадцяти місяців природних випробувань

1. Визначення найбільшого та найменшого значення вибірки:

$Y_{\max} =$	7,25
$Y_{\min} =$	4,75
$Y_c =$	5,93

2. Визначення величини інтервалів:

$N =$	25
$K =$	8
$\Delta Y =$	0,312

Розрахунок проміжних показників:

№ інт.	$Y_{ін}$	$Y_{ів}$	$Y_i$	$m_i$	$Y_i * m_i$	$(Y_i - Y_c)^2$	$(Y_i - Y_c)^2 * m_i$
1	4,75	5,06	4,91	2	9,81	1,076	2,153
2	5,06	5,38	5,22	3	15,66	0,526	1,577
3	5,38	5,69	5,53	4	22,13	0,170	0,681
4	5,69	6,00	5,84	5	29,22	0,010	0,050
5	6,00	6,31	6,16	4	24,63	0,045	0,181
6	6,31	6,63	6,47	3	19,41	0,276	0,827
7	6,63	6,94	6,78	2	13,56	0,701	1,403
8	6,94	7,25	7,09	2	14,19	1,323	2,645
$\Sigma =$	-	-	-	25	148,59	-	9,516

3. Визначення дисперсії та середньоквадратичного:

$S^2 =$	0,396
$S =$	0,630

4. Визначення інтервалу розсіювання:

4,055	$\leq Y \leq$	7,833
-------	---------------	-------

5. Визначення коефіцієнту варіації:

$V =$	10,594
-------	--------

6. Визначення середньоквадратичної похибки середнього значення:

$S_y =$	0,126
---------	-------

7. Визначення показнику точності досліджу:

P =	2,119
-----	-------

8. Визначення інтервалу довіри для математичного сподівання генеральної вибірки:

5,65	$\leq M_y \leq$	6,24
------	-----------------	------

9. Визначення необхідної кількості дубльованих спостережень у кожному досліді основного експерименту:

$n_1 \Rightarrow$	848,73	при :	$p =$	1	$\tau =$	2,75
$n_2 \Rightarrow$	18,682	при :	$p =$	5	$\tau =$	2,04
$n_3 \Rightarrow$	3,243	при :	$p =$	10	$\tau =$	1,7

Додаток Б. 8. Результати статистичної обробки експериментальних даних визначення міцності термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після двадцяти одного місяця природних випробувань

1. Визначення найбільшого та найменшого значення вибірки:

$Y_{max} =$	6,75
$Y_{min} =$	4,50
$Y_c =$	5,62

2. Визначення величини інтервалів:

N =	25
K =	8
$\Delta Y =$	0,281

Розрахунок проміжних показників:

№ інт.	$Y_{ін}$	$Y_{ів}$	$Y_i$	$m_i$	$Y_i * m_i$	$(Y_i - Y_c)^2$	$(Y_i - Y_c)^2 * m_i$
1	4,50	4,78	4,64	1	4,64	1,003	1,003
2	4,78	5,06	4,92	3	14,77	0,518	1,555
3	5,06	5,34	5,20	4	20,81	0,193	0,770
4	5,34	5,63	5,48	5	27,42	0,025	0,124
5	5,63	5,91	5,77	4	23,06	0,015	0,061
6	5,91	6,19	6,05	3	18,14	0,164	0,492
7	6,19	6,47	6,33	3	18,98	0,471	1,413
8	6,47	6,75	6,61	2	13,22	0,936	1,872
$\Sigma =$	-	-	-	25	141,05	-	7,290

3. Визначення дисперсії та середньоквадратичного:

$S^2 =$	0,304
$S =$	0,551

4. Визначення інтервалу розсіювання:

3,988	$\leq Y \leq$	7,295
-------	---------------	-------

5. Визначення коефіцієнту варіації:

$V =$	9,769
-------	-------

6. Визначення середньоквадратичної похибки середнього значення:

$S_y =$	0,110
---------	-------

7. Визначення показнику точності досліду:

$P =$	1,954
-------	-------

8. Визначення інтервалу довіри для математичного сподівання генеральної вибірки:

5,38	$\leq M_y \leq$	5,90
------	-----------------	------

9. Визначення необхідної кількості дубльованих спостережень у кожному досліді основного експерименту:

$n_1 \Rightarrow$	721,66	при :	$p =$	1	$\tau =$	2,75
$n_2 \Rightarrow$	15,885	при :	$p =$	5	$\tau =$	2,04
$n_3 \Rightarrow$	2,758	при :	$p =$	10	$\tau =$	1,7

Додаток Б. 9. Результати статистичної обробки експериментальних даних визначення міцності термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після двадцяти чотирьох місяців природних випробувань

1. Визначення найбільшого та найменшого значення вибірки:

$Y_{max} =$	6,25
$Y_{min} =$	4,10
$Y_c =$	5,13

2. Визначення величини інтервалів:

$N =$	25
$K =$	8
$\Delta Y =$	0,27

Розрахунок проміжних показників:

№ інт.	$Y_{ін}$	$Y_{ів}$	$Y_i$	$m_i$	$Y_i * m_i$	$(Y_i - Y_c)^2$	$(Y_i - Y_c)^2 * m_i$
1	4,10	4,37	4,23	3	12,70	0,875	2,624
2	4,37	4,64	4,50	6	27,02	0,444	2,665
3	4,64	4,91	4,77	2	9,54	0,158	0,316
4	4,91	5,18	5,04	2	10,08	0,017	0,033
5	5,18	5,44	5,31	1	5,31	0,020	0,020
6	5,44	5,71	5,58	4	22,31	0,167	0,667
7	5,71	5,98	5,85	2	11,69	0,459	0,917
8	5,98	6,25	6,12	5	30,58	0,895	4,475
$\Sigma =$	-	-	-	25	129,24	-	11,718

