



<http://fasu.nltu.edu.ua>
<https://doi.org/10.36930/412621>
Article received 2025.09.25
Article revised 2026.03.09
Article accepted 2026.03.19
Article published 2026.05.22

ISSN 1991-606X print
ISSN 2616-5015 online
@ ✉ Correspondence author
Yaroslav Shchupakivskyi
shchupakivskyi.y@nltu.lviv.ua
103 General Chuprynka St.,
Lviv, 79057, Ukraine

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



УДК 674-049

Реологічні властивості термічно модифікованої деревини ялини європейської *Picea abies* (L.) Karst. у середовищі азоту

Я.Б. Щупаківський¹, Й.В. Андрашек², Р.Б. Щупаківський³, О.В. Савчак⁴

Подолання деяких недоліків деревини, як конструкційного матеріалу, зі збереженням показників екологічності на рівні звичайної деревини досягається шляхом її термічного модифікування. Термічно модифікована деревина (ТМД), зберігаючи безперечні переваги звичайної деревини, дає змогу суттєво підвищити біологічну стійкість і забезпечити стабільність форми і розмірів виробів в процесі експлуатації.

Об'єктом дослідження були радіальні зразки прямокутного перерізу розміром $35 \times 12 \times 0,6$ мм, виготовлені з термічно модифікованої деревини ялини європейської при температурі 180 і 210°C у середовищі азоту.

Дослідження в'язкопружної поведінки (повзучості) деревини під дією статичних навантажень проводили з використанням динамічного механічного аналізатора Gabo Eplexor 25N DMA та програмного модуля на основі моделі Бюргерса. Програмне керування експериментом і первинне опрацювання даних виконували за допомогою програмного комплексу GABO. Експериментальні дослідження в'язкопружних властивостей деревини здійснювалось в режимі розтягу з

¹ Щупаківський Ярослав Богданович – аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища і деревини, безпеки життєдіяльності. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: shchupakivskyi.y@nltu.lviv.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1434-8302>

² Андрашек Йосип Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища і деревини, безпеки життєдіяльності. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: joseph.andrashek@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1011-0089>

³ Щупаківський Роман Богданович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: roman.shchupakivskyi@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5242-1267>

⁴ Савчак Орест Володимирович – аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища і деревини, безпеки життєдіяльності. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: orest.savchak@nltu.lviv.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4970-9459>

використанням програмних модулів “Time Sweep” та “Temperature Sweep” за квазістатичної частоти навантаження ($f = 0 \dots 0.01 \text{ Гц}$).

Встановлено вплив температури термічного оброблення деревини ялини європейської в середовищі вуглекислого газу на зміну в'язкопружних характеристик та модуля повзучості. Виконаний аналіз кінетики деформації під навантаженням дає підставу стверджувати, що термічна модифікація суттєво змінює механічну стійкість матеріалу, причому цей вплив має чітко виражений градаційний характер від температури модифікування.

Отримано графічні залежності зміни деформацій для термічно модифікованої і немодифікованої деревини ялини європейської, які дають змогу оцінити вплив температури на реологічні властивості матеріалу.

Ключові слова: модуль пружності; деформації; повзучість; інертне середовище; статичні навантаження; релаксація напружень; термічне модифікування.

Вступ (Introduction).

Деревина ялини європейської або смереки (*Picea abies* [L.] Karst.) є одним із найпоширеніших та промислово значущих ресурсів у лісовому секторі Європи та, зокрема, Карпатського регіону України. Завдяки своїй доступності, високому коефіцієнту конструктивної якості та легкості в обробленні, її широко використовують у будівництві, виробництві меблів та столярних виробів.

Проте як природний гігроскопічний матеріал, немодифікована деревина має суттєві недоліки: розмірну нестабільність, схильність до біологічної деструкції та низьку гідрофобність (Esteves, & Pereira, 2009; Militz, & Altgen, 2014). Ці фактори обмежують її використання у зовнішніх конструкціях в умовах змінної температури та вологості (Sandberg et al., 2013; Wang et al., 2018; Wu et al., 2019).

Сучасна парадигма матеріалознавства спрямована на покращення експлуатаційних характеристик деревини без використання токсичних хімічних реагентів (біоцидів). У цьому контексті термічне модифікування (ТМ) виступає як найбільш перспективний екологічно чистий метод (Gérardin, 2016). Під час ТМ відбуваються глибокі структурні зміни компонентів клітинної стінки під дією температур у діапазоні 160-240°C (Bekhta & Niemz, 2003; Hill et al., 2021; Navi & Stangerlin, 2006; Windeisen et al., 2007). Критичним фактором, який визначає якість кінцевого продукту, є середовище, в якому відбувається процес (Alén et al., 2002; Sandberg et al., 2017). Використання інертного газу, зокрема азоту, дає змогу уникнути окислювальних процесів, які виникають під час термічної модифікації в середовищі кисню, та відрізняється за механізмом гідролізу від оброблення в середовищі перегрітої пари (Metsä-Kortelainen et al., 2006). У контексті реології деревину ялини європейської розглядають як природний капілярно-пористий матеріал з яскраво вираженими в'язкопружними властивостями (Engelund & Salmén, 2012). Целюлозні

мікрофібрили виконують роль армуючого елемента, що забезпечує пружність, тоді як аморфні полімери (лігнін та геміцелюлози) відповідають за в'язку складову деформації. У науковій літературі (Engelund & Svensson, 2011; Hering & Niemz, 2012; Montero et al., 2012; Navi & Stangerlin, 2006; Qin et al., 2018; Wang et al., 2022) зазначається, що саме стан аморфної матриці є найбільш чутливим до термічного впливу. Дослідження свідчать, що реологічна стабільність ялини європейської низька в умовах змінної вологості (Armstrong & Kingston, 1960; Hering & Niemz, 2012; Navi & Stanzl-Tschegg, 2009). Явище механосорбційної повзучості проявляється у ній дуже інтенсивно через високу проникність ранньої деревини для вологи. Швидке зволоження та висихання поверхневих шарів зумовлює значні внутрішні напруження. Якщо ці напруження не встигають “релаксувати” через жорсткість структури, виникають тріщини. Крім того, необроблена деревина ялини європейської має низьку температуру розм'якшення лігніну у вологому стані (70-90°C), що робить її податливою до пластичних деформацій у процесі нагрівання (Placet, Passard, & Perré, 2008).

