

**Гулида Э.Н., Лоик В.Б., Шерстинюк Н.Л., Дмитрук Ю.С. Экспериментальная оценка огнезащитного эффекта вермикулит-силикатных плит для строительных несущих металлических конструкций**

Предложено использование вермикулито-силикатных плит для повышения огнезащиты металлических конструкций. На основе проведенного эксперимента обоснована качественная оценка огнезащитного эффекта вермикулито-силикатных плит за счет химически-связанной воды в вермикулите. Проанализированы положительные и отрицательные стороны огнезащитного эффекта паровоздушной смеси в результате воздействия стандартного температурного режима пожара. Созданы предпосылки для дальнейшего исследования влияния температурного режима пожара на массо-теплоперенос паровоздушных смесей вермикулито-силикатной плиты с использованием численного моделирования физических процессов.

**Ключевые слова:** вермикулито-силикатные плиты, пассивное огнезащитное покрытие, огнезащитный эффект, химически-связанная вода, строительные несущие металлические конструкции.

**Gulida E.M., Loik V.B., Sherstyniuk N.L., Dmytruk Yu.S. Experimental Evaluation of the Effect of Fire-retardant Vermiculite – Silicate Plates for Bearing Metal Building Structures**

The use of vermiculite-silicate plates to improve fire protection of metal structures is proposed. Qualitative assessment of the effect of flame retardant vermiculite-silicate plates by chemically-bound water in vermiculite is described based on the experiment conducted. Some positive and negative aspects of fire retardant effect of vapor from exposure standard temperature fire control are analysed. Preconditions for further study of the effect of temperature regime on fire heat exchange on mass vapour vermiculite-silicate plates using numerical modeling of physical processes are designed.

**Keywords:** vermiculite-silicate plate, passive fire protective coatings, fireproof effect, chemically-bound water, building bearing metal structures.

**УДК 674.047 Президент Є.П. Кунинець, канд. техн. наук – "Ено меблі ЛТД", м. Мукачєво; доц. О.О. Шепєлюк, канд. техн. наук; асист. І.Р. Шепєлюк – НЛТУ України, м. Львів**

**ФІЗИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ КОНДУКТИВНОГО НАГРІВАННЯ ТА СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ**

Розглянуто фізичні особливості кондуктивного нагрівання і сушіння деревини. Під час нагрівання деревини відбуваються всі елементарні види теплообміну: теплопровідність, конвекція, теплове випромінювання. Описано способи нагрівання деревини і визначено найбільш придатні для різних видів деревинних матеріалів. Подано фізичні основи кондуктивного нагрівання і сушіння деревини. Визначено вплив температури нагрівної поверхні на динаміку процесу нагрівання і кінетику процесу сушіння. Досліджено, що на початку кондуктивного нагрівання деревини тепло в матеріалі переноситься шляхом теплопровідності, а в подальшому основна частина тепла передається потоком пари, ентальпія якої є більшою за ентальпію рідини. Розглянуто вплив на інтенсивність кондуктивного нагрівання і сушіння сили притискання нагрівної поверхні до матеріалу та товщини матеріалу.

**Ключові слова:** деревина, теплопровідність, конвекція, пароутворення, випаровування, температура, ентальпія, температурний градієнт, теплове оброблення, сушіння, теплообмінність.

**Виклад основного матеріалу.** Теплове оброблення і сушіння деревини використовують у виробництві шпону і фанери, пиломатеріалів і заготовок та

різних композиційних матеріалів, у процесах гнуття, пресування та склеювання. Теплове оброблення і сушіння є складними теплофізичними процесами. Під час нагрівання деревини відбуваються елементарні види теплообміну: конвекція, теплопровідність та теплове випромінювання, які в поєднанні з фізичними властивостями деревини та її структурною будовою утворюють складну фізичну модель. Серед способів нагрівання деревини найбільш поширеним є конвективний за його доступністю та широким спектром використання для нагрівання масивної деревини (круглих лісоматеріалів, пиломатеріалів і заготовок різноманітного призначення). Радіаційний та кондуктивний способи нагрівання і сушіння доцільно використовувати у виробництві тонких листових матеріалів: шпону, паперу, картону тощо [1-3].

Кондуктивне нагрівання і сушіння деревини характеризується передачею теплової енергії на процес нагрівання деревини і випаровування з неї вологи завдяки контакту матеріалу з нагрівною поверхнею. У цьому випадку основними параметрами, що визначають динаміку процесу нагрівання на кінетику процесу сушіння, є температура нагрівної поверхні, ступінь (сила) її притискання до поверхні матеріалу, товщина матеріалу та характер його поверхні (в основному, шорсткість) та параметри середовища, в якому відбувається процес нагрівання і сушіння.