3. Визначення дисперсії та середньоквадратичного:

$S^2 =$	0,488
$S =$	0,699

4. Визначення інтервалу розсіювання:

3,073	$\leq Y \leq$	7,266
-------	---------------	-------

5. Визначення коефіцієнту варіації:

$V =$	13,516
-------	--------

6. Визначення середньоквадратичної похибки середнього значення:

$S_y =$	0,140
---------	-------

7. Визначення показнику точності досліджу:

$P =$	2,703
-------	-------

8. Визначення інтервалу довіри для математичного сподівання генеральної вибірки:

4,84	$\leq M_y \leq$	5,50
------	-----------------	------

9. Визначення необхідної кількості дубльованих спостережень у кожному досліді основного експерименту:

$n_1 \Rightarrow$	1381,63	при :	$p =$	1	$\tau =$	2,75
$n_2 \Rightarrow$	30,412	при :	$p =$	5	$\tau =$	2,04
$n_3 \Rightarrow$	5,280	при :	$p =$	10	$\tau =$	1,7

Додаток Б. 10. Результати статистичної обробки експериментальних даних визначення міцності термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після першого етапу пришвидшених випробувань

1. Визначення найбільшого та найменшого значення вибірки:

$Y_{\max} =$	7,75
$Y_{\min} =$	4,63
$Y_c =$	6,21

2. Визначення величини інтервалів:

$N =$	25
$K =$	8
$\Delta Y =$	0,389

Розрахунок проміжних показників:

№ інт.	$Y_{\text{ін}}$	$Y_{\text{ів}}$	$Y_i$	$m_i$	$Y_i * m_i$	$(Y_i - Y_c)^2$	$(Y_i - Y_c)^2 * m_i$
1	4,63	5,02	4,83	1	4,83	1,969	1,969
2	5,02	5,41	5,22	2	10,43	1,027	2,054
3	5,41	5,80	5,61	4	22,42	0,389	1,556
4	5,80	6,19	6,00	6	35,98	0,055	0,328
5	6,19	6,58	6,39	4	25,54	0,024	0,097
6	6,58	6,97	6,78	4	27,10	0,298	1,191
7	6,97	7,36	7,17	2	14,33	0,875	1,750
8	7,36	7,75	7,56	2	15,11	1,756	3,513
$\Sigma =$	-	-	-	25	155,74	-	12,460

3. Визначення дисперсії та середньоквадратичного:

$S^2 =$	0,519
$S =$	0,721

4. Визначення інтервалу розсіювання:

4,068	$\leq Y \leq$	8,391
-------	---------------	-------

5. Визначення коефіцієнту варіації:

$V =$	11,566
-------	--------

6. Визначення середньоквадратичної похибки середнього значення:

$S_y =$	0,144
---------	-------

7. Визначення показнику точності дослідження:

$P =$	2,313
-------	-------

8. Визначення інтервалу довіри для математичного сподівання генеральної вибірки:

5,89	$\leq M_y \leq$	6,57
------	-----------------	------

9. Визначення необхідної кількості дубльованих спостережень у кожному досліді основного експерименту:

$n_1 \Rightarrow$	1011,61	при :	$p =$	1	$\tau =$	2,75
$n_2 \Rightarrow$	22,267	при :	$p =$	5	$\tau =$	2,04
$n_3 \Rightarrow$	3,866	при :	$p =$	10	$\tau =$	1,7

Додаток Б. 11. Результати статистичної обробки експериментальних даних визначення міцності термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після другого етапу пришвидшених випробувань

1. Визначення найбільшого та найменшого значення вибірки:

$Y_{\max} =$	6,00
$Y_{\min} =$	3,25
$Y_c =$	4,56

2. Визначення величини інтервалів:

$N =$	25
$K =$	8
$\Delta Y =$	0,343

Розрахунок проміжних показників:

№ інт.	$Y_{ін}$	$Y_{ів}$	$Y_i$	$m_i$	$Y_i * m_i$	$(Y_i - Y_c)^2$	$(Y_i - Y_c)^2 * m_i$
1	3,25	3,59	3,42	1	3,42	1,271	1,271
2	3,59	3,94	3,77	3	11,30	0,614	1,843
3	3,94	4,28	4,11	4	16,44	0,194	0,774
4	4,28	4,63	4,45	6	26,72	0,009	0,056
5	4,63	4,97	4,80	5	23,98	0,061	0,306
6	4,97	5,31	5,14	4	20,56	0,350	1,398
7	5,31	5,66	5,48	1	5,48	0,874	0,874
8	5,66	6,00	5,83	1	5,83	1,635	1,635
$\Sigma =$	-	-	-	25	113,73	-	8,158

3. Визначення дисперсії та середньоквадратичного:

$S^2 =$	0,340
$S =$	0,583

4. Визначення інтервалу розсіювання:

2,800	$\leq Y \leq$	6,298
-------	---------------	-------

5. Визначення коефіцієнту варіації:

V =	12,816
-----	--------

6. Визначення середньоквадратичної похибки середнього значення:

$S_y =$	0,117
---------	-------

7. Визначення показнику точності дослідів:

P =	2,563
-----	-------

8. Визначення інтервалу довіри для математичного сподівання генеральної вибірки:

4,27	$\leq M_y \leq$	4,83
------	-----------------	------

9. Визначення необхідної кількості дубльованих спостережень у кожному досліді основного експерименту:

$n_1 \Rightarrow$	1242,04	при :	$p =$	1	$\tau =$	2,75
$n_2 \Rightarrow$	27,340	при :	$p =$	5	$\tau =$	2,04
$n_3 \Rightarrow$	4,746	при :	$p =$	10	$\tau =$	1,7

Додаток Б. 12. Результати статистичної обробки експериментальних даних визначення міцності термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої після третього етапу пришвидшених випробувань

1. Визначення найбільшого та найменшого значення вибірки:

$Y_{\max} =$	4,88
$Y_{\min} =$	3,00
$Y_c =$	3,90

2. Визначення величини інтервалів:

N =	25
K =	5,5
$\Delta Y =$	0,23

Розрахунок проміжних показників:

№ інт.	$Y_{ін}$	$Y_{ів}$	$Y_i$	$m_i$	$Y_i * m_i$	$(Y_i - Y_c)^2$	$(Y_i - Y_c)^2 * m_i$
1	3,00	3,23	3,12	2	6,23	0,605	1,211
2	3,23	3,47	3,35	3	10,05	0,296	0,887
3	3,47	3,70	3,59	4	14,34	0,096	0,383
4	3,70	3,94	3,82	5	19,10	0,006	0,028
5	3,94	4,17	4,05	4	16,22	0,025	0,102
6	4,17	4,41	4,29	3	12,87	0,155	0,465
7	4,41	4,64	4,52	2	9,05	0,395	0,789
8	4,64	4,88	4,76	2	9,52	0,744	1,488
$\Sigma =$	-	-	-	25	97,38	-	5,353

3. Визначення дисперсії та середньоквадратичного:

$S^2 =$	0,223
$S =$	0,472

4. Визначення інтервалу розсіювання:

2,479	$\leq Y \leq$	5,312
-------	---------------	-------

5. Визначення коефіцієнту варіації:

$V =$	12,124
-------	--------

6. Визначення середньоквадратичної похибки середнього значення:

$S_y =$	0,094
---------	-------

7. Визначення показнику точності дослідження:

$P =$	2,425
-------	-------

8. Визначення інтервалу довіри для математичного сподівання генеральної вибірки:

3,67	$\leq M_y \leq$	4,12
------	-----------------	------

9. Визначення необхідної кількості дубльованих спостережень у кожному досліді основного експерименту:

$n_1 \Rightarrow$	1111,55	при :	$p =$	1	$\tau =$	2,75
$n_2 \Rightarrow$	24,467	при :	$p =$	5	$\tau =$	2,04
$n_3 \Rightarrow$	4,248	при :	$p =$	10	$\tau =$	1,7

## Додаток В

Середньодобові метеорологічні дані (температура та вологість) за період проведення тривалих досліджень (07.11.2019 – 07.11.2021)

№ з/п	Температура, $t_{\text{сер.}}$ °C	Вологість, $W_{\text{сер.}}$ %	Дата
1	2	3	4
1	5	87	07.11.2019
2	7	95	08.11.2019
3	9	86	09.11.2019
4	8	91	10.11.2019
5	8	87	11.11.2019
6	7	82	12.11.2019
7	9	72	13.11.2019
8	12	85	14.11.2019
9	7	87	15.11.2019
10	8	89	16.11.2019
11	6	83	17.11.2019
12	5	81	18.11.2019
13	8	85	19.11.2019
14	8	84	20.11.2019
15	3	82	21.11.2019
16	-2	74	22.11.2019
17	-3	69	23.11.2019
18	-3	85	24.11.2019
19	0	86	25.11.2019
20	2	88	26.11.2019
21	3	87	27.11.2019
22	3	86	28.11.2019
23	3	83	29.11.2019
24	2	78	30.11.2019
25	-2	84	01.12.2019
26	-1	88	02.12.2019
27	-2	83	03.12.2019
28	-4	80	04.12.2019
29	-3	70	05.12.2019
30	-2	72	06.12.2019
31	-1	71	07.12.2019
32	0	79	08.12.2019
33	5	72	09.12.2019

## Продовження додатка В

1	2	3	4
34	5	85	10.12.2019
35	2	83	11.12.2019
36	3	83	12.12.2019
37	2	84	13.12.2019
38	3	85	14.12.2019
39	5	73	15.12.2019
40	7	76	16.12.2019
41	8	76	17.12.2019
42	9	75	18.12.2019
43	6	88	19.12.2019
44	5	84	20.12.2019
45	5	86	21.12.2019
46	6	79	22.12.2019
47	5	93	23.12.2019
48	3	93	24.12.2019
49	3	89	25.12.2019
50	2	87	26.12.2019
51	1	84	27.12.2019
52	-2	77	28.12.2019
53	-3	85	29.12.2019
54	-3	79	30.12.2019
55	3	66	31.12.2019
56	3	71	01.01.2020
57	2	73	02.01.2020
58	3	52	03.01.2020
59	3	74	04.01.2020
60	1	85	05.01.2020
61	-1	83	06.01.2020
62	1	72	07.01.2020
63	-1	82	08.01.2020
64	3	89	09.01.2020
65	4	79	10.01.2020
66	3	83	11.01.2020
67	1	85	12.01.2020
68	0	73	13.01.2020
69	-1	73	14.01.2020
70	-1	76	15.01.2020
71	-1	82	16.01.2020
72	0	89	17.01.2020
73	-1	84	18.01.2020

