

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 металеві 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 складу 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 °С і особливо за 400 °С [2, 3].

Складу вихідних композицій наведено у табл. 1.

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

№ з/п	Вміст КО-978 мас. %	Вміст наповнювачів, мас. %				
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Каолін	Каолінове волокно	TiO <sub>2</sub>
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

кульових млинах і характеризується процесами фізичної адсорбції, руйнування кристалічної ґратки оксидів і прививанням полімеру до поверхні наповнювача. Вміст привитого поліалюмосилоксану перебуває в межах 5,2-6,8 мас. %.

Експериментальними дослідженнями встановлено оптимальні показники текучості вихідних композицій та визначено максимальне значення мікротвердості ( $257,2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ ), яке досягається нагріванням до температури 473 К або витриманням за кімнатної температури протягом 24 год, а введення до складу композицій каоліну зменшує показник їх мікротвердості на 10-12 % та збільшує значення покривної здатності на 10-14 %.

Під час нагрівання наповненого каоліновим волокном  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і  $\text{ZrO}_2$  поліалюмосилоксану в інтервалі температур 573-1083 К відбувається деструкція зв'язки з утворенням високодисперсного аморфного кремнезему  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Нагрівання покриттів вище 1193 К супроводжується кристалізацією силіманітмулітової фази, а подальше нагрівання покриття вище від 1523 К веде до утворення в його складі цирконової фази у вигляді пластинчастих кристалів [2]. У композиціях поліалюмосилоксан-наповнювач ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ , каолінове волокно, каолін глуховецький) в інтервалі температур 823-1073 К відбувається дегідратація каоліну, а в разі подальшого нагрівання до 1253 К у системі з'являється муліт, який стабілізує кристалічну структуру покриття.

Встановлено, що введення каоліну до складу покриття у кількості 10-20 мас. % збільшує тільки вміст мулітосиліманітової та цирконованої фази на 6-14 мас. %, а введення до складу покриття 1-3 мас. %  $\text{TiO}_2$  на 20-25 % збільшує вміст силіманітмулітової та на 10-12 % цирконової фаз, на  $60^\circ$  знижує температуру синтезу мулітосиліманітової та на  $50^\circ$  – цирконової фаз [2]. У складі розроблених покриттів силіманіт та муліт отримують із вихідних складових під час нагрівання, особливо інтенсивно цей процес відбувається у сумішах каоліну  $\text{Al}_2\text{O}_3$  за присутності мінералізатора.

Проведеними дослідженнями покриття на основі системи "поліалюмосилоксан –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  –  $\text{ZiO}_2$  – каолін – каолінове волокно –  $\text{TiO}_2$ " встановлено, що на початковій стадії взаємодії у складі покриття утворюється силіманіт, який у разі подальшого нагрівання переходить у муліт.

Розрахунок захищених металевих конструкцій на вогнестійкість виконано згідно з Єврокодом 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Основні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1993-1-2:2005, IDT). Загалом для розрахунку межі вогнестійкості металевих конструкцій необхідно розв'язати теплотехнічну задачу прогріву перерізів металевих конструкцій за стандартного температурного режиму та виконати розрахунок за несною здатністю металевих конструкцій в умовах стандартного температурного режиму.

Момент часу впливу пожежі  $\tau$ , за якого несна спроможність конструкції дорівнюватиме величині діючого нормативного навантаження буде фактичною межею вогнестійкості конструкції за втратою її несної спроможності –  $R$ . Приріст температури  $\Delta\theta_{a,t}$  за проміжок часу  $\Delta t$  за рівномірного розподілу температури в поперечному перерізі захищеної сталеві конструкції визначають з виразу

$$\theta_{a,t} = \frac{A_p}{V} \frac{\lambda_p}{d_p c_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \varphi/3)} \Delta t - (e^{\varphi/10} - 1) \Delta \theta_{g,t}, \quad (1)$$

(але  $\Delta\theta_{a,t} \geq 0$ , якщо  $\Delta\theta_{g,t} > 0$ ),

$$\text{де } \varphi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p \frac{A_p}{V}, \quad (2)$$

де:  $A_p/V$  – коефіцієнт перерізу сталевих конструкцій, що вкриті вогнезахисним матеріалом;  $A_p$  – відповідна площа вогнезахисного матеріалу на одиницю довжини конструкції, м<sup>2</sup>/м;  $V$  – об'єм конструкції на одиницю довжини, м<sup>3</sup>/м;  $c_a$  – питома теплоємність сталі, що залежить від температури, Дж/кг К;  $c_p$  – питома теплоємність вогнезахисного матеріалу, що не залежить від температури, Дж/кг К;  $d_p$  – товщина вогнезахисного матеріалу, м;  $\Delta t$  – інтервал часу, с;  $\theta_{a,t}$  – температура сталі в момент часу  $t$ , °С;  $\theta_{g,t}$  – температура навколишнього середовища в момент часу  $t$ , °С;  $\Delta\theta_{g,t}$  – приріст температури навколишнього середовища за проміжок часу  $\Delta t$ , К;  $\lambda_p$  – теплопровідність системи вогнезахисту, Вт/м<sup>2</sup>;  $\rho_a$  – густина сталі, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_p$  – густина вогнезахисної речовини, кг/м<sup>3</sup>.