За результатами досліджень (Engelund & Salmén, 2012; Kutnar et al., 2008; Wang et al., 2022; Xing et al., 2016, 2021), термічна модифікація призводить до суттєвих змін у реологічній поведінці деревини шпилькових порід, зокрема, зниження повзучості – модифікована деревина стає менш схильною до деформацій у часі. Це пояснюється деградацією геміцелюлоз (які відповідають за в'язкість) та утворенням тривимірної сітки зшитого лігніну. Матеріал стає пружнішим і менш в'язким (Montero et al., 2012). Дослідження щодо впливу азотного середовища модифікування на повзучість деревини ялини носять фрагментарний характер. Більшість результатів фокусуються на міцності на статичний згин. Недостатньо вивченим є питання щодо того, як саме відсутність окислення лігніну в азоті

впливає на довготривалу релаксацію напружень, і чи зберігає “азотна” модифікація більше пластичності порівняно з термічною модифікацією іншими способами (сухим, вологим чи у вакуумі).

Відтак, розуміння реології модифікованої в азоті деревини ялини є ключовим для прогнозування довговічності навантажених конструкцій. Хоча фізико-механічні властивості (міцність на розтяг та статичний згин, твердість) термічно модифікованої деревини вивчені доволі ґрунтовно (Bekhta & Niemz, 2003; Navi & Stangerlin, 2006; Peura et al., 2007; Wang et al., 2019), питання зміни її реологічних властивостей – здатності матеріалу деформуватися у часі під навантаженням (повзучість) та “релаксувати” напруження – залишається недостатньо висвітленим, що й зумовлює *актуальність* цієї роботи.

Метою роботи є встановлення закономірностей зміни деяких реологічних властивостей деревини ялини європейської внаслідок термічного модифікування у інертному середовищі для оптимізації режимів оброблення та прогнозування експлуатаційної поведінки виробів.

Об’єкти і методика дослідження (Objects and methods).

Об’єкт дослідження – процес термічного модифікування деревини *Picea abies* у середовищі азоту. *Предмет дослідження* – закономірності зміни реологічних (деформаційних) властивостей деревини *Picea abies* залежно від температури термічної модифікації і тривалості оброблення.

Для мінімізації впливу природної мінливості ялинової деревини на результати експерименту зразки виготовляли з одного стовбура та одного пиломатеріалу заболонної зони, заготовленого в лісовому господарстві Львівщини. Розкроюванню передував етап камерного конвективного сушіння заготовок. Перед початком випробувань зразки проходили стадію кондиціювання впродовж щонайменше 14 діб у кліматичній камері за наступних умов: температура повітря – 20°C, відносна вологість – 60% для досягнення кінцевої вологості деревини $12 \pm 1\%$. Для проведення експериментів підготовлено серії радіальних зразків прямокутного перерізу розміром $35 \times 12 \times 0,6$ мм. Вибір розмірів зразків зумовлений технічними характеристиками обладнання (максимальне навантаження 25Н для випробовувань на розтяг) та необхідністю забезпечення репрезентативності для заданого елементарного об’єму матеріалу. Вибірка становила 22

зразки для кожного типорозміру та кожного окремого експерименту.

Для опису в’язкопружної поведінки деревини, зокрема процесу її повзучості під дією постійного навантаження використано Модель Бюргерса:

$$J(t) = \frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-t/\tau}), \quad (1)$$

де $J(t)$ – податливість повзучості від часу навантаження, E – модуль пружності (Па), η – коефіцієнт в’язкості пластичної повзучості (Па·с), τ – час релаксації (с).

Дослідження в’язкопружної поведінки (повзучості) під дією постійних навантажень проводили з використанням динамічного механічного аналізатора Gabo Eplexor 25N DMA (рис. 1) з використанням програмного модуля на основі моделі Бюргерса. Прилад забезпечує високошвидкісний збір даних та дає можливість здійснювати прецизійний контроль параметрів середовища (температури та відносної вологості) у вимірювальній камері.

Кріплення зразків здійснювали у затискачах для випробувань на розтяг. Для забезпечення надійної фіксації та запобігання пошкодженню структури деревини силу затискання регулювали за допомогою гвинтів із контрольованим крутним моментом (рис. 2). Програмне керування експериментом та первинне опрацювання даних виконували за допомогою програмного комплексу GABO.



Рис. 1. Загальний вигляд експериментальної установки

Fig. 1. General view of the experimental setup

Експериментальні дослідження в’язкопружних властивостей деревини проводили в режимі розтягу з використанням програмних модулів “Time Sweep” та “Temperature Sweep” за квазістатичної частоти навантаження ($f = 0-0.01$ Гц). Протокол випробувань передбачав швидке прикладання заданого навантаження впродовж 1-5 с із наступною стабілізацією системи (час витримки) тривалістю 300 с. Безпосередньо вимірювальний цикл складався з етапу повзучості, під час якого здійснювали реєстрацію деформації зразка під дією постійного навантаження впродовж трьох

годин, та етапу відновлення, який тривав шість годин після повного розвантаження.