## Продовження додатка В

1	2	3	4
74	-2	84	19.01.2020
75	-1	85	20.01.2020
76	-1	65	21.01.2020
77	1	74	22.01.2020
78	1	73	23.01.2020
79	1	72	24.01.2020
80	1	69	25.01.2020
81	3	74	26.01.2020
82	2	84	27.01.2020
83	6	83	28.01.2020
84	5	82	29.01.2020
85	3	85	30.01.2020
86	4	82	31.01.2020
87	3	86	01.02.2020
88	2	73	02.02.2020
89	3	80	03.02.2020
90	2	88	04.02.2020
91	-3	73	05.02.2020
92	-4	83	06.02.2020
93	-1	69	07.02.2020
94	1	69	08.02.2020
95	2	72	09.02.2020
96	0	64	10.02.2020
97	-1	74	11.02.2020
98	2	66	12.02.2020
99	2	71	13.02.2020
100	3	67	14.02.2020
101	2	90	15.02.2020
102	4	74	16.02.2020
103	8	61	17.02.2020
104	6	77	18.02.2020
105	4	71	19.02.2020
106	3	78	20.02.2020
107	3	80	21.02.2020
108	3	78	22.02.2020
109	2	69	23.02.2020
110	2	81	24.02.2020
111	5	77	25.02.2020
112	5	82	26.02.2020
113	1	76	27.02.2020

## Продовження додатка В

1	2	3	4
114	0	82	28.02.2020
115	0	77	29.02.2020
116	3	46	01.03.2020
117	4	74	02.03.2020
118	5	65	03.03.2020
119	5	85	04.03.2020
120	3	86	05.03.2020
121	2	83	06.03.2020
122	3	81	07.03.2020
123	3	80	08.03.2020
124	5	89	09.03.2020
125	3	80	10.03.2020
126	5	79	11.03.2020
127	9	68	12.03.2020
128	6	69	13.03.2020
129	2	68	14.03.2020
130	0	63	15.03.2020
131	6	49	16.03.2020
132	5	58	17.03.2020
133	5	73	18.03.2020
134	6	62	19.03.2020
135	4	70	20.03.2020
136	5	79	21.03.2020
137	0	71	22.03.2020
138	-2	56	23.03.2020
139	-2	50	24.03.2020
140	-1	56	25.03.2020
141	3	40	26.03.2020
142	4	42	27.03.2020
143	5	49	28.03.2020
144	6	65	29.03.2020
145	3	68	30.03.2020
146	1	44	31.03.2020
147	-3	57	01.04.2020
148	1	50	02.04.2020
149	2	51	03.04.2020
150	6	50	04.04.2020
151	7	54	05.04.2020
152	8	44	06.04.2020
153	10	45	07.04.2020

## Продовження додатка В

1	2	3	4
154	12	50	08.04.2020
155	14	55	09.04.2020
156	3	50	10.04.2020
157	5	52	11.04.2020
158	4	43	12.04.2020
159	6	50	13.04.2020
160	2	63	14.04.2020
161	0	61	15.04.2020
162	6	52	16.04.2020
163	5	57	17.04.2020
164	6	51	18.04.2020
165	6	48	19.04.2020
166	5	53	20.04.2020
167	7	52	21.04.2020
168	8	56	22.04.2020
169	10	56	23.04.2020
170	12	52	24.04.2020
171	12	58	25.04.2020
172	9	62	26.04.2020
173	11	58	27.04.2020
174	9	57	28.04.2020
175	10	59	29.04.2020
176	12	72	30.04.2020
177	14	65	01.05.2020
178	15	73	02.05.2020
179	11	78	03.05.2020
180	12	86	04.05.2020
181	12	75	05.05.2020
182	7	87	06.05.2020
183	9	72	07.05.2020
184	13	65	08.05.2020
185	15	64	09.05.2020
186	16	64	10.05.2020
187	20	47	11.05.2020
188	7	60	12.05.2020
189	9	63	13.05.2020
190	3	90	14.05.2020
191	4	91	15.05.2020
192	8	70	16.05.2020
193	9	70	17.05.2020

## Продовження додатка В

1	2	3	4
194	11	65	18.05.2020
195	15	63	19.05.2020
196	12	65	20.05.2020
197	11	61	21.05.2020
198	9	61	22.05.2020
199	13	66	23.05.2020
200	11	83	24.05.2020
201	11	81	25.05.2020
202	12	90	26.05.2020
203	12	56	27.05.2020
204	10	82	28.05.2020
205	14	76	29.05.2020
206	12	91	30.05.2020
207	13	86	31.05.2020
208	12	79	01.06.2020
209	13	86	02.06.2020
210	12	86	03.06.2020
211	11	76	04.06.2020
212	12	75	05.06.2020
213	14	68	06.06.2020
214	16	71	07.06.2020
215	15	62	08.06.2020
216	16	76	09.06.2020
217	18	83	10.06.2020
218	17	86	11.06.2020
219	19	71	12.06.2020
220	21	72	13.06.2020
221	17	87	14.06.2020
222	19	84	15.06.2020
223	19	86	16.06.2020
224	20	82	17.06.2020
225	19	79	18.06.2020
226	17	79	19.06.2020
227	17	83	20.06.2020
228	20	85	21.06.2020
229	20	83	22.06.2020
230	19	93	23.06.2020
231	19	89	24.06.2020
232	20	73	25.06.2020
233	22	67	26.06.2020

