

**Билей П.В., Соколовский И.А. Основы кинетики процесса сушения**

Рассмотрены физические явления, которые описывают кинетику процесса сушения, которая характеризуется изменением влажности (волеговмисту) материала за определеннй промежуток времени. Процесс сушения разделен на два периода: постоянной и замедленной скоростей сушения. Выведены зависимости между интенсивностью теплообмена и скоростью сушения для обоих периодов с использованием закона сохранения энергии и массы вещества. В этих уравнениях использован теплообменный и массообменный критерии Нуссельта и Ребиндера. Приведенная методика дает достаточно точные для практического использования результаты из определения кинетики процесса любого способа сушения.

**Ключевые слова:** теплообмен, массообмен, влажность, волеговмист, температура, теплопроводимость, конвекция, сушение, кинетика, критерии, скорость сушения, интенсивность.

**Bylei P.V., Sokolovsky I.A. Fundamentals of Drying Kinetics**

The physical phenomena that describe the kinetics of the drying process, which is characterized by a change in humidity (moisture content) of material over certain period of time were considered. The drying process was divided into two periods: the continuous and slow speed drying. Relationships between the intensity of heat transfer and drying rate for both periods, using the law of conservation of energy and mass of the substance have been displayed. In these equations a heat transfer and mass transfer Nusselt and Rebinder criteria were used. The method gives sufficiently accurate results for practical use to determine kinetics of any kind of drying.

**Key words:** heat transfer, mass transfer, humidity, moisture, temperature, conductivity, convection, drying kinetics, criteria, rate of drying, intensity.

УДК 674.04 Доц. Б.Я. Кишинецький, д-р техн. наук – НЛТУ України, м. Львів

**ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ ТЕРМОПЛАСТИЧНИХ КЛЕЙОВИХ З'ЄДНАНЬ ДЕРЕВИНИ**

Запропоновано практичні рекомендації щодо прогнозування міцності та довговічності термопластичних клейових з'єднань деревини за допомогою математичних моделей. Розроблено відповідне комп'ютерне забезпечення, яке дає змогу прогнозувати міцність та довговічність термопластичних клейових з'єднань деревини у виробничих умовах з мінімальними затратами та без особливих навиків користувачів. Під час прогнозування необхідно вибрати породу деревини, її щільність, ступінь навантаження клейової композиції, коефіцієнти для певної породи деревини та середньозважену добову, місячну або річну температуру та вологість навколишнього середовища. Результати прогнозування міцності та довговічності термопластичних клейових з'єднань деревини отримано у числових значеннях та графічній інтерпретації.

Термопластичні клейові з'єднання деревини потребують особливого підходу до прогнозування міцності та довговічності, оскільки вплив вологості й температури навколишнього середовища на них призводить до зміни напружено-деформаційного стану як деревини, так і клею та характеризуються втотою самого з'єднання. Тобто фізико-механічні процеси, що будуть проходити у термопластичних клейових з'єднаннях деревини, відрізнятимуться від процесів старіння та деструкції, які характеризують термореактивні клейові з'єднання деревини.

Дослідити напружено-деформаційний стан у термопластичних клейових з'єднань деревини можна на основі всебічного вивчення фізико-хімічних та фізико-механічних процесів, які будуть проходити у клейовій плівці та деревині. Ці

процеси вивчались на основі результатів експериментальних досліджень довговічності та механізмів формування і руйнування клейових з'єднань деревини. Для прогнозування міцності та довговічності термопластичних клейових з'єднань деревини використовувались методи математичного та імітаційного моделювання. Основні результати досліджень наведено в наукових публікаціях [1-5].

Результати досліджень механізмів формування та руйнування термопластичних клейових з'єднань деревини та утворення адгезійних і когезійних зв'язків під час циклічної дії вологості та температури навколишнього середовища дали змогу синтезувати фізико-хімічні та фізико-механічні процеси у термопластичних клейових з'єднаннях деревини. Поєднання математичного та імітаційного моделювання напружено-деформаційного стану залежно від температури та вологості дало змогу отримати математичну модель прогнозування міцності та довговічності для термопластичних клейових з'єднань деревини. Використання числових методів дало змогу розробити загальнодоступний і простий механізм побудови математичних моделей прогнозування міцності та довговічності термопластичних полівінілацетатних клейових з'єднань деревини дуба та сосни (1, 2).