Температура нагрівної поверхні ( $t_{\text{н}}$ ), наприклад плит преса, є основним технічним і технологічним параметром, що впливає на тривалість процесів нагрівання і сушіння деревини. Вплив температури нагрівної поверхні на динаміку процесу нагрівання і кінетику процесу сушіння спостерігається протягом всього часу цих процесів.

Ступінь (сила) притискання контактної поверхні до матеріалу мало впливає на теплофізичний аспект нагрівання та сушіння, але має істотний вплив на стан поверхні матеріалу. Чим меншою є шорсткість поверхні матеріалу, тим щільнішим є контакт поверхні матеріалу з нагрівною поверхнею й ефективнішою є передача тепла за рахунок теплопровідності, що описується відповідним рівнянням

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}, \text{ Вт/м}^2, \tag{1}$$

де:  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності деревини, Вт/(м·°C);  $dt$  – різниця температур в деревині ( $dt=t_1-t_2$ , де  $t_1$  – температура поверхні деревини, яка контактує з нагрівною поверхнею, а  $t_2$  – температура поверхні деревини, що омивається середовищем), °C;  $dx$  – товщина матеріалу ( $dx=S_1$ ), м;  $q$  – площа поверхні, через яку передається тепло, м<sup>2</sup>.

Однак передача тепла теплопровідністю наявна тільки на початку процесу нагрівання, коли температура деревини є малою ( $t_0 < 100^\circ\text{C}$ ), тобто коли в середині матеріалу не відбувається пароутворення. Тепло від нагрівної поверхні передається контактом до матеріалу, в якому воно переноситься до відкритої поверхні. У першому періоді процесу основна кількість тепла, що передається від нагрівної поверхні, йде на випаровування вологи, а частина втрачається у вигляді теплового випромінювання з вільної поверхні та на конвекцію.

Таким чином, існує градієнт температури за товщиною матеріалу. Тобто в різних шарах матеріалу температура деревини не є однаковою, але протягом певного періоду тримається на одному рівні. Після цього, коли видалається (випаровується) зв'язана волога, то зростає потреба в тепловій енергії і температура деревини зменшується на 2-10 °С у всіх шарах матеріалу. Потім швидкість сушіння різко зменшується, тому що зменшуються загальні витрати тепла на випаровування, що, своєю чергою, приводить до підвищення температури деревини. У першому періоді процесу сушіння густину теплового потоку, з достатньою точністю, можна визначити за формулою

$$q = r_0 \cdot j, \text{ Вт/м}^2, \quad (2)$$

де:  $r_0$  – питома теплота пароутворення, Дж/кг;  $j$  – інтенсивність випаровування вологи, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Питома теплота пароутворення у формулі (2) визначається за середньою температурою матеріалу. У загальному випадку поширення тепла в матеріалі відбувається шляхом перенесення пари, рідини та шляхом теплопровідності, що визначається з рівняння

$$q = \lambda \frac{dt}{dx} + h_n \cdot j_n + h_p \cdot j_p, \text{ Вт/м}^2, \quad (3)$$

де:  $h_n, h_p$  – ентальпія пари та рідини, Дж/кг;  $j_n, j_p$  – інтенсивність перенесення пари і рідини, кг/(м<sup>2</sup>·с).

В умовах кондуктивного сушіння перенесення вологи відбувається, в основному, у вигляді пари. Потім тепло, що переноситься рідиною, є невеликим, тому що рідина має меншу ентальпію, ніж пара, тому

$$j_n = \frac{1}{h} \left( r_0 \cdot j + \lambda \frac{dt}{dx} \right), \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}. \quad (4)$$

За співвідношенням (4) можна визначити густину потоку пари в шарах близьких до нагрівної поверхні. Зіставлення величини ( $q=r_0j$ ) до ( $\lambda dt/dx$ ) показує, що потік тепла, зумовлений теплопровідністю, є значно меншим за перенесення тепла у вигляді пари. Таким чином, перенесення тепла у вигляді пари є вирішальним у процесі кондуктивного сушіння деревини.

Інтенсивність сушіння в першому періоді цілком визначається інтенсивністю випаровування вологи з відкритої поверхні матеріалу та з шарів матеріалу, що до них прилягають. Подальше підвищення температури нагрівної поверхні призводить до зміни характеру механізму сушіння, за якого вплив густини потоку пари на інтенсивність, різко зростає. За температури нагрівної поверхні більше 100 °С діє усталений механізм пароутворення, внаслідок чого інтенсивність перенесення пари є максимальним та із збільшенням температури нагрівної поверхні змінюється мало.

У цьому випадку на процес внутрішнього пароутворення може впливати товщина матеріалу. Вплив товщини матеріалу пояснюється тим, що із збільшенням товщини зростає термічний опір скелета капілярнопористого матеріалу, внаслідок чого зменшується інтенсивність внутрішнього пароутворення.