## Продовження додатка В

1	2	3	4
234	21	66	27.06.2020
235	23	75	28.06.2020
236	22	72	29.06.2020
237	22	73	30.06.2020
238	21	93	01.07.2020
239	22	80	02.07.2020
240	20	82	03.07.2020
241	21	87	04.07.2020
242	21	74	05.07.2020
243	19	71	06.07.2020
244	18	85	07.07.2020
245	16	70	08.07.2020
246	19	80	09.07.2020
247	21	70	10.07.2020
248	24	66	11.07.2020
249	13	90	12.07.2020
250	16	74	13.07.2020
251	18	71	14.07.2020
252	20	75	15.07.2020
253	20	69	16.07.2020
254	22	78	17.07.2020
255	22	74	18.07.2020
256	21	74	19.07.2020
257	22	80	20.07.2020
258	19	78	21.07.2020
259	19	66	22.07.2020
260	20	71	23.07.2020
261	21	71	24.07.2020
262	24	76	25.07.2020
263	21	83	26.07.2020
264	23	80	27.07.2020
265	22	74	28.07.2020
266	21	69	29.07.2020
267	24	77	30.07.2020
268	21	70	31.07.2020
269	17	83	01.08.2020
270	20	76	02.08.2020
271	22	65	03.08.2020
272	24	63	04.08.2020
273	23	63	05.08.2020

## Продовження додатка В

1	2	3	4
274	21	68	06.08.2020
275	24	64	07.08.2020
276	23	69	08.08.2020
277	22	65	09.08.2020
278	22	69	10.08.2020
279	20	73	11.08.2020
280	18	74	12.08.2020
281	19	66	13.08.2020
282	20	64	14.08.2020
283	20	57	15.08.2020
284	21	57	16.08.2020
285	20	65	17.08.2020
286	21	83	18.08.2020
287	18	81	19.08.2020
288	19	80	20.08.2020
289	19	72	21.08.2020
290	20	67	22.08.2020
291	20	69	23.08.2020
292	20	85	24.08.2020
293	19	84	25.08.2020
294	19	71	26.08.2020
295	18	74	27.08.2020
296	22	71	28.08.2020
297	22	66	29.08.2020
298	25	62	30.08.2020
299	23	57	31.08.2020
300	18	80	01.09.2020
301	17	80	02.09.2020
302	17	80	03.09.2020
303	18	74	04.09.2020
304	17	80	05.09.2020
305	14	77	06.09.2020
306	14	85	07.09.2020
307	13	74	08.09.2020
308	16	70	09.09.2020
309	14	72	10.09.2020
310	15	72	11.09.2020
311	17	69	12.09.2020
312	17	74	13.09.2020
313	16	74	14.09.2020

## Продовження додатка В

1	2	3	4
314	18	74	15.09.2020
315	20	69	16.09.2020
316	17	78	17.09.2020
317	14	67	18.09.2020
318	15	72	19.09.2020
319	14	75	20.09.2020
320	16	67	21.09.2020
321	18	67	22.09.2020
322	17	65	23.09.2020
323	17	59	24.09.2020
324	17	66	25.09.2020
325	17	61	26.09.2020
326	13	93	27.09.2020
327	14	78	28.09.2020
328	14	87	29.09.2020
329	12	95	30.09.2020
330	11	92	01.10.2020
331	16	80	02.10.2020
332	15	74	03.10.2020
333	13	74	04.10.2020
334	11	83	05.10.2020
335	13	82	06.10.2020
336	13	78	07.10.2020
337	13	89	08.10.2020
338	15	84	09.10.2020
339	13	85	10.10.2020
340	12	90	11.10.2020
341	12	88	12.10.2020
342	12	87	13.10.2020
343	12	70	14.10.2020
344	11	66	15.10.2020
345	13	89	16.10.2020
346	11	92	17.10.2020
347	11	84	18.10.2020
348	13	78	19.10.2020
349	13	79	20.10.2020
350	10	74	21.10.2020
351	8	73	22.10.2020
352	9	80	23.10.2020
353	11	82	24.10.2020

## Продовження додатка В

1	2	3	4
354	7	90	25.10.2020
355	8	82	26.10.2020
356	7	83	27.10.2020
357	5	88	28.10.2020
358	4	92	29.10.2020
359	5	84	30.10.2020
360	6	84	31.10.2020
361	6	88	01.11.2020
362	7	85	02.11.2020
363	7	91	03.11.2020
364	5	78	04.11.2020
365	5	81	05.11.2020
366	4	90	06.11.2020
367	5	89	07.11.2020
368	5	83	08.11.2020
369	5	90	09.11.2020
370	4	74	10.11.2020
371	6	67	11.11.2020
372	6	73	12.11.2020
373	6	79	13.11.2020
374	7	73	14.11.2020
375	6	76	15.11.2020
376	7	80	16.11.2020
377	7	87	17.11.2020
378	7	87	18.11.2020
379	6	83	19.11.2020
380	3	81	20.11.2020
381	4	91	21.11.2020
382	3	61	22.11.2020
383	2	60	23.11.2020
384	0	74	24.11.2020
385	-1	69	25.11.2020
386	-2	84	26.11.2020
387	-4	89	27.11.2020
388	-4	90	28.11.2020
389	-3	87	29.11.2020
390	-2	89	30.11.2020
391	-2	86	01.12.2020
392	-1	84	02.12.2020
393	0	83	03.12.2020

