

носової порожнини, порушення функції кісткового мозку, а також до порушення функції кісткового мозку[1].

Для зниження емісії формальдегіду запропоновано модифікувати клей на основі UF шляхом введення наночастинок оксидів різних металів. Було використано наночастинок алюмінію  $Al^0$ , цинку  $Zn^0$ , заліза  $Fe^0$ , магнію  $Mn^0$ , срібла  $Ag^0$  концентрацією 2- 8%. Частина металів було використано для визначення емісії формальдегіду у зразках ДСП, іншу частину – у зразках фанери. Наночастинок металів було виготовлено електро-іскровим методом на кафедрі технології конструкційних матеріалів та матеріалознавства НУБіП України.

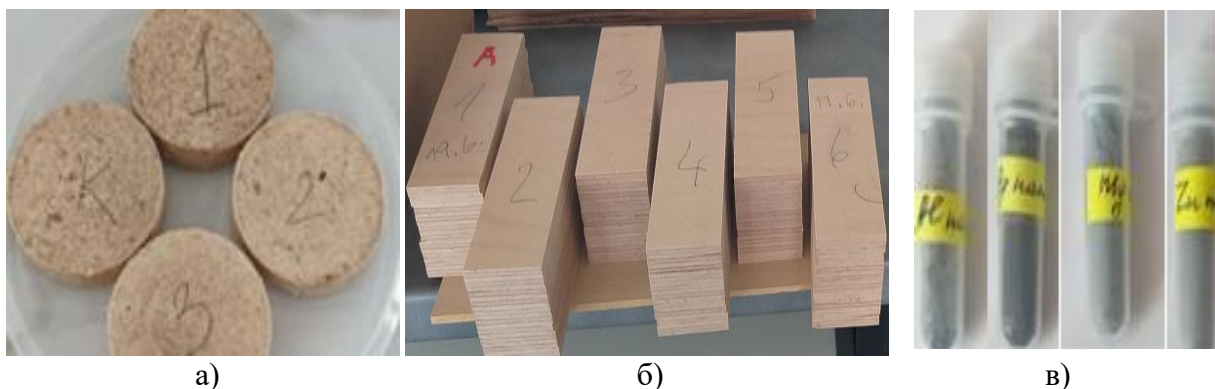


Рис.1 – Зразки ДСП (а), фанери(б).виготовлені із додаванням наночастинок оксидів металів (в)

Під час визначення емісії формальдегіду десикаторним методом визначено, що порівняно із контрольними зразками спостерігалось зменшення вмісту формальдегіду у зразках ДСП при використанні  $Mn^0$  після витримки зразків протягом 16 діб на 19%, а при використанні  $Al^0$   $Zn^0$   $Fe^0$ , після витримки зразків протягом 17 діб на 30%. Зразки фанери, виготовлені із застосування модифікованої UF смоли наночастинками  $Al^0$ ,  $Zn^0$  і  $Ag^0$ тенденція зниження спостерігалася вже після 7 добової витримки. Значно більше зниження ( в середньому майже на 13%) виявилось після вимірювання після 30 добової витримки. У обох випадках кращі результати показали зразки при внесенні наночастинок металів у концентрації 8%.

Наступним етапом досліджень планується визначення фізико-механічних властивостей отриманих зразків ДСП та фанери.

#### Список посилань

1. Kang, D., Hyun, J., Jong-Hyeon, L., Cheol, M., Yeon-Soon, A., YONG, R., 2021. Formaldehyde exposure and leukaemia risk: A comprehensive review and network-based toxicogenomic approach. *Genes and Environment* 43(1): 13

УДК 674.093.26

Лютий П.В., канд. техн. наук

Ортинська Г.Є., канд. техн. наук, доцент

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, [ortynska\\_g@nltu.edu.ua](mailto:ortynska_g@nltu.edu.ua)

#### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ДЕРЕВИННО-ПОЛІМЕРНИХ ПЛИТ ПІСЛЯ ЇХ ГАРЯЧОГО ПРЕСУВАННЯ

Деревинно-полімерні матеріали (ДПМ) – перспективний матеріал, який характеризується добрими експлуатаційними властивостями та використанням у різних галузях промисловості [1]. Залежно від конфігурації та сфери використання кінцевого виробу, ДПМ виготовляють різними способами: екструзією, литтям під тиском,

компресійним пресуванням тощо [1]. ДПМ також можна виготовляти плоским пресуванням у гарячих пресах [2]. Значна кількість досліджень присвячене процесу гарячого процесу пресування ДПМ плоским способом [2]. Розроблено математичні моделі, які дають змогу оптимізувати процес гарячого пресування ДПМ плоским способом пресування [3]. Однак важливим технологічним процесом, який також впливає на властивості ДПМ є після/пост пресовий процес охолодження FPWPC для фіксування його експлуатаційних властивостей. Деякі дослідники описують даний процес як кінцева стадія охолодження до температури 50 °С без детального опису даного процесу: тривалості охолодження, температури плит охолодження [4,5]. Тому постало завдання розробити математичну модель розрахунку тривалості охолодження ДПМ плоского способу пресування у періодичних пресах для встановлення оптимального часу охолодження до температури затвердіння полімеру у внутрішньому шарі ДПМ.

Тривалість, яка затрачається на зімкнення та розімкнення плит преса, а також на підняття та зняття тиску визначається типом і модифікацією пресового обладнання. У основному тривалість охолодження ДПМ буде визначатися тривалістю охолодження матеріалу до заданої температури на величину  $H$  (рис.1).

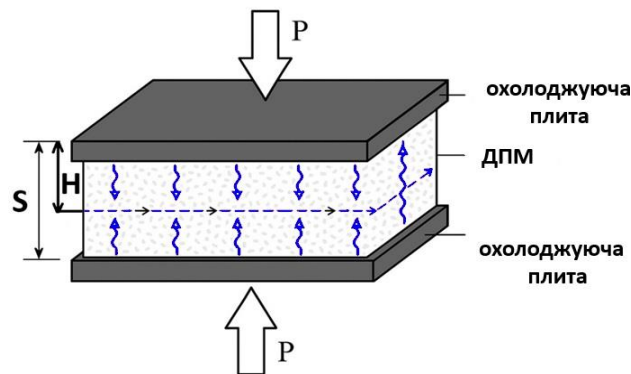


Рис. 1. – Модель охолодження ДПМ після гарячого пресування

Для одновимірного нестационарного процесу теплопередачі рівняння теплопровідності (Закон Фур'є) має вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

де  $T(x, t)$  - температура в точці  $x$  у момент часу  $t$ , °С;  $\alpha$  – коефіцієнт температуропровідності (теплової дифузії), який у свою чергу визначається:

$$\alpha = \frac{\lambda_{eff}}{\rho \cdot C_{fpwpc}} \quad (2)$$

де  $\lambda_{eff}$  – ефективна теплопровідність FPWPC, Вт/(м·°С);  $\rho$  – щільність FPWPC, кг/м<sup>3</sup>;  $C_{fpwpc}$  – середня теплоємність FPWPC, Дж/(кг·°С).

$$T(x, 0) = \begin{cases} T_{surface,,} & x=0 \text{ або } x=S \\ T_{depth,,} & x=H \end{cases} \quad (3)$$

Граничними умовами:

$$T(0, t) = T(S, t) = T_{press};$$

У чисельній схемі:

$$T_0^n = T_{Nx-1}^n = T_{press}$$

В якості чисельного методу розв'язання крайової задачі було обрано метод скінчених елементів, в основі якого лежить ідея апроксимації неперервної функції дискретної

моделлю, яка будується на множині кусково-неперервних функцій, визначених на скінченному числі підобластей, що називаються скінченними елементами. Досліджувана геометрична область розбивається на елементи таким чином, щоб на кожному з них невідома функція апроксимувалась так званою пробною функцією. Причому, ці пробні функції повинні задовольняти граничним умовам неперервності разом з граничними умовами, що накладаються самою задачею.