Під час контактного сушіння температурний градієнт ( $\Delta t$ ) всередині матеріалу на границі контакту з нагрітою поверхнею може досягати величезних значень ( $\Delta t \approx 10^3$  °С/м). На початку процесу сушіння (у першому періоді) температурний градієнт зростає для всіх товщин матеріалу. Потім із збільшенням товщини матеріалу, за однакової інтенсивності сушіння, температурний градієнт зростає. Пояснюється це тим, що для однакових величин ( $j$ ) середня температура товстішого матеріалу є вищою, ніж для тонкого. Внаслідок з підвищенням температурного градієнта ( $\Delta t$ ) матеріал перегрівается і погіршується його якість. Таким чином, товщина матеріалу є основним технологічним параметром процесу кондуктивного сушіння.

**Висновки.** У процесі кондуктивного сушіння тепло, необхідне на випаровування вологи з деревини, йде від гарячої поверхні, що контактує з матеріалом. У цьому випадку передача тепла є найбільш ефективною тому, що здійснюється без проміжних термічних опорів. Інтенсивність процесу сушіння у першому періоді збільшується на один-два порядки, порівняно з інтенсивністю конвективного сушіння. Для інтенсивної передачі тепла вологий матеріал притискається до гарячої поверхні. Під дією високих температур нагрівної поверхні спостерігається прилипання контактної шару до нагрівної поверхні, що не допускає утворення проміжного парового прошарку між поверхнями, що контактують.

## Література

1. Білей П.В. Теоретичні основи теплової оброблення і сушіння деревини. – Коломия : Вид-во "Вік", 2005. – 364 с.
2. Білей П.В. Теорія теплової оброблення деревини : монографія / П.В. Білей, С.П. Кунинець, І.А. Соколовський та ін. – Львів : Вид-во ЗУКЦ, 2012. – 200 с.
3. Серговский П.С., Расев А.И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. – М. : Изд-во "Лесн. пром-сть", 1987. – 360 с.

## **Кунинец Е.П., Шепелюк О.О., Шепелюк І.Р. Физические особенности кондуктивного нагрева и сушки древесины**

Рассмотрены физические особенности кондуктивного нагрева и сушки древесины. При нагревании древесины имеют место все элементарные виды теплообмена: теплопроводность, конвекция, тепловое излучение. Описаны способы нагрева древесины и определены наиболее подходящие для различных видов древесных материалов. Поданы физические основы кондуктивного нагрева и сушки древесины. Определено влияние температуры греющей поверхности на динамику процесса нагрева и кинетика процесса сушки. Доказано, что в начале кондуктивного нагрева древесины тепло в материале переносится путем теплопроводности, а в дальнейшем основная часть тепла передается потоком пара, энтальпия которой является больше энтальпией жидкости. Рассмотрено влияние на интенсивность кондуктивного нагрева и сушки силы прижима греющей поверхности к материалу и толщины материала.

**Ключевые слова:** древесина, теплопроводность, конвекция, парообразование, испарение, температура, энтальпия, температурный градиент, тепловая обработка, сушка, теплообменность.

## **Khunynets Ye.P., Shepelyuk O.O., Shepelyuk I.R. Some Physical Features of Conductive Heating and Drying of Wood**

Some physical features of conductive heating and drying of wood are studied. All the elementary kinds of heat transfer such as heat conductivity, convection, thermal radiation occur during heating of wood. The methods of heating of wood are described; the most suitable

methods for various kinds of timber are determined. Physical basis of conductive heating and drying of wood are proposed. The influence of heating surface temperature on the heating process dynamics and kinetics of the drying process is identified. It is researched that early conductive heating of wood heat in the material is transferred by heat conductivity, and further the bulk of the heat flow is transmitted by vapor stream, which enthalpy is larger than the enthalpy of liquid. The influence of the force of pressing the heating surface to the material and material thickness on the intensity of conductive heating and drying is investigated.

**Keywords:** wood, convection, vaporization, evaporation, temperature, enthalpy, temperature gradient, heat treatment, drying.

УДК 667.637.4:666.3.135

Доц. В.В. Артеменко, канд. техн. наук;

ст. викл. Р.С. Яковчук, канд. техн. наук; проф. О.В. Міллер, канд. екон. наук;

доц. А.І. Харчук, канд. пед. наук – Львівський ДУ БЖД

### ПІДВИЩЕННЯ МЕЖИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ВОГНЕЗАХИСНИМИ РЕЧОВИНАМИ

Досліджено проблему підвищення вогнестійкості та довговічності металевих конструкцій в умовах високотемпературного нагрівання шляхом нанесення на їх поверхню захисних покриттів. Розроблено вихідні склади для захисних речовин із умов отримання за високих температур максимального вмісту температуростійких силікатів алюмінію і цирконію. Введення до складу покриття 1-3 мас. %  $TiO_2$  сприяє синтезу наведених вище фаз та знижує температуру їх утворення на 50-60°. Виконано розрахунок межі вогнестійкості металевої колони, виготовленої з двотавра № 24, захищеного розробленою вогнезахисною речовиною, і встановлено, що межа вогнестійкості центрально-стиснутої захищеної колони в 3 рази вища, ніж у не захищеної.