Математична модель для прогнозування міцності:

$$\sigma = -A^{(i)} \Delta T^{(i)} + B^{(i)} \Delta W^{(i)} \exp(-\alpha^{(i)} \tau^{(i)}); \tag{1}$$

математична модель для прогнозування довговічності:

$$\tau^{(i)} = \frac{1}{C^{(i)}} \cdot \ln \left( \frac{B^{(i)} \cdot \Delta W^{(i)}}{\sigma_{\text{гран.}} + A^{(i)} \cdot \Delta T^{(i)}} \right), \tag{2}$$

де:  $\Delta T^{(i)}$  – середньозважена температура навколишнього середовища, °С;  $\Delta W^{(i)}$  – середньозважена вологість навколишнього середовища, %;  $\sigma_{\text{гран.}}$  – гранична міцність з'єднання; параметри  $A^{(i)}$ ,  $B^{(i)}$ ,  $C^{(i)}$  – залежні від зміни температури і вологості навколишнього середовища.

Математичні моделі (1, 2) дають змогу прогнозувати міцність і довговічність для структурованих і неструктурованих термопластичних полівінілацетатних клейових з'єднань деревини дуба та сосни за короткий проміжок часу та без руйнування клейових з'єднань деревини [6, 7].

За допомогою отриманих математичних моделей можна прогнозувати міцність та довговічність термопластичних клейових з'єднань не лише для деревини дуба та сосни, але інших порід деревини. Для цього необхідно враховувати фізико-механічні характеристики порід деревини, що склеюються. Дані характеристики в математичних моделях враховано за допомогою коефіцієнта на породу деревини  $k_{n.d.}$ . Розрахунок цього коефіцієнта здійснено за результатами пришвидшених експериментальних досліджень [8].

Для підтвердження кореляційного зв'язку між результатами пришвидшених і тривалих експериментальних досліджень розраховано масштабний коефіцієнт  $k_m$ . [9].

Математичні моделі для прогнозування міцності та довговічності термопластичних клейових з'єднань деревини з врахуванням коефіцієнта на породу деревини  $k_{n.d.}$  та масштабного коефіцієнта  $k_m$  матимуть вигляд:

$$\sigma = k_{n.d.} \cdot k_m \cdot (-A \cdot \Delta T^{(i)} + T \cdot \Delta W^{(i)} \exp(-C \cdot \tau^{(i)})), \tag{3}$$

$$\tau^{(i)} = k_{n.d.} \cdot k_{m.} \cdot \left( \frac{1}{C} \cdot \ln \left( \frac{B \cdot \Delta W^{(i)}}{\sigma_{гран.} + A \cdot \Delta T^{(i)}} \right) \right). \quad (4)$$

Використання цих коефіцієнтів у математичних моделях (3, 4) дає змогу прогнозувати міцність і довговічність термопластичних клейових з'єднань різних порід деревини за результатами пришвидшених експериментальних досліджень як у лабораторних, так і у виробничих умовах.

Разом з тим, складні математичні та імітаційні моделі для прогнозування міцності та довговічності у виробничих умовах будуть дещо малоефективними та незручними у користуванні. Тому основним завданням отриманих математичних моделей є забезпечення раціонального та простого їх використання. Для цього необхідно запропонувати надійний, дієвий і простий у користуванні механізм, який дав би змогу як у лабораторних, так і у виробничих умовах раціонально використовувати запропоновані математичні моделі.

Тому для зручності та ефективності прогнозування міцності та довговічності у виробничих умовах розроблено відповідне комп'ютерне забезпечення, яке дає змогу з використанням мінімальних затрат і навиків прогнозувати міцність та довговічність термопластичних клейових з'єднань деревини.

Це було зроблено за допомогою математичного програмування, враховуючи при цьому основні фактори впливу на міцність та довговічність термопластичних клейових з'єднань деревини, а саме: породу деревини, її щільність, коефіцієнти на породу деревини, міцність склеювання, коефіцієнти всихання деревини, модулі пружності деревини, ступінь навантаження клейового з'єднання, за необхідності масштабний коефіцієнт. Крім того, використовують середньозважену зміну вологості та температури за добу, тиждень або місяць.