З метою отримання даних для побудови узагальнених кривих в роботі реалізовано серію ізотермічних експериментів у температурному діапазоні від +160 до +210°C. Термічне модифікування здійснювали в інертному середовищі азоту. Час витримки за заданої температури не варіювався і становив 10 хв. (для досягнення рівномірності температурного градієнту кожного зразка).

Перехід між температурними рівнями здійснювався зі швидкістю нагрівання 5°C / год за відсутності механічного впливу. В процесі проведення випробувань час температурної рівноваги на кожному етапі становив п'ять хвилин. Для забезпечення проведення досліджень у межах області лінійної в'язкопружності рівні напружень обирали в діапазоні 20-25% від короточасної граничної міцності матеріалу, що відповідало значенням навантаження від 5 до 20Н із кроком 5Н. Допустиме відхилення статичного навантаження в процесі випробувань не перевищувало 0.1-0.2Н, а всі параметри експерименту задавали за допомогою спеціалізованого шаблону "CREEP 25N©" у середовищі програмного забезпечення GABO.



Рис. 2. Система кріплення зразків для вимірювань повзучості

Fig. 2. Specimen mounting system for creep measurements

Результати (Results).

За результатами серії короточасних випробувань отримано масив експериментальних даних, який включає криві повзучості під час розтягу термічно модифікованої деревини ялини вздовж волокон та часові залежності модуля повзучості для різних рівнів механічних навантажень і температурних режимів. На рис. 3 наведено характерну діаграму кінетики деформації повзучості для випробування тривалістю 180 хв., проведеного за температури 160°C під навантаженням 20Н.

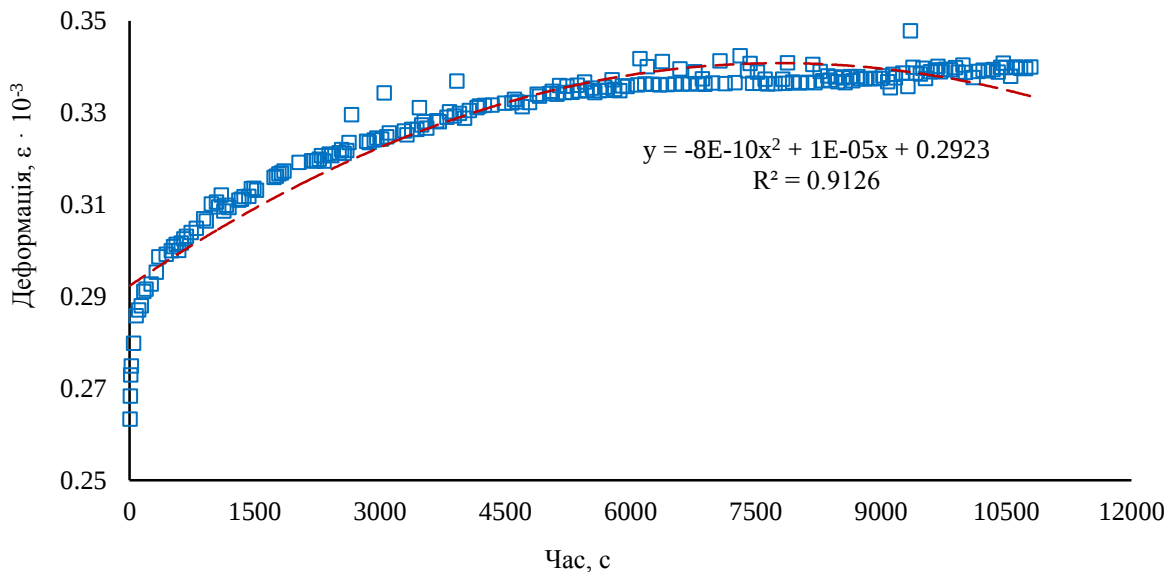


Рис. 3. Криві повзучості термічно модифікованої деревини *Picea abies* у середовищі азоту (температура модифікування 160°C, навантаження 20Н)

Fig. 3. Creep curves of thermally modified Norway spruce wood in a nitrogen atmosphere (modification temperature 160°C, load 20 N)

Представлена графічна залежність (див. рис. 3) ілюструє кінетику деформаційних процесів ялинової деревини в часі, відображаючи класичну реологічну поведінку в'язкопружного матеріалу в умовах тривалого статичного навантаження. На діаграмі розсіювання,

побудованій у координатах *час – відносна деформація*, простежено нелінійне зростання величини деформації, яке можна поділити на стадію несталої повзучості з високим градієнтом зростання в інтервалі 0-1000 с та стадію сталої повзучості з подальшою стабілізацією в інтервалі

1000-10500 с. Експериментальні дані свідчать, що після початкового стрибка до 26% швидкість деформування поступово згасає, і в діапазоні 6000-10500 с крива асимптотично наближається до значення 34%, що відповідає межі тривалої деформації для цього режиму навантаження. Математична апроксимація процесу виконана за допомогою поліноміальної функції другого

ступеня. Тут від'ємний коефіцієнт в старшому члені рівняння вказує на опуклість кривої вгору та затухаючий характер швидкості зміни деформації, а вільний член (0,2923) характеризує усереднене значення пружної складової деформації на початковому етапі, підтверджуючи кореляцію між розрахунковою моделлю та емпіричними даними у фазі стабілізації.

