ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ДИФУЗІЇ ВОЛОГИ ЧЕРЕЗ ПОЛІМЕРНУ ОБОЛОНКУ ТЕРМІЧНО МОДИФІКОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ

Ю. В. ЦАПКО, доктор технічних наук, професор
<http://orcid.org/0000-0003-0625-0783>, e-mail: juriyts@ukr.net

О. Ю. ГОРБАЧОВА, кандидат технічних наук
<http://orcid.org/0000-0002-7533-5628>, e-mail: gorbachova.sasha@ukr.net
Національний університет біоресурсів і природокористування України

Проведено аналіз процесу термічного модифікування деревини, яку було отримано шляхом контрольованого процесу нагрівання. Унікальні технологічні властивості (довговічність, низька гігроскопічність і розмірна стабільність) термомодифікованої деревини роблять можливим її застосування у різних сферах. Унаслідок впливу температури виникають деякі хімічні зміни у структурах компонентів клітинної стінки (лігнін, целюлоза та геміцелюлоза) деревини. Це призводить до збільшення щільності, твердості, підвищується гідрофобність (відштовхування води), тим самим зменшується здатність деревини вбирати вологу і набрякати. Вироби поглинають вологу поступово, менш схильні до набрякання та всихання, але все-таки потребують еластичних покриттів. Доведено, що термооброблена деревина з часом набуває сірого кольору під впливом сонячних променів, а тому необхідне додаткове оброблення поверхні покриттям. Додаткове нанесення захисних речовин на поверхні виробів із термомодифікованої деревини сприяє стабільності розмірів і захищає від швидкого вивітрювання поверхні за умов відкритого повітря. Прозорі покриття та масла не захищають поверхні від знебарвлення під час вивітрювання. Їх рекомендують для виробів із термічно модифікованої деревини, які експлуатуються подалі від прямих сонячних променів та дощу. Математично змодельовано параметри проникнення вологи у деревину на основі квазістаціонарного рівняння дифузії вологи через полімерну плівку на поверхні плоского зразка. Експериментально досліджено динаміку зміни частки вологи в термічно модифікованій деревині за різних режимних параметрів. Отримані математичні співвідношення на основі результатів експериментальних досліджень дають можливість здійснювати розрахунки коефіцієнта дифузії вологи у термічно модифікованій деревині за наявності полімерної оболонки. Встановлено, що застосування воскового покриття на поверхні виробу зменшує процес дифузії вологи у понад 10 разів для поверхонь, оброблених уже за температури 160 °C упродовж однієї години, що дає змогу використовувати її на об'єктах із підвищеною вологою.

Ключові слова: деревина, ефективність термічної модифікації, вологопоглинання, дифузія води, розклад, стійкість деревини.

Актуальність та аналіз останніх досліджень. Унікальні технологічні властивості (довговічність, низька гігроскопіч-

ність і розмірна стабільність) термомодифікованої деревини роблять можливим її застосування в різних сферах.

Матеріал часто використовують дизайнери для внутрішнього оброблення завдяки набутому забарвленню під дією високої температури. З огляду на стабільність геометричних розмірів і стійкість до зовнішнього середовища термомодифіковану деревину використовують у виробництві меблів, віконних рам, дверей, паркетної дошки. Jirouš-Rajković & Miklečić (2021) стверджують про можливе використання цього матеріалу як зовнішнього облицювання фасадів, у вигляді терасної дошки і садових доріжок. Матеріал добре підходить для обшивання сауни і лазень.

Особливості гальмування процесу просування вологи у термічно модифікованій деревині полягають у тому, що утворюються водостійкі компоненти, а також капілярно пористі елементи, завдяки яким на поверхні деревини формується водозахисний шар (Tsapko et al., 2021).

Стійкість термообробленої деревини до атмосферних впливів (УФ-проміння, змочування) є дещо кращою порівняно з необробленою деревиною, однак потрібне додаткове оброблення поверхні покриттями. На ринку пропонують багато речовин для зовнішнього оброблення деревини. Для горизонтальних поверхонь (палуба, терасне покриття, садові доріжки) Miklečić (2010) рекомендує проводити проникальне оброблення за допомогою масел. На ринку є багато масел, які зберігають «природний» вигляд і чинять опір атмосферним впливам.