На початку моделювання температура змінюється по товщині FPWPC:

В результаті реалізації математичної моделі для ДПМ товщиною 16 мм на основі поліетилену низького тиску (ПЕНТ), а температура охолоджуючих плит пресу становить 25 °С. Початкова температура внутрішнього шару становить 120 °С. Моделювання процесу охолодження здійснювали до температури внутрішнього шару 50 °С отримано графічні залежності розподілу температури по товщині ДПМ залежно від тривалості охолодження (рис. 2).

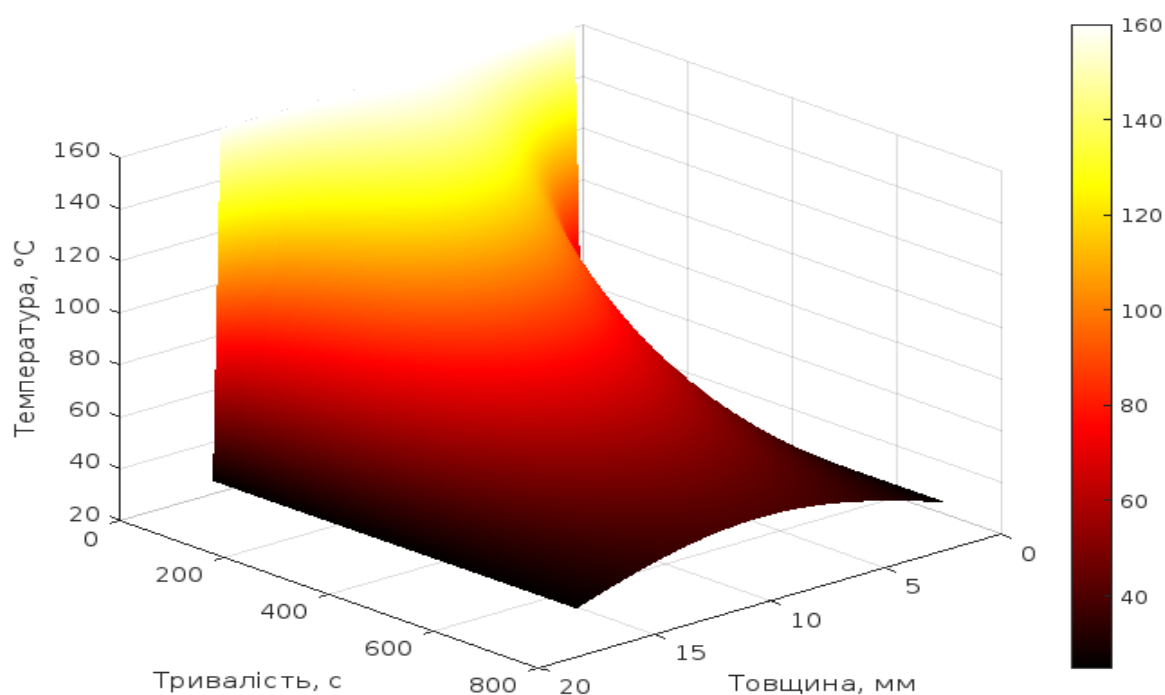


Рис. 2. – Розподіл температури у ДПМ по його товщині до температури всередині пакету 60 °С за початкової температури поверхні 160 °С та щільності композиту 1000 кг/м<sup>3</sup>

Процес охолодження внутрішнього шару FPWPC можна розділити на три фази:

1. Початковий підйом температури (0 – ~40 с);
2. Пік температури (~40- ~60 с);
3. Фаза охолодження (~1600 – ~800 с).