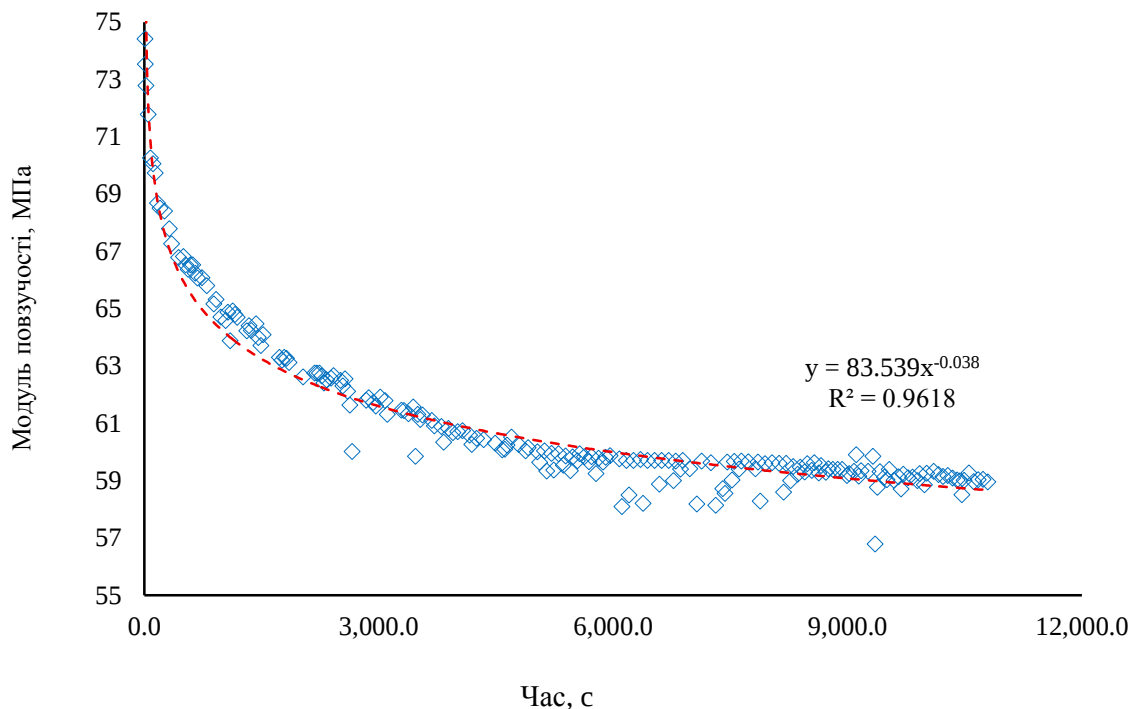


Рис. 4. Модуль повзучості термічно модифікованої деревини *Picea abies* у часі (температура модифікування 180°C, навантаження 25Н)

Fig. 4. Creep modulus of thermally modified Norway spruce wood over time (modification temperature 180°C, load 25 N)

Представлена графічна залежність (рис. 4) відображає кінетику зміни модуля повзучості деревини ялини європейської, після термічної модифікації за температури 180°C, в умовах дії постійного навантаження 20Н. Загальний характер кривої демонструє класичну для в'язкопружних анізотропних матеріалів тенденцію до нелінійного спадання модуля в часі, що зумовлено зростанням деформацій повзучості під дією статичного навантаження.

За результатами математичного опрацювання експериментальних даних встановлено, що досліджуваний процес із високою достовірністю (коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,963$) описується емпіричним рівнянням степеневого виду. У цій моделі коефіцієнт 83,539 характеризує початкову умовну жорсткість матеріалу, тоді як від'ємний показник степеня (-0,038) визначає інтенсивність релаксаційних процесів. Низьке абсолютне значення степеневого показника свідчить про відносно

високу реологічну стабільність модифікованої деревини ялини європейської та повільне проходження деформаційних процесів після початкового навантаження.

Аналіз динаміки зміни модуля дає змогу умовно виділити три характерні стадії процесу. На початковому етапі (0-1500 с) спостерігається зона несталої повзучості з максимальною швидкістю падіння модуля від значення 75МПа до 64МПа, що пов'язано з реалізацією пружних та пружно-еластичних деформацій структури. Наступний перехідний етап (1500-6000 с) характеризується суттєвим уповільненням швидкості деградації модуля повзучості. На заключній стадії (6000-11000 с) крива асимптотично наближається до умовно сталого значення в діапазоні 59-60 Па, що свідчить про перехід у фазу усталеної повзучості. Наявність певного розкиду експериментальних точок на цьому етапі можна пояснити неоднорідністю внутрішньої будови деревини або ж похибками

вимірювання на тривалому проміжку часу, проте загальний тренд залишається незмінним.

Отримані результати дають підставу стверджувати, що термічна модифікація за температури 180°C, ймовірно через часткову деструкцію геміцелюлоз та зниження гігроскопічності, забезпечує матеріалу підвищений опір повзучості, оскільки після перших 20-30 хв. навантаження модуль стабілізується, втративши близько 18% від початкового значення.

Встановлено тісну залежність реологічних властивостей деревини ялини від температури її термічного оброблення з демонстрацією кінетики деформації під навантаженням у часі (рис. 5). Аналіз кривих дає підставу стверджувати, що

термічна модифікація суттєво змінює механічну стійкість матеріалу, причому цей вплив має чітко виражений градаційний характер.

Група зразків, що модифікувались за температури 210°C, демонструє найвищий рівень деформації впродовж усього періоду спостереження. Така поведінка пояснюється глибокими структурними змінами на рівні клітинних стінок, спричиненими термодеструкцією. Внаслідок цього матеріал втрачає свою первинну жорсткість (знижується модуль пружності), і під дією прикладеного навантаження відбувається значне зміщення структурних елементів, що на графіку відображається як стрімке зростання кривої деформації.