Відомо, що термооброблена деревина з часом набуває сірого кольору. Як повідомляли Schaller & Rogez (2007), прозорі покриття та масла не захищають поверхні від знебарвлення під час вивітрювання. Таке поверхнєве оброблення рекомендують для виробів із термічно модифікованої деревини, які експлуатують подалі від прямих со-

нячних променів і дощу. Останнім часом усе більше уваги приділяють впливу сонячного світла на поверхню термообробленої деревини. Розроблено новий підхід щодо стабілізації темного кольору термомодифікованої деревини, що поєднує екрани видимого світла з органічними поглиначами УФ-світла (Slabejová et al., 2019).

Опорядження термообробленої деревини схоже на оброблення висушеної деревини, однак потрібно враховувати зміну деяких її властивостей. Akyildiz & Kesik (2014) виявили, що термічно оброблена деревина стає більш гідрофобною; поглинає вологу поступово; менш схильна до набрякання та всихання, але все-таки потребує еластичних покриттів; має темніший колір, який може вицвітати через вплив світла.

Vernois (2001) зауважив, що розтріскування термомодифікованої деревини відбувається значно менше порівняно з натуральною внаслідок покращення стабільності розмірів. Розтріскування деревини ялини та сосни після термомодифікування, що потрапляє в зовнішні умови без захисного покриття, було еквівалентно розтріскуванню необробленої деревини з непігментованими покриттями. Jëamsëa et al. (2000) виявили, що нанесення масла не запобігало появі тріщин на термомодифікованій деревині після експозиції у природних умовах.

А от Miklečić (2010) обробленням маслом вдалося зменшити розтріскування зразків термічно обробленої деревини. Результати досліджень свідчать, що під час прискореного вивітрювання зразки без захисного поверхневого покриття мали менше поверхневих тріщин, ніж термічно оброблені зразки без покриття.

Pavlič et al. (2021) вивчали сумісність дев'яти різних покриттів із термічно модифікованою деревиною со-

сни шотландської. Покриття, нанесені на термічно модифіковану деревину, демонстрували кращі показники, ніж покриття на немодифікованій деревині. Це явище автори пояснювали зміненими характеристиками термічно модифікованої деревини, такими як нижчий рівноважний вміст води, нижча водопроникність, підвищена стабільність розмірів, краща стійкість до ультрафіолетового випромінювання та стійкість до грибків синіх плям порівняно з немодифікованою деревиною. Також було продемонстровано краще проникнення покриття у модифіковану деревину та краще її змочування захисними речовинами. Крім того, лакофарбові матеріали на основі розчинників демонстрували кращі результати після одного року зовнішнього вивітрювання порівняно із водними покриттями.

Оліфи забезпечують найкращий захист виробів із деревини, однак їх застосування обмежується тривалою полімеризацією. Arminger et al. (2020) досліджували поведінку висихання лляної олії, тунгової олії та їх суміші 1:1. Повторювані вимірювання кута контакту з водою покриттів, нанесених на деревину бука та дуба, показали чіткі відмінності у змочуванні. Тунгова олія надавала гідрофобність усім зразкам деревини незабаром після нанесення, навіть у разі використання без сушарки. Лляна олія потребувала довшого часу сушіння і була більш сприйнятливою до впливу субстрату, однак у кінцевому підсумку досягала найвищих кутів контакту після примусового сушіння.

Отже, з літературних джерел встановлено, що термічне модифікування деревини позитивно впливає на стійкість до температурно-вологісних факторів. Додаткове оброблення поверхні захисними речовинами сприяє стабільності розмірів виробу та захищає від

швидкого вивітрювання поверхні за умов відкритого повітря. На ринку постійно з'являються нові товари, які призначені для захисту кольору деревини в інтер'єрі та для запобігання зміни розмірів виробу в природних умовах. Це свідчить про доцільність проведення цього дослідження із визначення ефективності захисту виробів із деревини лакофарбовими матеріалами, що сприятиме зростанню терміну застосування будівельних конструкцій в умовах навколишнього середовища.

Метою дослідження є оцінка ефективності оброблення поверхні маслом-воском на основі визначеного коефіцієнта дифузії на стійкість виробів із термомодифікованої деревини до температурно-вологісних умов середовища.