Процес охолодження ДПМ є нелінійним процесом, який починається швидко, потім сповільнюється. Вміст деревинних частинок значно впливає на швидкість охолодження – чим більше деревини, тим повільніше матеріал передає тепло і тим тривалішим є процес охолодження внутрішнього шару ДПМ. Окрім точно значний вплив на тривалість охолодження має й товщина FPWPC, що проявляється в тому, що внутрішні шари остигають значно повільніше, ніж поверхневі. Температура в поверхневих шарах ДПМ швидко падає, тоді як у внутрішньому шарі тепло зберігається довше. Чим вища початкова температура поверхні ДПМ тим більше часу затрачається на перехід до фази охолодження. В свою чергу, чим вища початкова поверхнева температура поверхні, тим швидкість охолодження на фазі охолодження відбувається стрімкіше, але після певного часу (300-400

с) спостерігається сповільнення процесу даного процесу. Щільність ДПМ відіграє важливу роль у процесі його охолодження, оскільки вона впливає на теплоємність, теплопровідність і ефективність тепловідведення. ДПМ з меншою щільністю охолоджуються швидше, ця різниця починає бути найбільш помітною після 100 с з початку охолодження, оскільки щільніші ДПМ довше зберігають тепло.

#### Список посилань

1. Klyosov A.A. Wood Plastic Composites / A.A. Klyosov. // New Jersey: John Wiley & Sons, Hoboken, 2007. – 726 pp.
2. Lyutyu P. Properties of Flat-Pressed Wood-Polymer Composites Made Using Secondary Polyethylene / P. Lyutyu, P. Bekhta, J. Sedliacik, G. Ortynska – Acta Fac. Xylologiae Zvolen 2014, 56(1) – P. 39–50.
3. Lyutyu, P. Hot-Pressing Process of Flat-Pressed Wood-Polymer Composites: Theory and Experiment. Polymers / P. Lyutyu, P. Bekhta, Y. Protsyk, V. Gryc - Polymers 2024, 16(20), 2931; <https://doi.org/10.3390/polym16202931>.
4. Benthien, J.T. Effects of agglomeration and pressing process on the properties of flat pressed WPC panels / J.T. Benthien, H. Thoemen – Journal of Applied Polymer Science 2013, 129(6), 3710-3717. <https://doi.org/10.1002/app.39155>.
5. Benthien, J.T.; Effects of raw materials and process parameters on the physical and mechanical properties of flat pressed WPC panels / J.T. Benthien, H. Thoemen – Compos. Part A-Appl. S. 2012, 43(3), 570–576. <http://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.12.028>.

УДК 674.093.26

Ортинська Г.Є., канд. техн. наук, доцент  
Копанський М.М., канд. техн. наук, доцент  
[m\\_kopansky@nltu.edu.ua](mailto:m_kopansky@nltu.edu.ua)

Лютий П.В., канд. техн. наук  
[lyutyyp@nltu.edu.ua](mailto:lyutyyp@nltu.edu.ua)

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів [ortynska\\_g@nltu.edu.ua](mailto:ortynska_g@nltu.edu.ua)

### СОЄВО-ПРОТЕЇНОВІ КЛЕЇ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ

У виробництві фанери традиційно використовують синтетичні клеї на основі формальдегіду, які забезпечують високу міцність і водостійкість. Проте через токсичність та канцерогенність формальдегіду зростає потреба в екологічно безпечних альтернативах. Одним із перспективних рішень є використання клеїв на основі соєвого протеїну — біополімеру рослинного походження, який має добрі адгезійні властивості, є біорозкладним, нетоксичним і доступним. Такі клеї можуть бути повністю безпечними для здоров'я людини та навколишнього середовища. Водночас їх широке застосування обмежується недостатньою вологостійкістю, низькою міцністю клейового шва та схильністю до біологічного руйнування, що зумовлює необхідність пошуку речовин, які б могли покращити їх властивості.

Значна кількість наукових публікацій присвячена пошуку оптимальних методів модифікування ізоляту соєвого протеїну з метою підвищення його водостійкості. У дослідженнях рекомендовано використовувати різні типи денатуруючих агентів, зокрема поверхнево-активні речовини, сполуки з аміногрупами, лужні реагенти та ферменти, що сприяють покращенню адгезійних характеристик білка. Такий підхід обґрунтований тим, що введення зазначених речовин, зокрема гідроксиду натрію, сприяє розгортанню білкових макромолекул, що, у свою чергу, підвищує площу їх взаємодії з поверхнею лущеного шпону [1–5].