## Продовження додатка В

1	2	3	4
394	3	81	04.12.2020
395	7	81	05.12.2020
396	2	83	06.12.2020
397	1	77	07.12.2020
398	1	74	08.12.2020
399	2	79	09.12.2020
400	2	86	10.12.2020
401	1	90	11.12.2020
402	1	90	12.12.2020
403	2	91	13.12.2020
404	2	94	14.12.2020
405	3	88	15.12.2020
406	3	86	16.12.2020
407	2	91	17.12.2020
408	2	90	18.12.2020
409	1	93	19.12.2020
410	2	90	20.12.2020
411	1	78	21.12.2020
412	1	76	22.12.2020
413	5	90	23.12.2020
414	7	92	24.12.2020
415	3	85	25.12.2020
416	2	78	26.12.2020
417	3	78	27.12.2020
418	3	82	28.12.2020
419	3	71	29.12.2020
420	2	80	30.12.2020
421	1	93	31.12.2020
422	3	94	01.01.2021
423	3	80	02.01.2021
424	3	84	03.01.2021
425	2	88	04.01.2021
426	4	89	05.01.2021
427	6	86	06.01.2021
428	4	91	07.01.2021
429	4	81	08.01.2021
430	3	84	09.01.2021
431	2	85	10.01.2021
432	1	82	11.01.2021
433	0	79	12.01.2021

## Продовження додатка В

1	2	3	4
434	-1	88	13.01.2021
435	-2	89	14.01.2021
436	-5	81	15.01.2021
437	-6	81	16.01.2021
438	-10	86	17.01.2021
439	-15	78	18.01.2021
440	-9	81	19.01.2021
441	-2	84	20.01.2021
442	-2	76	21.01.2021
443	1	72	22.01.2021
444	4	77	23.01.2021
445	6	86	24.01.2021
446	4	90	25.01.2021
447	3	85	26.01.2021
448	0	81	27.01.2021
449	-1	79	28.01.2021
450	-2	76	29.01.2021
451	-4	89	30.01.2021
452	-1	83	31.01.2021
453	2	86	01.02.2021
454	2	83	02.02.2021
455	1	81	03.02.2021
456	0	84	04.02.2021
457	0	79	05.02.2021
458	-1	73	06.02.2021
459	-4	82	07.02.2021
460	-6	88	08.02.2021
461	-5	77	09.02.2021
462	-3	86	10.02.2021
463	-6	92	11.02.2021
464	-6	75	12.02.2021
465	-5	71	13.02.2021
466	-4	85	14.02.2021
467	-5	74	15.02.2021
468	-9	71	16.02.2021
469	-8	85	17.02.2021
470	-10	82	18.02.2021
471	-11	69	19.02.2021
472	-1	82	20.02.2021
473	1	85	21.02.2021

## Продовження додатка В

1	2	3	4
474	1	79	22.02.2021
475	1	82	23.02.2021
476	3	79	24.02.2021
477	4	74	25.02.2021
478	3	69	26.02.2021
479	2	79	27.02.2021
480	3	76	28.02.2021
481	3	83	01.03.2021
482	4	75	02.03.2021
483	1	82	03.03.2021
484	2	72	04.03.2021
485	1	86	05.03.2021
486	3	71	06.03.2021
487	3	63	07.03.2021
488	3	77	08.03.2021
489	4	68	09.03.2021
490	2	81	10.03.2021
491	3	78	11.03.2021
492	3	84	12.03.2021
493	4	68	13.03.2021
494	2	71	14.03.2021
495	2	84	15.03.2021
496	4	91	16.03.2021
497	3	90	17.03.2021
498	2	72	18.03.2021
499	4	70	19.03.2021
500	6	85	20.03.2021
501	6	66	21.03.2021
502	5	67	22.03.2021
503	3	76	23.03.2021
504	2	62	24.03.2021
505	2	67	25.03.2021
506	4	73	26.03.2021
507	5	72	27.03.2021
508	3	79	28.03.2021
509	3	67	29.03.2021
510	5	75	30.03.2021
511	4	81	31.03.2021
512	6	71	01.04.2021
513	7	70	02.04.2021

## Продовження додатка В

1	2	3	4
514	6	67	03.04.2021
515	7	76	04.04.2021
516	5	62	05.04.2021
517	3	71	06.04.2021
518	2	71	07.04.2021
519	3	70	08.04.2021
520	5	61	09.04.2021
521	4	46	10.04.2021
522	6	47	11.04.2021
523	3	34	12.04.2021
524	5	65	13.04.2021
525	5	89	14.04.2021
526	5	89	15.04.2021
527	5	89	16.04.2021
528	3	86	17.04.2021
529	5	78	18.04.2021
530	4	78	19.04.2021
531	5	75	20.04.2021
532	6	71	21.04.2021
533	5	76	22.04.2021
534	3	65	23.04.2021
535	5	56	24.04.2021
536	5	66	25.04.2021
537	4	59	26.04.2021
538	4	59	27.04.2021
539	6	54	28.04.2021
540	10	71	29.04.2021
541	11	70	30.04.2021
542	10	82	01.05.2021
543	8	76	02.05.2021
544	7	68	03.05.2021
545	9	56	04.05.2021
546	12	46	05.05.2021
547	10	59	06.05.2021
548	7	66	07.05.2021
549	9	80	08.05.2021
550	9	65	09.05.2021
551	11	49	10.05.2021
552	10	47	11.05.2021
553	13	50	12.05.2021