Матеріали та методи дослідження. Для визначення вологопоглинання було використано довільно відібрані 90 зразків деревини граба радіального перерізу, попередньо висушені. Зразки мали розміри 20×10×10 мм. Далі зрази пройшли термомодифікацію за температур 160, 190 і 220 °С, витримка в камері 1, 10, 20 годин. Відповідно до режимних параметрів термомодифікування всі зразки було поділено на дев'ять груп і групу контрольних зразків (немодифікована деревина) (рис. 1).

Далі зразки обробили маслом-воском методом занурення з повторним обробленням після висихання першого шару за 24 години. Після висихання зразки помістили в ексікатор на 1 добу. Після чого зафіксували розміри та вагу кожного зразка. Процедура повторювали на 2, 3, 6, 9, 13, 20, 30 добу.

Результати дослідження та їх обговорення. Було змодельовано параметри дифузії води у деревину. Квазістаціонарне рівняння дифузії води через полімерну плівку на поверхні плоского зразка деревини має такий вигляд:

Рис. 1. Дослідні зразки необробленої (контрольні) та термомодифікованої деревини

$$\frac{d^2 C_w}{dx^2} = 0, \quad (1)$$

де C_w – концентрація вологи на відстані x від середини зразка деревини (за товщиною).

Подвійний інтеграл рівняння (1) обчислюємо за формулою:

$$C_w = Ax + B, \quad (2)$$

де A і B – постійні, які знаходимо з граничних умов:

за $x = H$

$$C_w = C_0, \quad (3)$$

за $x = H + \delta$

$$C_w = C_0, \quad (4)$$

де H – половина товщини зразка,

δ – товщина полімерної оболонки,

C_0 , C_1 – концентрація вологи у середині зразка і в зовнішньому середовищі відповідно.

Шляхом математичних перетворень розв'язок (2) можна подати у вигляді:

$$C_x = \delta^{-1}(C_0(H + \delta) - C_1H - (C_0 - C_1)x). \quad (5)$$

Оскільки дифузійний потік вологи через поверхню деревини, покриту оболонкою, становить:

$$j = -S \cdot D \frac{dC_x}{dx}, \quad (6)$$

де S – площа поверхні зразка, то після підстановки (5) у (6) і інтегрування отримуємо вираз для дифузійного потоку вологи:

$$j = \frac{S \cdot D(C_0 - C_1)}{\delta}. \quad (7)$$

Тоді рівняння масообмінного процесу через оболонку матиме вигляд:

$$\frac{S \cdot D(C_0 - C_1)}{\delta} = V_1 \frac{dC_1}{dt}, \quad (8)$$

де τ – час;

V_1 – об'єм зовнішнього середовища.

Використовуючи рівняння матеріального балансу, знаходимо невідомі величини рівняння (8) C_0 і C_1 :

$$V_0 C_0 + V_1 C_1 = m, \quad (9)$$

де V_0 – об'єм деревини,

m – маса води у зразку перед початком дослідження.

Із рівняння (9) знаходимо значення:

$$C_0 = C_0^* - \gamma C_1, \quad (10)$$

де $C_0^* = \frac{m}{V_0}$ – початкова концентрація води у зразку;

$\gamma = \frac{V_1}{V_0}$ – відношення об'ємів зовнішнього середовища та зразка.

Підставляючи (10) у (8), отримуємо рівняння для визначення C_1 :

$$\frac{dC_1}{d\tau} = \frac{S \cdot D}{\delta \cdot V_1} (C_0^* - (1 + \gamma) C_1). \quad (11)$$

Інтеграл рівняння (11) за умови $C_1|_{\tau=0} = 0$ дає такий вираз:

$$\ln\left(\frac{C_0^* - (1 + \gamma) C_1}{C_0^*}\right) = -\frac{D \cdot (1 + \gamma)}{\delta^2 \cdot \gamma} \tau. \quad (12)$$

Із рівняння (12) випливає, що концентрація води у зразку змінюється з урахуванням $\gamma \gg 1$ за залежністю:

$$C_1 = \frac{C_0^*}{\gamma} \left(1 - e^{-\frac{D}{\delta^2} \tau}\right). \quad (13)$$

Зробивши математичні перетворення, рівняння (12) можна подати у вигляді:

$$\ln\left(\frac{C_0^*}{C_0^* - \gamma C_1}\right) = \frac{D}{\delta^2} \tau. \quad (14)$$

Товщина полімерної оболонки відповідала значенню близько 10 мк, вологість в ексікаторі становила 100 %, а відношення об'ємів зовнішнього середовища до зразка – 5. У табл. 1 наведено приріст маси зразків за їх експозиції у вологому середовищі.