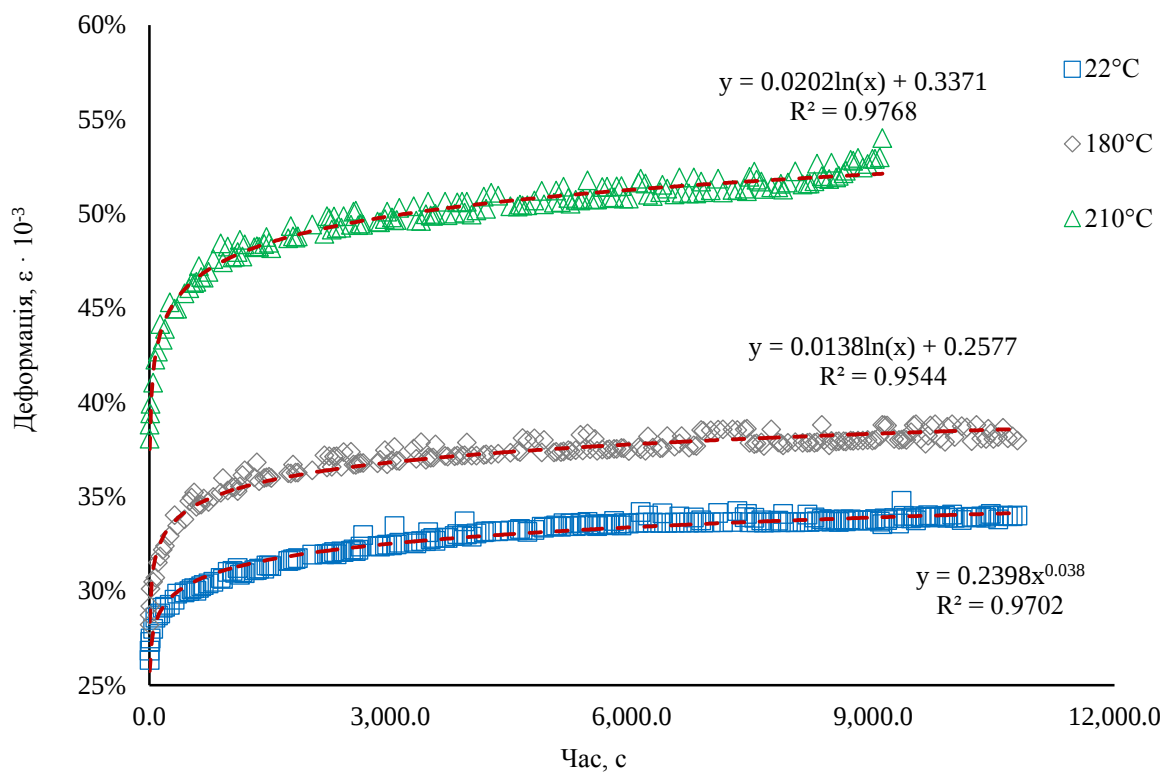


Рис. 5. Кінетика деформаційних процесів термічно модифікованої і немодифікованої деревини *Picea abies* у часі (криві повзучості за змінних температурах модифікування)

Fig. 5. Time-dependent deformation processes of thermally modified and unmodified Norway spruce wood (creep curves at varying modification temperatures)

Графічна залежність для модифікованої деревини за температури 180°C засвідчує, що за цієї температури починається процес термічного розкладання компонентів деревини, проте їх інтенсивність значно менша порівняно з показниками термічно модифікованої деревини ялини за температури 210°C. У цьому випадку деформаційні процеси відбуваються не так виражено, що вказує на те, що каркас клітинних стінок, хоча й зазнав певних трансформацій, все ще зберігає частину своєї механічної опірності,

переважаючи за цим показником високотемпературно модифіковану деревину, але поступаючись необробленій деревині.

Найменшу деформацію та, відповідно, найвищу стабільність форми під навантаженням виявляє контрольна група немодифікованої деревини (22°C). Це пояснюється збереженням природної, неушкодженої структури полімерних компонентів – целюлози, геміцелюлоз та лігніну. Відсутність термічної деградації забезпечує максимальну жорсткість матеріалу, що дає йому

змогу ефективно протистояти механічним навантаженням з мінімальними змінами геометричних параметрів у часі (рис. 6).

Характер наростання деформації для всіх трьох груп зразків має подібну динаміку. Спостережено фазу швидкого початкового деформування (пружна та первинна в'язко-пружна реакція), яка з часом уповільнюється, переходячи у стадію усталеної повзучості. Проте суттєва відмінність у кінцевих значеннях деформації (де різниця між немодифікованою та модифікованою деревиною за температури 210°C сягає майже двократно) однозначно підтверджує зниження механічної жорсткості деревини ялини внаслідок високотемпературного оброблення.

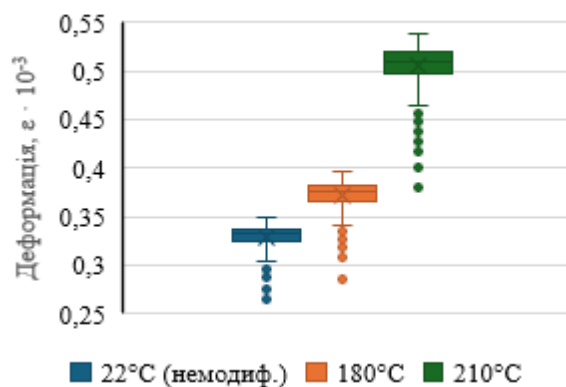


Рис. 6. Діаграма зміни деформацій деревини *Picea abies* (розподіл в межах усієї вибірки)

Fig. 6. Strain variation diagram of Norway spruce wood (distribution across the entire sample set)

Діаграма розмаху (див. рис. 6) ілюструє статистичний розподіл значень деформації деревини ялини, даючи змогу кількісно оцінити вплив температури на реологічні властивості матеріалу. Аналіз медіанних значень демонструє нелінійну динаміку зростання податливості: порівняно з контрольною групою (22°C), термічне оброблення за температури 180°C призводить до помірного підвищення деформативності в межах 13-15%, що відображає початкову стадію змін у структурі деревини.