## Продовження додатка В

1	2	3	4
554	15	68	13.05.2021
555	13	69	14.05.2021
556	15	72	15.05.2021
557	15	66	16.05.2021
558	16	74	17.05.2021
559	14	76	18.05.2021
560	14	82	19.05.2021
561	14	74	20.05.2021
562	15	59	21.05.2021
563	16	55	22.05.2021
564	15	63	23.05.2021
565	17	66	24.05.2021
566	15	62	25.05.2021
567	19	57	26.05.2021
568	21	59	27.05.2021
569	22	68	28.05.2021
570	23	80	29.05.2021
571	20	85	30.05.2021
572	22	67	31.05.2021
573	21	62	01.06.2021
574	22	62	02.06.2021
575	19	60	03.06.2021
576	19	63	04.06.2021
577	21	71	05.06.2021
578	22	73	06.06.2021
579	23	65	07.06.2021
580	23	69	08.06.2021
581	25	64	09.06.2021
582	26	71	10.06.2021
583	24	77	11.06.2021
584	24	66	12.06.2021
585	22	76	13.06.2021
586	22	80	14.06.2021
587	23	74	15.06.2021
588	24	74	16.06.2021
589	23	68	17.06.2021
590	22	63	18.06.2021
591	22	67	19.06.2021
592	22	71	20.06.2021
593	21	60	21.06.2021

## Продовження додатка В

1	2	3	4
594	27	63	22.06.2021
595	28	60	23.06.2021
596	28	65	24.06.2021
597	24	80	25.06.2021
598	21	82	26.06.2021
599	20	69	27.06.2021
600	21	63	28.06.2021
601	20	63	29.06.2021
602	21	75	30.06.2021
603	20	86	01.07.2021
604	19	77	02.07.2021
605	18	86	03.07.2021
606	20	88	04.07.2021
607	21	83	05.07.2021
608	22	75	06.07.2021
609	24	72	07.07.2021
610	23	65	08.07.2021
611	22	56	09.07.2021
612	22	53	10.07.2021
613	24	64	11.07.2021
614	26	60	12.07.2021
615	25	62	13.07.2021
616	27	57	14.07.2021
617	27	61	15.07.2021
618	28	55	16.07.2021
619	27	68	17.07.2021
620	25	77	18.07.2021
621	21	85	19.07.2021
622	19	88	20.07.2021
623	20	80	21.07.2021
624	20	66	22.07.2021
625	21	68	23.07.2021
626	21	68	24.07.2021
627	21	65	25.07.2021
628	22	66	26.07.2021
629	21	67	27.07.2021
630	23	77	28.07.2021
631	23	78	29.07.2021
632	22	64	30.07.2021
633	23	76	31.07.2021

## Продовження додатка В

1	2	3	4
634	19	74	01.08.2021
635	21	78	02.08.2021
636	20	68	03.08.2021
637	19	79	04.08.2021
638	21	81	05.08.2021
639	18	74	06.08.2021
640	19	64	07.08.2021
641	21	66	08.08.2021
642	21	82	09.08.2021
643	20	77	10.08.2021
644	18	72	11.08.2021
645	20	73	12.08.2021
646	17	70	13.08.2021
647	19	67	14.08.2021
648	21	72	15.08.2021
649	23	79	16.08.2021
650	21	86	17.08.2021
651	20	74	18.08.2021
652	18	74	19.08.2021
653	19	77	20.08.2021
654	20	79	21.08.2021
655	21	74	22.08.2021
656	19	80	23.08.2021
657	17	88	24.08.2021
658	16	93	25.08.2021
659	15	74	26.08.2021
660	14	79	27.08.2021
661	12	83	28.08.2021
662	13	93	29.08.2021
663	10	85	30.08.2021
664	12	75	31.08.2021
665	14	83	01.09.2021
666	13	76	02.09.2021
667	14	75	03.09.2021
668	14	73	04.09.2021
669	15	72	05.09.2021
670	16	68	06.09.2021
671	15	70	07.09.2021
672	14	76	08.09.2021
673	16	72	09.09.2021

## Продовження додатка В

1	2	3	4
674	9	69	10.09.2021
675	12	72	11.09.2021
676	11	73	12.09.2021
677	12	81	13.09.2021
678	14	83	14.09.2021
679	15	77	15.09.2021
680	12	72	16.09.2021
681	10	83	17.09.2021
682	12	94	18.09.2021
683	12	90	19.09.2021
684	13	86	20.09.2021
685	10	81	21.09.2021
686	9	84	22.09.2021
687	11	82	23.09.2021
688	10	78	24.09.2021
689	12	78	25.09.2021
690	10	76	26.09.2021
691	9	80	27.09.2021
692	8	73	28.09.2021
693	9	72	29.09.2021
694	7	68	30.09.2021
695	8	65	01.10.2021
696	10	54	02.10.2021
697	10	61	03.10.2021
698	9	62	04.10.2021
699	9	54	05.10.2021
700	7	48	06.10.2021
701	7	50	07.10.2021
702	8	55	08.10.2021
703	6	69	09.10.2021
704	8	63	10.10.2021
705	7	69	11.10.2021
706	9	83	12.10.2021
707	5	85	13.10.2021
708	6	83	14.10.2021
709	7	68	15.10.2021
710	7	72	16.10.2021
711	6	71	17.10.2021
712	5	78	18.10.2021
713	5	89	19.10.2021