Для двотавру, обробленого по всій поверхні вогнезахисною речовиною, коефіцієнт перерізу визначається залежністю

$$\frac{A_p}{V} = \frac{2H + 2b + (2b - d)}{V}. \quad (3)$$

Несну здатність стиснутої колони в момент часу  $t$  за поздовжнього згину  $N_{b,fi,t,Rd}$ , виконаної із двотавру № 24, нагрітого рівномірною температурою  $\theta_a$ , визначають з виразу

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta} f_y / \gamma_{M,fi}, \quad (4)$$

де:  $\chi_{fi}$  – коефіцієнт зниження для втрати стійкості при згинанні для розрахунку на вогнестійкість;  $k_{y,\theta}$  – коефіцієнт зниження границі текучості сталі за температури  $\theta_a$ , що досягається в момент часу  $t$ .

Значення  $\chi_{fi}$  приймають як менше зі значень  $\chi_{y,fi}$  та  $\chi_{z,fi}$ , що визначають з виразу

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_\theta + \sqrt{\phi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta}}, \quad (5)$$

$$\text{де: } \phi_\theta = \frac{1}{2} \left[ 1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2 \right] \text{ та } \alpha = 0,65 \sqrt{235 / f_y}. \quad (6)$$

Відносна гнучкість  $\bar{\lambda}_\theta$  за температури  $\theta_a$  визначають з виразу

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda}_\theta [k_{y,\theta} / k_{E,\theta}]^{0,5}, \quad (7)$$

де:  $k_{y,\theta}$  – коефіцієнт зниження границі текучості сталі за температури  $\theta_a$ , що досягається в момент часу  $t$ ;  $k_{E,\theta}$  – коефіцієнт зниження тангенса кута нахилу лінійної пружної ділянки за температури сталі  $\theta_a$ , що досягається в момент часу  $t$ .

Залежність несної здатності металевої колони від часу нагріву показано на (рис.).

Порівняння межі вогнестійкості металевої колони, не захищеної та захищеної розробленим вогнезахисним покриттям, показано в табл. 2.

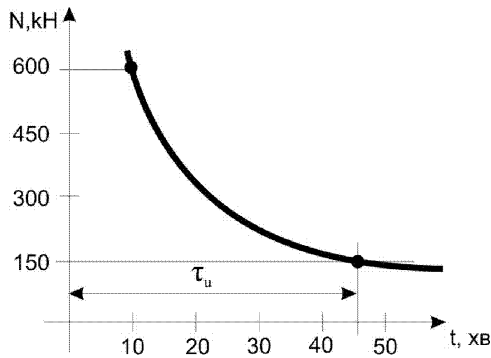


Рис. Залежність несної здатності металевої колони від часу нагріву

Табл. 2. Тривалість втрати несної здатності металевої колони

Металева колона, двотавр № 24	Межа вогнестійкості, хв
Металева колона, захищена вогнезахисною речовиною на основі наповненого поліалюмосилоксану товщиною 0,6 мм, склад № 4	46
Не захищена металева колона	17

Межа вогнестійкості для захищеної металевої колони, виготовленої із двотавра № 24, становить 46 хв (див. табл. 2), що у 3 рази більше, ніж у не захищеної металевої колони.

**Висновки:** Встановлено, що під час нагрівання вихідних композицій на основі наповненого  $Al_2O_3$ ,  $ZiO_2$ , каоліном, та каоліновим волокном поліалюмосилоксану у складі покриття утворюються температуро- і вогнестійкі силіманітомулітова та цирконова фази. Введення до складу покриття 1-3 мас. %  $TiO_2$  сприяє синтезу наведених вище фаз та знижує температуру їх утворення на 50-60 °. Розроблені склади композицій можна використовувати як вогнезахисні покриття для металевих конструкцій. При цьому, згідно з проведеними розрахунками, межа вогнестійкості колони, обробленої розробленою вогнезахисною речовиною товщиною покриття 0,6 мм, збільшується в 3 рази.