Натомість застосування жорсткішого режиму модифікації за температури 210°C провокує критичне зниження жорсткості, внаслідок чого медіанний показник деформації зростає на 50-55% відносно немодифікованої деревини. Варто також зазначити, що різниця між двома модифікованими групами (180°C та 210°C) також є значною і становить близько 35%, що підтверджує інтенсифікацію процесів термодеструкції та суттєву втрату опірності навантаженням саме в цьому температурному інтервалі, незважаючи на наявність широкого

діапазону варіабельності даних для високотемпературної групи.

Дискусія (Discussion).

Результати експериментальних досліджень, апроксимовані за допомогою моделі Бюргерса, підтверджують результати, отримані Xing et al., (2021), що термічне модифікування деревини в інертному середовищі має суттєвий вплив на її реологічні властивості, зокрема на кінетику деформації повзучості під дією тривалого статичного навантаження. Результати з використанням таких моделей корелюються з результатами представленими в інших роботах (Engelund & Svensson, 2011; Navi & Stanzl-Tschegg, 2009; Wang et al., 2019) щодо використання феноменологічних моделей для опису в'язкопружності деревини. Встановлено, що зміна деформаційних характеристик матеріалу носить чітко виражений градаційний характер, який прямо корелює з температурним режимом оброблення. Всі досліджені зразки продемонстрували класичну реологічну поведінку в'язкопружного матеріалу з переходом від стадії несталості до усталеної повзучості, що фрагментарно підтверджує результати, отримані Montero et al. (2012).

Отримані нами експериментальні результати реологічних показників узгоджуються з класичними концепціями термомодифікування деревини шпилькових порід (Esteves & Pereira, 2009; Militz & Altgen, 2014), але частково відрізняються від даних, одержаних Hering & Niemz (2012), які вказують на стабільність або підвищення жорсткості за помірних температур. У наукових працях (Engelund, & Salmen, 2012; Hering, & Niemz, 2012) зазначається, що термічна модифікація зазвичай призводить до зниження повзучості деревини шпилькових порід у часі. Це традиційно пояснюють деградацією геміцелюлозу (які відповідають за в'язку складову) та утворенням тривимірної сітки зшитого лігніну, що робить матеріал більш пружним і стабільним. Емпіричні дані цього дослідження демонструють протилежну поведінку при випробовуваннях на розтяг: контрольна група (немодифікована деревина, 22°C) виявила найменшу деформацію та найвищу жорсткість. Модифікація за 180°C підвищила деформативність на 13-15%, а жорсткий режим за 210°C призвів до критичного зростання деформації (на 50-55% порівняно з немодифікованими зразками). Ця розбіжність є ключовим елементом наукової новизни даної роботи. Більшість класичних досліджень (Bekhta, & Niemz, 2003; Navi, & Stangerlin, 2006) фокусуються на статичному згині, стисненні або стабільності розмірів. Проте за умов чистого розтягу вздовж волокон деструкція геміцелюлозу та ослаблення зв'язків у матриксі клітинної стінки призводять до втрати мікроструктурної

цілісності, що підтверджено проведеним дослідженням у рамках цієї роботи. Це також підтверджує гіпотезу, яка згадується у праці Placet et al. (2008) щодо суттєвого впливу стану аморфної матриці на термодеградацію механічних властивостей.

Дослідження хімізму процесу модифікування іншими авторами (Alén et al., 2002; Hill et al., 2009, 2021; Windeisen et al., 2007) чітко розмежовують температурні режими. До 180°C зміни мають переважно помірний характер (початок деградації геміцелюлоз), тоді як вище 200°C процеси термохімічного розпаду полімерів деревини стають деструктивними. Отримані за результатами цієї роботи дані повністю корелюють із цією градацією. Перехід від 180°C до 210°C зумовлює значну зміну деформативності (на ~35% між модифікованими групами). Отриманий результат підтверджує, що для ялини європейської модифікування за температури 180°C, з погляду можливості її використання у будівельних конструкціях, є оптимальним режимом (каркас клітинних стінок зберігає частину опірності), тоді як 210°C є критичною точкою, де інтенсифікується деструкція супутніх компонентів целюлози.

Теоретичне значення дослідження полягає у розмежуванні впливу деградації геміцелюлоз та перебудови лігніну на реологію деревини за відсутності кисневого чинника. З прикладного погляду доведено, що режим ТМ в азоті за 180°C є оптимальним для конструкційних елементів, оскільки забезпечує стабільність форми за мінімальної втрати жорсткості. Режим 210°C через втрату механічної опірності понад 50% повинен бути повністю виключений для деталей, які працюють в умовах навантаженого стану. Отримані залежності дають змогу прогнозувати довготривалі деформації виробів із модифікованої деревини ялини європейської. Обмеженнями роботи є масштабний ефект (використання дрібних бездефектних зразків заболоні), короткий час витримки (10 хв.) та перманентні температурно-вологісні фактори під час проведення експерименту, що унеможливило аналіз механосорбційної повзучості.

Перспективи подальших експериментальних досліджень в цьому напрямі полягають у проведенні тривалих реологічних

випробувань повнорозмірних промислових елементів деревини в умовах циклічних коливань вологості і температури навколишнього середовища, що дасть змогу змоделювати реальну експлуатаційну поведінку конструкцій з термічно модифікованої деревини ялини європейської.

Висновки (Conclusions).

1. Досліджено вплив захисного інертного середовища, яке, на відміну від технологій модифікування в середовищі перегрітої пари, дає змогу уникнути окислювальних процесів та змістити механізм деструкції в бік м'якого піролізу і дегідратації, на зміну реологічних властивостей деревини від температури модифікування.

2. Встановлено нелінійну динаміку змін в'язкопружних характеристик деревини ялини європейської залежно від температурних режимів.

3. Модифікування деревини за помірних температур на рівні 180°C призводить до відносно незначного підвищення деформативності матеріалу в межах 13-15% порівняно з контрольною групою (не модифікована деревина), що свідчить про початкову стадію структурних трансформацій, де деградація геміцелюлоз не призводить до суттєвої втрати жорсткості.