Врахувати ці фактори можна шляхом їх додавання у математичну модель, за кожної спроби прогнозування міцності та довговічності, або їх вибирати за допомогою інтерфейсу. Запропоновано та розроблено інтерфейс, основним завданням якого було забезпечення відповідної зручності та ефективності під час прогнозування міцності та довговічності термопластичних клейових з'єднань деревини.

На рисунку наведено інтерфейс прогнозування міцності та довговічності термопластичних клейових з'єднань деревини, на якому показано основні вхідні параметри та результати прогнозування міцності та довговічності термопластичних клейових з'єднань деревини з графічними залежностями.

Під час прогнозування міцності та довговічності термопластичних клейових з'єднань за допомогою інтерфейсу необхідно вибрати породу деревини, її щільність, ступінь навантаження клейової композиції, коефіцієнти для певної породи деревини. Усі ці фактори занесено у програмне забезпечення, а їх вибір залежить від матеріалу, що склеюється. Вибір середньозваженої добової, місячної або річної температури та вологості навколишнього середовища необхідно брати з метеорологічних показників певної кліматичної зони, у якій буде експлуатуватися клейове з'єднання.

Після цього здійснюють прогнозування, за допомогою якого отримуємо числові значення міцності та довговічності термопластичних клейових з'єднань деревини та їх графічну інтерпретацію. Це дасть змогу оцінити результати прогнозування міцності та довговічності термопластичних клейових з'єднань деревини як кількісно, так і якісно.

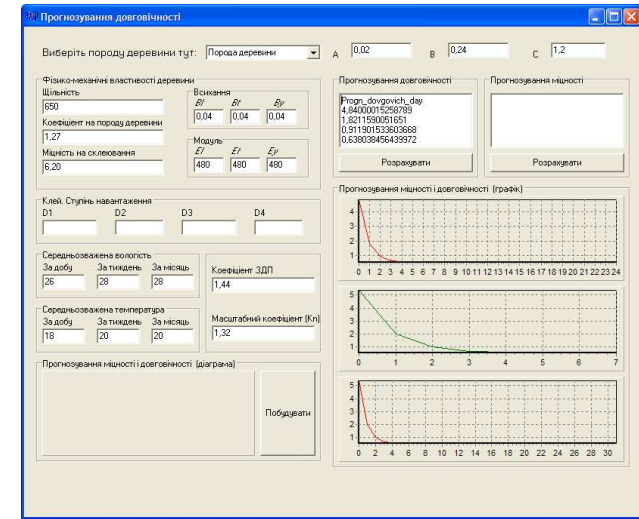


Рис. Інтерфейс для прогнозування міцності та довговічності термопластичних клейових з'єднань деревини з графічною інтерпретацією результатів