**Ключові слова:** вогнестійкість, межа вогнестійкості, температура, вогнезахисна речовина, композиція, захисний шар.

**Вступ.** На сьогодні металеві конструкції широко застосовують у будівництві. Але за дії високих температур та вогню вони втрачають свої експлуатаційні властивості внаслідок окиснення їх поверхні та зниження механічних характеристик. Збільшити довговічність та вогнестійкість металевих конструкцій в умовах високотемпературного нагрівання можливо шляхом нанесення на їх поверхню захисних покриттів.

**Постановка проблеми.** Головною причиною зниження ефективності використання металевих конструкцій за дії високих температурах є втрата їх несної здатності, і як наслідок – руйнування. Дія високих температур і механічних навантажень створює у конструкціях деформації теплового розширення за рахунок великого значення термічного коефіцієнта лінійного розширення і повзучості. У конструкційних матеріалах з нанесеними на них покриттями у процесі нагрівання і в разі довготривалої дії високих температур, на їх довговічність істотно впливає фазовий склад і структура покриття, яка змінюється під час термооброблення через різницю термомеханічних їх властивостей. Напруження, які виникають на межі контакту покриття-конструкційний матеріал внаслідок температурного градієнта під час нагрівання, можуть призвести до його руйнування.

Покриття на основі силікатних матеріалів доцільно використовувати для захисту конструкційних матеріалів різної хімічної природи від високотемпера-

турної корозії. Підбір раціонального складу вихідних композицій для вогнезахисних покриттів та можливість регулювання їх структури і фазового складу дають змогу підвищити ефективність їх захисту за значних термічних навантажень, і є актуальним науковим дослідженням.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Для формування вогнезахисних покриттів варто використати композиції на основі наповнених силіцій органічних зв'язок оксидними і силікатними наповнювачами [1, 2]. Аналіз застосування таких покриттів показав, що матрично-керамічні композиційні покриття не піддаються окисненню, мають високі показники жаростійкості і можуть використовуватись у широкому інтервалі температур [3]. Недоліком відомих складів захисних покриттів є значна пористість і низька адгезійна міцність у температурному інтервалі термоокисної деструкції зв'язки.

Взаємодія компонент захисного покриття між собою і матеріалом підкладки істотно впливає на їх експлуатаційні властивості [2, 3]. Надійність і довговічність захисту залежить від складу вихідних компонент, способу їх отримання і характеру корозійного середовища, а також температурного інтервалу експлуатації. Створення вихідних композицій для захисних покриттів потребує вивчення механізму і кінетики процесу в лабораторних та промислових умовах, а також їх поведінки в умовах високотемпературного нагрівання.

**Мета роботи.** Оцінити ступінь впливу покриттів на основі наповнених силіцій-елементоорганічних сполук на вогнестійкість конструкційних металевих матеріалів в умовах високотемпературного нагрівання.

**Експериментальна частина.** Утворення первинної композиційної структури полягає в ініційованому механіко-хімічному прививанні поліалюмосилоксанів до мінерального наповнювача із підвищенням фізико-механічних параметрів та теплостійкості.

Вихідні склади для захисних речовин вибирали із умов отримання за високих температур максимального вмісту температуростійких силікатів алюмінію і цирконію. Найбільш оптимальною є вогнезахисна речовина (ВЗР) складом № 4. Необхідно зазначити, що введення до складу композицій для захисних покриттів каоліну, каолінового волокна та оксиду титану підвищують показник адгезійної міцності завдяки зменшенню показника пористості в інтервалі температур 200-300 °C і особливо за 400 °C [2, 3].

Склади вихідних композицій наведено у табл. 1.

Табл. 1. Склади вихідних композицій для захисних речовин на основі наповненого поліалюмосилоксану (КО-978)

№ з/п	Вміст КО-978 мас. %	Вміст наповнювачів, мас. %				
		$Al_2O_3$	$ZrO_2$	Каолін	Каолінове волокно	$TiO_2$
1	20	40	35	–	5	–
2	30	30	36,5	–	3,5	–
3	30	40	11,5	15	3,5	–
4	30	30	22	12,5	3,5	2
5	35	25	25	10	2,0	3

Суміщення оксидних і силікатних наповнювачів із поліорганосилоксану найбільш повно відбувається під час механіко-хімічного диспергування у