4. Підвищення температури оброблення до 210°C зумовлює різку зміну реологічної поведінки та призводить до зниження механічної жорсткості термічно модифікованої деревини ялини європейської, внаслідок чого показник деформації зростає на 52-57%, а різниця у кінцевих значеннях деформації між немодифікованою та термічно модифікованою деревиною за високих температур становить 45-47%.

5. Термічне модифікування деревини за температури 210°C, попри покращення показників біостійкості та розмірної стабільності, призводить до суттєвого зниження опору тривалому навантаженню. Інтенсифікація процесів повзучості та зростання залишкових деформацій обмежують використання такої деревини в несучих будівельних конструкціях. Рекомендовано оптимізувати параметри термооброблення або враховувати фактичне зниження модулів пружності в процесі проектування конструкційних елементів.

Список літератури (References)

Alén, R., Kotilainen, R., & Zaman, A. (2002). Thermochemical behavior of Norway spruce (*Picea abies*) at 180–225 °C. *Wood Science and Technology*, 36, 163–171. <https://doi.org/10.1007/s00226-001-0133-1>

Armstrong, L. D., & Kingston, R. S. T. (1960). Effect of moisture changes on creep in wood. *Nature*, 185, 862–863. <https://doi.org/10.1038/185862c0>

Bekhta, P., & Niemz, P. (2003). Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce

- wood. *Holzforschung*, 57(5), 539–546. <https://doi.org/10.1515/HF.2003.080>
- Engelund, E. T., & Salmén, L. (2012). Tensile creep and recovery of Norway spruce influenced by temperature and moisture. *Holzforschung*, 66(2), 259–265. <https://doi.org/10.1515/hf-2011-0172>
- Engelund, E. T., & Svensson, S. (2011) Modelling time-dependent mechanical behaviour of softwood using deformation kinetics. *Holzforschung*, 65, 231–237. <https://doi.org/10.1515/HF.2011.011>
- Esteves, B., & Pereira, H. (2009). Wood modification by heat treatment: A review. *BioResources*, 4(1), 370–404. <https://doi.org/10.15376/biores.4.1.370-404>
- Gérardin, P. (2016). New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood – a review. *Annals of Forest Science*, 73(3), 559–570. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0531-4>
- Hering, S., & Niemz, P. (2012). Creep of thermally modified wood under alternating climates. *Wood Material Science & Engineering*, 7(2), 74–79. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119899>
- Hill, C. A. S., Altgen, M., & Rautkari, L. (2021). Thermal modification of wood – a review: chemical changes and hygroscopicity. *Journal of Materials Science*, 56(11), 6581–6614. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05722-z>
- Hill, C., Norton, A., & Newman, G. (2009). The Water Vapor Sorption Behavior of Natural Fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 112, 1524–1537. <https://doi.org/10.1002/app.29725>
- Kutnar, A., Kamke, F., & Sernek, M. (2008). Density profile and morphology of viscoelastic thermal compressed wood. *Wood Science and Technology*, 43, 57–68. <https://doi.org/10.1007/s00226-008-0198-1>
- Metsä-Kortelainen, S., Antikainen, T., & Viitaniemi, P. (2006). The water absorption of sapwood and heartwood of Scots pine and Norway spruce heat-treated at 170°C, 190°C, 210°C and 230°C. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 64(1), 37–44. <https://doi.org/10.1007/s00107-005-0063-y>
- Militz, H., & Altgen, M. (2014). Processes and Properties of Thermally Modified Wood Manufactured in Europe. *Deterioration and Protection of Sustainable Biomaterials*, 1158, 269–285. <https://doi.org/10.1021/bk-2014-1158.ch016>
- Montero, C., Clair, B., Almeras, T., Lee, A., & Gril, J. (2012). Relationship between wood elastic strain under bending and cellulose crystal strain. *Composites Science and Technology*, 72(2), 175–181. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.10.014>
- Navi, P., & Stangerlin, D. M. (2006). The machining of heat-treated wood. In Proceedings of the 2nd International Conference on Environmentally-Compatible Forest Products (ECOWOOD), Fernando-Pessoa University, Porto, Portugal. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-99418-0>
- Navi, P., & Stanzl-Tschegg, S. (2009) Micromechanics of creep and relaxation of wood. A review COST Action E35 2004–2008: wood machining – micromechanics and fracture. *Holzforschung*, 63, 186–195. <https://doi.org/10.1515/HF.2009.013>
- Peura, M., Kölln, K., Grotkopp, I., Saranpää, P., Müller, M., & Serimaa, R. (2007). The effect of axial strain on crystalline cellulose in Norway spruce. *Wood Science and Technology*, 41, 565–583. <https://doi.org/10.1007/s00226-007-0141-x>
- Placet, V., Passard, J., & Perré, P. (2008). Viscoelastic properties of wood across the grain measured under water-saturated conditions up to 135°C: Evidence of thermal degradation. *Journal of Materials Science*, 43, 3210–3217. <https://doi.org/10.1007/s10853-008-2546-9>
- Qin, L., Lin, L., Fu, F., & Fan, M. (2018). Micromechanical properties of wood cell wall and interface compound middle lamella using quasi-static nanoindentation and dynamic modulus mapping. *Journal of Materials Science*, 53, 549–558. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1185-4>
- Sandberg, B., Haller, P., & Navi P. (2013) Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. *Wood Material Science & Engineering*, 8(1), 64–88. <https://doi.org/10.1080/17480272.2012.751935>
- Sandberg, D., Kutnar, A., & Mantanis, G. (2017). Wood modification technologies: A review. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 10(6), 895–908. <https://doi.org/10.3832/for2380-010>
- Wang, X., Chen, X., Xie, X., Wu, Y., Zhao, L., & Li, Y. (2018). Effects of thermal modification on the physical, chemical and micromechanical properties of Masson pine wood (*Pinus massoniana* Lamb.). *Holzforschung*, 72(12). <https://doi.org/10.1515/hf-2017-0205>
- Wang, D., Elin, X., & Feng F. (2022). The differences of viscoelastic properties between the secondary wall S2 layer and compound middle lamella of thermally treated wood. *Wood Science and Technology*, 56, 1509–1525. <https://doi.org/10.1007/s00226-022-01409-7>
- Wang, D., Fu, F. & Lin, L. (2022). Molecular-level characterization of changes in the mechanical properties of wood in response to thermal