## Література

1. Кшивецький Б.Я. Дослідження довговічності з'єднань шпилькових порід деревини клеями на основі ПВА / Б.Я. Кшивецький, О.П. Гуцало, С.В. Кондратюк // Науковий вісник УкрДЛТУ : зб. наук.-техн. праць. – Львів : Вид-во УкрДЛТУ. – 2004. – Вип. 14.4. – С. 91-95.
2. Кшивецький Б.Я. Дослідження довговічності з'єднань твердостіянних порід деревини клеями на основі полівінілацетату / Б.Я. Кшивецький // Науковий вісник УкрДЛТУ : зб. наук.-техн. праць. – Львів : Вид-во УкрДЛТУ. – 2004. – Вип. 14.7. – С. 99-103.
3. Кшивецький Б.Я. Механізм формування термопластичних клейових з'єднань деревини / Б.Я. Кшивецький // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2012. – Вип. 22.12. – С. 117-122.
4. Кшивецький Б.Я. Дослідження міцності з'єднань деревини сосни клеями на основі полівінілацетату за дії природних факторів / Б.Я. Кшивецький // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2007. – Вип. 17.3. – С. 110-112.
5. Кшивецький Б.Я. Дослідження релаксаційних властивостей клейової плівки на основі полівінілацетату залежно від кількості циклів волого-температурних навантажень / Б.Я. Кшивецький // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Сер.: Хімія, технологія речовин і їх застосування. – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка". – 2007. – С. 60-64.
6. Кшивецький Б.Я. Прогнозування довговічності термопластичних клейових з'єднань деревини за допомогою математичної моделі / Б.Я. Кшивецький // Проблеми трибології: міжнародний науковий журнал. – Хмельницький НУ. – 2012. – № 4. – С. 38-42.
7. Патент на винахід № 98515 Україна, МПК G01N 33/46, G01L 1/26. Спосіб прогнозування міцності та довговічності з'єднань деревини клеями на основі полівінілацетату / Б.Я. Кшивецький, П.А. Бехта (Україна); Заявл. 25.05.2010; Опубл. 25.05.2012, Бюл. № 10.
8. Кшивецький Б.Я. Розрахунок коефіцієнтів, що враховують породу деревини при прогнозуванні міцності термопластичних клейових з'єднань / Б.Я. Кшивецький // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2013. – Вип. 23.16. – С. 172-176.
9. Кшивецький Б.Я. Розрахунок масштабного коефіцієнта для прогнозування міцності та довговічності термопластичних клейових з'єднань деревини / Б.Я. Кшивецький // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2014. – Вип. 24.1. – С. 326-331.

**Кшивецький Б.Я. Практические рекомендации по прогнозированию прочности и долговечности термопластичных клеевых соединений древесины**

Предложены практические рекомендации для математического метода прогнозирования прочности и долговечности термопластичных клеевых соединений древесины. Для этого разработано соответствующее компьютерное обеспечение, которое позволяет прогнозировать прочность и долговечность термопластичных клеевых соединений древесины при минимальных затратах и без специальных навыков. При прогнозировании необходимо выбрать породу древесины, ее плотность, степень нагрузки клеевой композиции, необходимые коэффициенты для определенной породы древесины и средневзвешенную суточную, месячную или годовую температуру и влажность окружающей среды. Результаты прогнозирования прочности и долговечности термопластичных клеевых соединений древесины получены в числовых значениях и графической интерпретации.

### ***Kshyvetsky B.Ya. Some Operational Recommendations for Predicting the Strength and Durability of Thermoplastic Adhesive Wood Joints***

Some operational recommendations concerning the prediction of strength and durability of thermoplastic adhesive wood joints by means of mathematical modelling are proposed. Relevant computer software that will make it possible to predict the strength and durability of thermoplastic adhesive wood joints under operating conditions at minimum cost and without special user's skills has been developed. The prediction procedure involves identification of the wood species, its density, the degree of the adhesive composition loading, relevant coefficients for the wood concerned, as well as the average daily, monthly or average annual temperature and humidity of the environment. The results of prediction the strength and durability of thermoplastic adhesive wood joints are presented numerically and in graphic form.

**Key words:** thermoplastic adhesive wood joints, strength, durability, software, wood species.

**УДК 674.[06+21] Доц. В.О. Маєвський, д-р техн. наук – НЛТУ України, м. Львів;  
вкл. М.В. Удовиська – ТК НЛТУ України, м. Львів**

### **ОСНОВНІ НАПРЯМІ ДОСЛІДЖЕНЬ У ВИРОБНИЦТВІ КЛЕЄНИХ ЩИТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ З ДЕРЕВИНИ ІЗ ДОТРИМАННЯМ ТЕКСТУРНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ**

Охарактеризовано основні способи виготовлення клеєних щитових конструкцій. Проаналізовано традиційні технологічні підходи щодо забезпечення їх міцності та формостійкості, наголошено на недоліках наявного виробництва. Запропоновано проектно-технологічні рішення виготовлення клеєних щитових конструкцій, а також варіанти схем їх набору із дотриманням текстурних особливостей, міцності та формостійкості. Запропоновано шляхи забезпечення стабільності форми цих конструкцій, що проявляється в здатності зберігати свої структурні розміри в змінних кліматичних умовах.

**Ключові слова:** клеєні щитові конструкції, текстурні особливості, формостійкість, схеми набору, проектно-технологічні рішення.