На рис. 2 показано залежність (14) від часу τ для контрольного зразка, на рис. 3 – для режиму оброблення 160/1, на рис. 4 – для 190/1, на рис. 5 – для режиму оброблення 220/1. Тангенс кута нахилу ($\tan \alpha$) цієї прямої дає коефіцієнт за τ , тобто:

$$(\tan \alpha) = \frac{D}{\delta^2}. \quad (15)$$

Рис. 2. Динаміка зміни частки води в деревині для контрольного зразка

1. Результати експериментального визначення приросту маси зразків

Режим термічного модифікування		Зміна маси зразків під час витримування у вологому середовищі, г								
		Час витримки в ексікаторі, діб								
$T, ^\circ\text{C}$	τ , год	0	1	2	3	6	9	10	20	30
контрольні		1,82	1,86	1,88	1,91	1,94	1,99	2,00	2,03	2,03
160	1	1,87	1,89	1,91	1,94	1,98	2,02	2,03	2,07	2,08
	10	1,87	1,88	1,90	1,92	1,97	2,00	2,01	2,03	2,05
	20	1,85	1,86	1,87	1,90	1,95	1,97	1,98	2,00	2,02
190	1	1,95	1,95	1,97	2,00	2,05	2,09	2,08	2,12	2,13
	10	1,86	1,86	1,87	1,90	1,93	1,95	1,96	1,99	2,00
	20	1,82	1,82	1,83	1,84	1,86	1,88	1,89	1,91	1,92
220	1	1,84	1,84	1,85	1,88	1,91	1,93	1,94	1,97	1,99
	10	1,77	1,77	1,77	1,78	1,79	1,81	1,80	1,83	1,84
	20	1,84	1,84	1,84	1,85	1,86	1,88	1,88	1,91	1,92

Рис. 3. Динаміка зміни частки вологи в деревині, термічно модифікованій за температури 160 °C протягом: 1 – 1 години, 2 – 10 годин, 3 – 20 годин

Рис. 4. Динаміка зміни частки вологи в деревині, термічно модифікованій за температури 190 °C протягом: 1 – 1 години, 2 – 10 годин, 3 – 20 годин

За залежністю (15) розраховано коефіцієнти дифузії вологи, які наведено в табл. 2.

Рис. 5. Динаміка зміни частки вологи в деревині, термічно модифікованій за температури 220 °C протягом: 1 – 1 години, 2 – 10 годин, 3 – 20 годин

Висновки і перспективи. Отримані математичні співвідношення на основі результатів експериментальних досліджень дають можливість здійснювати розрахунки коефіцієнта дифузії вологи у термічно модифікованій деревині за наявності полімерної оболонки. Встановлено, що застосування воскового покриття на поверхні виробу зменшує процес дифузії вологи у понад 10 разів для поверхонь, оброблених уже за температури 160 °C упродовж 1 год. Таке покриття значною мірою підвищує термін експлуатації деревини та дає змогу застосовувати її на об'єктах із підвищеною вологістю.

Результати досліджень допоможуть також цілеспрямовано вирішувати подальші завдання щодо створення нових засобів і способів захисту деревини відповідно до умов експлуатації деревини на різних об'єктах.

2. Значення коефіцієнта дифузії за вологопоглинання термомодифікованої деревини

Показник	контрольний зразок	Параметри режиму модифікування								
		Температура оброблення, °C								
		160			190			220		
		Тривалість оброблення, год								
		1	10	20	1	10	20	1	10	20
Коефіцієнт дифузії вологи, $\cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$	0,753	0,077	0,0062	0,0047	0,0031	0,0028	0,0015	0,00127	0,000088	0,000177