- treatment. *Cellulose*, 29, 3131–3142. <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04471-3>
- Wang, D., Lin, L., & Fu, F. (2019) The difference of creep compliance for wood cell wall CML and secondary S2 layer by nanoindentation. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 9, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11043-019-09436-x>
- Windeisen, E., Strobel, C., & Wegener, G. (2007). Chemical changes during the production of thermo-treated beech wood. *Wood Science and Technology*, 41(6), 523–536. <https://doi.org/10.1007/s00226-007-0146-5>
- Wu, Y., Zhang, H., & Zhang, Y. (2019). Effects of thermal treatment on the mechanical properties of larch (*Larix gmelinii*) and red oak (*Quercus rubra*) wood cell walls via nanoindentation. *BioResources*, 14(4), 8048–8057. <https://doi.org/10.15376/biores.14.4.8048-8057>
- Xing, D., Li, J., & Wang, X. (2016). In situ measurement of heat-treated wood cell wall at elevated temperature by nanoindentation. *Industrial Crops and Products*, 87, 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.04.017>
- Xing, D., Wang, X., & Wang, S. (2021). Temperature-Dependent Creep Behavior and Quasi-Static Mechanical Properties of Heat-Treated Wood. *Forests*, 12, 968. <https://doi.org/10.3390/f12080968>

Rheological properties of thermally modified spruce wood under a nitrogen atmosphere

Ya. Shchupakivskyy¹, Y. Andrashek², R. Shchupakivskyy³, O. Savchak⁴

Currently, wood remains a primary material for construction and finishing applications due to its inherent advantages, including accessibility, environmental sustainability, ease of processing, and renewability. However, the structural application of wood is constrained by several limitations: low resistance to mechanical, atmospheric, thermal, and biological stressors; susceptibility to degradation; and the aesthetic disparity between affordable and premium species. To mitigate these disadvantages while maintaining environmental integrity, thermal modification is employed. This process enhances biological durability and ensures the dimensional stability of wood products during operational cycles. The study utilized radial samples of spruce wood with a rectangular cross-section $35 \times 12 \times 0.6$ mm.

These samples underwent thermal modification at temperatures of 180°C and 210°C within a nitrogen-controlled environment. The viscoelastic behavior (creep) under constant loading was analyzed using a Gabo Eplexor 25N Dynamic Mechanical Analyzer (DMA). The experimental protocol was governed by a software module based on the Burgers model. Primary data acquisition and processing were conducted via the GABO software suite. Viscoelastic characteristics were evaluated in tensile mode using "Time Sweep" and "Temperature Sweep" modules at a quasi-static load frequency ($f = 0...0.01$ Hz). The investigation established the correlation between thermal modification temperature in nitrogen, medium and the resulting changes in viscoelastic

¹ Yaroslav Shchupakivskyy – PhD Student at the Department of environmental and wood protection technologies, and life safety. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka St., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: shchupakivskyy.y@nltu.lviv.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1434-8302>

² Yosyp Andrashek – PhD, associate professor at the Department of environmental and wood protection technologies, and life safety. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka St., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: joseph.andrashek@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1011-0089>

³ Roman Shchupakivskyy – PhD, associate professor at the Department of sawmilling, joinery and wooden building products. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka St., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: roman.shchupakivskyy@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5242-1267>

⁴ Orest Savchak – PhG Student at the Department of environmental and wood protection technologies, and life safety. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka St., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: orest.savchak@nltu.lviv.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4970-9459>

characteristics and creep modulus.

Analysis of deformation kinetics under load indicates that thermal modification significantly alters the mechanical stability of the material. This effect demonstrates a distinct gradational dependence on the treatment temperature. The comparative analysis of deformation ranges between modified and unmodified spruce wood provides a quantitative basis for evaluating the impact of thermal treatment on the material's rheological properties. It has been demonstrated that modification at a moderate temperature of 180°C results in a relatively minor increase in the material's deformability, within the range of 13-15% compared to the control group. This indicates the initial stage of structural transformations, where the degradation of hemicelluloses does not lead to a substantial loss of stiffness. Increasing the treatment temperature to 210°C induces a sharp shift in rheological behavior and leads to a reduction in the mechanical stiffness of the thermally modified European spruce. Consequently, the deformation rate increases by 52-57%, and the difference in ultimate deformation values between the unmodified and

high-temperature thermally modified wood reaches 45-47%. It has been established that the thermal modification of wood at 210°C, despite improving biological durability and dimensional stability, leads to a significant reduction in resistance to sustained loading. The intensification of creep processes and the increase in residual deformations restrict the application of such wood in load-bearing building structures. It is recommended to either optimize the thermal treatment parameters or account for the actual decrease in the modulus of elasticity when designing structural elements.

The findings offer a quantitative assessment of how temperature influences the structural integrity of spruce wood. Based on the established viscoelastic profiles, practical recommendations are proposed for the industrial application of thermally modified spruce wood in environments requiring high dimensional and mechanical stability.

Key words: modulus of elasticity; young's modulus; strains; deformations; creep performance; inert medium.