### Література

1. Гивлюд М.М. Високотемпературні захисні покриття поверхонь металів на основі наповнених поліалюмосилоксанів / М.М. Гивлюд, В.В. Артеменко // Пожежна безпека : зб. наук. праць. – Львів, 2009. – № 15. – С. 46-50.
2. Артеменко В.В. Склади та аналіз властивостей захисних покриттів на основі наповнених поліалюмосилоксанів / В.В. Артеменко // Пожежна безпека : зб. наук. праць. – Львів, 2010. – № 16. – С. 59-64.
3. Гивлюд М.М. Вогнезахист будівельних конструкцій речовинами на основі наповнених силіційорганічних сполук / М.М. Гивлюд, В.В. Артеменко, В.Б. Лоїк, Я.Й. Коцій // Пожежна безпека : зб. наук. праць. – Львів, 2012. – № 21. – С. 32-38.

### Артеменко В.В., Яковчук Р.С., Харчук А.И., Миллер О.В. Повышение предела огнестойкости металлических конструкций огнезащитными веществами

Исследована проблема повышения огнестойкости и долговечности металлических конструкций в условиях высокотемпературного нагрева путем нанесения на их поверхность защитных покрытий. Разработаны исходные составы для защитных покрытий

при умови отримання при високих температурах максимального вмісту температуростійких силікатів алюмінію та цирконію. Введення в склад покриття 1-3 мас. %  $TiO_2$  сприяє синтезу вищезгаданих фаз і знижує температуру їх утворення на 50-50 °. Виконано розрахунок меж опірності металевих колонок, виготовлених з двутавра № 24, захищеного розробленим огнезахисним складом.

**Ключові слова:** межа опірності, опірність, температура, огнезахисні покриття, фазоутворення, композиція, захисний шар.

### **Artemenko V.V., Yakovchuk R.S., Kharchuk A.I., Miller O.V. Increasing Fire Resistance by Fire Protective Substances of Metal Structures**

The work is dedicated to increasing fire resistance and durability of metal structures in conditions of high heat by drawing on their surface protective coatings. The original compositions for protective coverings received in high temperatures of maximum contents of temperature stable aluminium and zirconium silicates are developed. An insertion of 1-3 %  $TiO_2$  will facilitate a synthesis of cited above phases and reduce the temperature of their formation on 50-60 degrees. The calculation of fire resistance limits of metal column made of beam № 24 protected by elaborated fire protective substance is made. Fire limit of the centrally compressed protected column is defined to be 3 times higher than that of unprotected one.

**Keywords:** fire-resistance limit, temperature, fire-protective coverings, phase creation, composition, protective layer.

УДК 004.896

Аспір. І.О. Вербенко<sup>1</sup> – НУ "Львівська політехніка"

### **СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ КОЛИВАННЯМ ВАНТАЖУ КРАНА НА БАЗІ НЕЙРОНЕЧІТКОГО КОНТРОЛЕРА**

Проаналізовано особливості систем нечіткого виведення Мамдані, Сунего і Т-контролер, їх переваги та недоліки та обрано систему Т-контролер для подальшого її використання у розробленні автоматизованої системи управління крановими установками. Розроблено систему управління коливаннями вантажу крана на базі нейронечіткого контролера T-Controller. Управління здійснюється за допомогою нечітких правил, які розробляли на основі знань та досвіду оператора крана. Процес управління полягає у контролі параметрів кута та відстані вантажу, що дає змогу визначити необхідну потужність, яку потрібно надати крана в певний момент часу.

**Ключові слова:** кранова установка, порталний кран, система нечіткого виведення, нейронечіткий контролер, рівняння руху крана.

**Вступ та аналіз літературних джерел.** Сучасні логістичні системи широко використовують кранові установки для підймання та переміщення великих і важких вантажів у межах певної зони обслуговування. На сьогодні більшість кранів є неавтоматизованими або напівавтоматизованими, і робота таких кранових установок залежить від оператора крана, який ними керує. Причиною цього є проблема коливання вантажу крана під час його переміщення, яке збільшує час транспортування та впливає на надійність, що може призвести до аварійних ситуацій. Таким чином, актуальним є розроблення методів та засобів для контролю коливань вантажу під час його транспортування.

Більшість рішень для вирішення проблем, пов'язаних з управлінням подібними системами, ґрунтуються на традиційній теорії управління. Проте традиційна теорія управління може бути застосована у разі, коли відомі модель керо-

<sup>1</sup> Наук. керівник: проф. Р.О. Ткаченко, д-р техн. наук