Список літератури

- Akyildiz, M. H., & Kesik, H. I. (2014). Effect of heat treatment ontheadhesion strength of water based wood varnishes. In L. Nunes, D. Jones, H. Callum et al. (Eds.), *Proceedings of the Seventh European Conference on Wood Modification*. Lisbon, Portugal, 2014.
- Arminger, B., Jaxel, J., Bacher, M., Gindl-Altmutter, W., & Hansmann, C. (2020). On the drying behavior of natural oils used for solid wood finishing. *Progress in Organic Coatings*, 148:105831. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105831>
- Jäämsä, S., Ahola, P., & Viitanen, P. (2000). Long-term natural weathering of coated ThermoWood. *Pigment & Resin Technology*, 29 (2), 68–74. <https://doi.org/10.1108/03699420010317807>
- Jirouš-Rajković, V., & Miklečić, J. (2019). Heat-Treated Wood as a Substrate for Coatings, Weathering of Heat-Treated Wood, and Coating Performance on Heat-Treated Wood. *Advances in Materials Science and Engineering*, 8621486; 8621486, 9. <https://doi.org/10.1155/2019/8621486>
- Miklečić, J., Jirouš-Rajković, V., Pervan, S., & Grujić, S. (2010). Oils usage in finishing of thermally modified wood in outdoor applications. In D. Radovan (Ed.), *Conference: Wood is Good-Transfer of Knowledge In Practice as a Way Out of the Crisis*. University of Zagreb, Faculty of Forestry, Zagreb, Croatia.
- Schaller, C., & Rogez, D. (2007). Light stabilization of modified wood species. In C. A. S. Hill, D. Jones, H. Militz, G. A. Ormondroyd (Eds.), *The Third European Conference on Wood Modification*. Cardiff, UK.
- Slabejová, G., & Vidholdová, Z., Šmidriková, M. (2019). Surface finishes for thermally modified beech wood. *Acta Facultatis Xylogiae Zvolen*, 61 (2), 41–50. <https://doi.org/10.17423/afx.2019.61.2.04>
- Pavlič, M., Petrič, M., & Zigon, J. (2021). Interactions of Coating and Wood Flooring Surface System Properties. *Coatings*, 11 (1), 91. <https://doi.org/10.3390/coatings11010091>
- Tsapko, Yu., Horbachova, O., Tsapko, A., Mazurchuk, S., Zavialov, D., & Buiskiykh, N. (2021). Establishing regularities in the propagation of phase transformation front during timber thermal modification. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/10 (109), 30–36. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.22531>
- Vernois, M. (2001). Heat treatment of wood in France-State of the art. In *Proceedings of Special Seminar of Review on Heat Treatments of Wood*. Antibes, France.

Tsapko Yu. V., Horbachova O. Yu.

ESTABLISHMENT OF MOISTURE DIFFUSION REGULARITIES THROUGH THE POLYMER SHELL OF THERMALLY MODIFIED WOOD

An analysis of the process of thermal modification of wood, which was obtained by a controlled heating process, was done. The unique technological properties (durability, low hygroscopicity and dimensional stability) of thermommodified wood make it possible to use it in various scope. Due to the influence of temperature there are some chemical changes in the structures of the wood cell wall components (lignin, cellulose and hemicellulose). This leads to an increase in density, hardness, improved hydrophobicity (water repellency), thereby reducing their ability to absorb moisture and swell. The products absorb moisture gradually, are less prone to swelling and shrinkage, but still need the elastic coatings application. It is proved that heat-treated wood turns gray over time under the influence of sunlight, and therefore requires additional surface treatment with a coating. Additional protective substances application on the thermo-modified wood products surface promotes dimensional stability and protects against rapid weathering of the surface in open air conditions. The use of transparent coatings and oils does not protect the surface from discoloration during weathering. They are recommended for products are manufactured from thermommodified wood, which are operated away from direct sunlight and rain. The parameters of moisture penetration into wood are mathematically modeled on the basis of the moisture diffusion quasi-stationary equation through the polymer coating on the flat sample surface. The dynamics of moisture content changes in thermally modified wood by different schedules parameters has been experimentally studied. The obtained mathematical relations based on the experimental studies results make it possible to calculate the moisture diffusion coefficient in thermally modified wood in the presence of a polymer shell. It is established that the wax coating application on the surface of the product reduces the moisture diffusion process more than 10 times for surfaces treated at a temperature of 160 °C for 1 hour. That is, such products can be used on objects with high humidity.

Keywords: wood, efficiency of thermal modification, moisture absorption, water diffusion, decomposition, wood stability.

Отримано: 2021-02-15