**Актуальність досліджень.** Одними з найпоширеніших формоутворюючих конструкційних та фасадних елементів виробів з деревини є клеєні щитові конструкції (КЩК). Номенклатура виробів, що містять їх у своєму складі, надзвичайно різноманітна. Насамперед це мебелі і паркетні вироби, двері, стінові панелі тощо. Якість цих виробів здебільшого визначається якістю виготовлення КЩК, тому до них висувають високі вимоги щодо міцності, формостійкості та естетичності.

Можливості сучасних технологій дають змогу виготовляти матеріали, що дуже близько імітують текстуру деревини. Однак штучно відтворити природний малюнок (текстуру) деревини залишається практично неможливим, зокрема на цей час відсутні технологічні рішення щодо відтворення об'ємності текстури де-

ревини. Окрім цього, у натуральній деревині є й інші характерні особливості, які практично неможливо відтворити в інших матеріалах, зокрема композиційних, що найчастіше використовують як заміники деревини. До таких особливостей натуральної деревини варто віднести: практично відсутній вміст токсичних речовин, можливість оновлення її поверхні, здатність до відтворення попередньої форми за зміни вологи, стабільність механічних показників за перепаду температури, відсутність розшарування за товщиною та відклеювання крайки.

Забезпечення якості КЩК, обумовленої властивостями її окремих ділянок (заготовок, ламелей), потребує диференційованого підходу з урахуванням вимог міцності, формостійкості та естетичності КЩК. Тому пошук ефективних рішень щодо виробництва КЩК із дотриманням текстурних особливостей, міцності та формостійкості є актуальним завданням.

**Огляд стану питання.** КЩК з масивної деревини отримують склеюванням пилопродукції різного виду розпилювання за шириною або товщиною. Можливий також варіант склеювання за довжиною (зрошування, здебільшого на зубчастий шип) перед склеюванням за шириною або товщиною. На цей час відомі два способи виготовлення КЩК: традиційний – склеювання пилопродукції за шириною в КЩК – та альтернативний – склеювання пилопродукції за шириною і товщиною у блок (пакет), який розпилюють на КЩК. Альтернативний спосіб у зв'язку з підвищеними трудовитратами та неможливістю використання отриманих КЩК у виготовленні фрезерованих фасадних поверхонь складного профілю (площинного або об'ємного) набув меншого розповсюдження. Традиційний спосіб виготовлення клеєних щитів є придатнішим для їх подальшого використання та реалізується за однією з чотирьох визначених технологічних схем [1].

Відомо, що текстура пилопродукції, отриманої після розпилювання колоди, є дуже різноманітною. Макроскопічні анатомічні елементи формують текстуру деревини, оригінальність і неповторність якої визначається складністю будови і сукупністю окремих її елементів. Зі всіх макроскопічних елементів, що характеризують текстуру деревини, можна виокремити річні кільця. Особливість текстури деревини залежить від таких основних характеристик річних кілець: форми на поперечному перетині, ширини, кількості на 1 см, відмінності ранньої і пізньої зони та рівношаровості. Річні кільця добре виражені у хвойних і листяних кільцесудинних породах помірного кліматичного поясу, завдяки чому текстура деревини у таких породах різноманітна і добре помітна на перетинах колоди [2, 3]. Пилопродукція, випиляна різними способами традиційними напрямками (паралельно до осі або вгвинної колоди), є загальноживаною. Тому використання такої пилопродукції у виготовленні виробів із деревини певною мірою обмежує потенційні дизайнерські рішення через узвичаєність текстурних особливостей деревини. Отримати пилопродукцію з оригінальною текстурою можна, змінивши кут розпилювання колоди відносно її осі на декілька градусів [6-8], а вироби, виготовлені з такої пилопродукції, характеризуватимуться високими художньо-естетичними властивостями.

Для забезпечення міцності та формостійкості КЩК зазвичай використовують традиційні технологічні підходи. КЩК, які мають велику ширину, необхідно склеювати з вузьких ділянок пилопродукції. Це зумовлено тим, що широкі КЩК під час експлуатації, внаслідок капілярно-пористої будови деревини та анізотропності її властивостей, які характеризуються розміщенням волокон, напрям-