## Продовження додатка В

1	2	3	4
714	10	68	20.10.2021
715	11	54	21.10.2021
716	9	55	22.10.2021
717	9	61	23.10.2021
718	8	71	24.10.2021
719	11	66	25.10.2021
720	9	59	26.10.2021
721	8	72	27.10.2021
722	9	78	28.10.2021
723	7	80	29.10.2021
724	9	64	30.10.2021
725	8	66	31.10.2021
726	7	75	01.11.2021
727	8	66	02.11.2021
728	8	57	03.11.2021
729	6	77	04.11.2021
730	6	74	05.11.2021
731	5	82	06.11.2021
732	3	75	07.11.2021

## Додаток Г

## Додаток Г. 1. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальному процесі НЛТУ України

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ  
УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Перший проректор  
з науково-педагогічної роботи

Олександр СУШИНСЬКИЙ

2023 р.

“13” червня 2023 р.  
м. Львів



АКТ

про встановлення факту використання результатів дисертаційної роботи ДАЦКІВ Г.М. у навчальному процесі Національного лісотехнічного університету України (НЛТУ України).

Складений комісією у складі:

**Голова комісії:** директор ННІ ДКТД, професор кафедри технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів, доктор технічних наук, професор МАЄВСЬКИЙ В.О.

**Члени комісії:** керівник навчально-методичного відділу, канд. техн. наук, доцент Салабай Р.Г.

завідувач кафедри технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів, канд. техн. наук, доцент ФЕРЕНЦ О.Б.;

заступник директора ННІ ДКТД з навчальної роботи, канд. техн. наук, доцент КОПИНЕЦЬ З.П.

13 червня 2023 року комісія провела роботу зі встановлення факту використання результатів дисертаційної роботи ДАЦКІВ Г.М. на тему “Прогнозування міцності клейових з'єднань термічно модифікованої деревини ясеня клеями на основі ПВА” у навчальному процесі НЛТУ України.

Комісія встановила, що у робочих планах з навчальних дисциплін фахової підготовки: “Технологія столярних виробів”, для підготовки бакалаврів спеціальності 187 “Деревообробні та меблеві технології”, а також дисципліни “Проектування світлопрозорих конструкцій”, “Прогнозування довговічності клейових з'єднань деревини” для підготовки магістрів спеціальності 187 “Деревообробні та меблеві технології” використовуються окремі результати дисертаційної роботи ДАЦКІВ Г.М.

Акт складено у трьох примірниках:

1-й примірник – кафедрі технологій захисту навколишнього середовища і деревини та безпеки життєдіяльності;

2-й примірник – навчально-методичному відділу НЛТУ України;

3-й примірник – аспірантці ДАЦКІВ Г.М.

Голова комісії  Володимир МАЄВСЬКИЙ

Члени комісії:  Роман САЛАБАЙ

Олег ФЕРЕНЦ

Зоя КОПИНЕЦЬ

Додаток Г. 2. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у  
виробничий процес на ПП ТСМ “Ілечко”



Несторак А.Т.

26 травня 2023 р.

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ У ВИРОБНИЦТВО**

результатів дисертаційної роботи Дацків Г.М.

**“Прогнозування міцності клейових з’єднань термічно модифікованої деревини ясеня  
клеями на основі ПВА”**

**на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 187 – Деревообробні та меблеві технології**

Використання клейової конструкції, яка поєднує термічно модифіковану деревину ясеня і сосну немодифіковану склеєну полівінілацетатними клеями є альтернативною та перспективною для виготовлення столярно-будівельних виробів, оскільки зовнішня ламель виготовлена з термічно модифікованої деревини. Це дозволить покращити експлуатаційні властивості, збільшити довговічність виробам та раціонально використовувати деревинні ресурси.

Дослідно-промислова перевірка показала, що клейові з’єднання термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, склеєної термопластичним полівінілацетатним клеєм із ступенем довговічності D4 відповідають вимогам чинного стандарту ДСТУ EN 204.

Асистент кафедри технологій захисту  
навколишнього середовища і деревини  
та безпеки життєдіяльності

Г. М. Дацків

Начальник виробництва

І.М. Шийко

Столяр

В.С. Гураль

Додаток Г. 2. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у  
виробничий процес на ФОП “Тарканій В.І.”



**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ У ВИРОБНИЦТВО**  
результатів дисертаційної роботи Дацків Г.М.  
“Прогнозування міцності клейових з’єднань термічно модифікованої деревини ясеня  
клеями на основі ПВА”  
на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 187 – Деревообробні та меблеві технології

Для сучасних клейових конструкцій з деревини є актуальним прогнозування їх міцності. Не виключенням є і клейові деревинні конструкції з термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, які використовуються при виготовленні столярно-будівельних виробів для їх захисту від дії зовнішнього середовища. У таких конструкціях зовнішній шар виготовлений з ламелі термічно модифікованої деревини ясеня. Для прогнозування міцності клейового з’єднання термічно модифікованої деревини ясеня і сосни немодифікованої, автором запропоновано математичну модель, яка дозволить передбачати міцність таких клейових з’єднань залежно від умов експлуатації.

Асистент кафедри технологій захисту  
навколишнього середовища і деревини  
та безпеки життєдіяльності

Г. М. Дацків

Начальник цеху

Тарканій В.І

