

*Р.С. Яковчук, Р.В. Пархоменко, канд. техн. наук, доцент,  
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)  
М.М. Гивлюд, д-р техн. наук, професор, Н.П. Сташко  
(Національний університет «Львівська політехніка»)*

## ВОГНЕЗАХИСНА ЗДАТНІСТЬ НАПОВНЕНИХ СИЛІЦІЙОРГАНІЧНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ БЕТОНУ

Розглянуто питання вогнезахисної здатності наповнених силіційорганічних покриттів для бетону, яка ґрунтується на утворенні спученого термоізоляційного шару на поверхні бетонної конструкції за температури 473-773 К. Завдяки низькій теплопровідності пористий термоізоляційний шар покриття запобігає швидкому прогріву захищеної будівельної конструкції. Досліджено вогнезахисну здатність покриття для бетону за стандартизованою методикою, яка базується на визначенні лінійного коефіцієнта спучення матеріалу покриття.

Встановлено склади вогнезахисних покриттів, які характеризуються найвищими лінійними коефіцієнтами спучення та найнижчими характеристиками коефіцієнтів теплопровідності.

**Ключові слова:** вогнезахисна здатність, наповнені силіційорганічні покриття, лінійний коефіцієнт спучення, коефіцієнт теплопровідності, мікроструктура покриття.

**Вступ.** Будівельні конструкції у звичайних умовах експлуатації можуть зберігати необхідні робочі властивості протягом десятків років. В умовах пожежі ці ж конструкції дуже швидко втрачають свої експлуатаційні якості, руйнуються або втрачають здатність перешкоджати поширенню вогню.

Однією з основних небезпек під час пожежі в будівлі є зниження міцності та обвалення несучих конструкцій (металевих, залізобетонних) під впливом відкритого полум'я та високих температур. Як показує практика, люди під час пожежі гинуть в основному не від опіків, а від травм пов'язаних з руйнуванням будівельних конструкцій та від отруєння токсичними продуктами горіння.

В умовах пожежі температура в зоні горіння може перевищувати 1273 К [1]. В цих умовах елементи несучих конструкцій зазнають значних термічних напружень, а локальна температура елементів конструкцій може перевищити критичну межу та призвести до їх руйнування. У світовій практиці прийнято вважати, що підвищення температури більш ніж 573 К на поверхні залізобетонних конструкцій призводить до їх руйнування.

**Постановка проблеми.** При нагріванні в бетоні відбуваються складні фізико-хімічні та фізико-механічні процеси. За дії температур у цементному камені проходить інтенсивна дегідратація клінкерних мінералів, що одночасно призводить до зниження міцності і маси. Після нагрівання за дії вологи на цементний камінь спостерігається повторна гідратація мінералів клінкеру переважно завдяки окисненню кальцію, внаслідок чого збільшується об'єм і порушується структура бетону [2].

Зниження міцності бетону може сприяти його руйнуванню не тільки через тиск парів в порах, але і під дією термічних напружень, а також через різниці в коефіцієнтах температурного розширення різних заповнювачів бетону.

Таким чином, при дії на бетон високих температур при пожежі, в його структурі відбуваються незворотні деструкційні зміни. Враховуючи недостатню довговічність бетону та виробів на його основі, пов'язану з деструктивними процесами в поверхневих шарах при експлуатації та дії вогню, доцільним є захист їх поверхні від впливу агресивних факторів шляхом нанесення вогнезахисних покриттів.

Використання захисних покриттів на основі органосилікатних композицій, які під час нагрівання переходять у керамічний матеріал, дає змогу значно розширити температурний інтервал використання вказаних виробів. Розроблення складів таких покриттів ґрунтується на використанні зв'язки і наповнювача з високою температуростійкістю, а також їх здатності під час нагрівання взаємодіяти між собою з утворенням кераміко-матричного композиційного матеріалу, який не окиснюється та стійкий до дії вогню. Раціональний підбір компонентів

сприяє забезпеченню високих теплозахисних властивостей покриття, що своєю чергою, дасть змогу тривалий час захищати бетонні будівельні конструкції від впливу теплового випромінювання та відкритого полум'я, запобігатиме тріщиноутворенню та забезпечить надійну експлуатацію конструкцій протягом тривалого часу.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** В даний час для термозахисту застосовують багат шарові силікатні покриття, в яких число шарів сягає 6...8. Так зовнішнє покриття складається з силікатів рідкоземельних елементів ( $R_2O_3 \cdot SiO_2$ ;  $2R_2O_3 \cdot 3SiO_2$ ;  $R_2O_3 \cdot SiO_2$ , де R – Sc, Tm, Yb, Gd, Th або їх комбінація) [3]. В якості проміжного шару використані шари муліту, алюмосилікатів магнію, кальцію, барію і антикорозійні склади – гафнію оксид і силікат, скандію і ітербію силікати. Зовнішній шар – силікати рідкоземельних елементів, (гафнію і цирконію оксиди та силікати. ТКЛР шарів змінюється в межах  $(40...60) \cdot 10^{-7} K^{-1}$ , що забезпечує міцне зчеплення з підкладом.

Розробка складів вогнетривких покриттів для захисту бетонних конструкцій на основі наповнених компонентами оксидів силіційорганічних полімерів, використання яких дає можливість застосовувати загальноприйнятту лакофарбову технологію при приготуванні та нанесенні, описана в [4].

Вогнезахисна здатність розробленого покриття на основі поліметилфенілсилоксану наповненого алюмінію, силіцію та магнію оксидами ґрунтується на утворенні спученого термоізоляційного шару на поверхні бетонної конструкції за температури 473-773 К. Завдяки низькій теплопровідності пористий термоізоляційний шар покриття запобігає швидкому прогріву захищеної будівельної конструкції. Тому дослідження вогнезахисної здатності розробленого покриття є важливою технічною задачею.

**Результати досліджень.** Вогнезахисну здатність покриття для бетону визначали за методикою згідно з [5], яка базується на визначенні лінійного коефіцієнта спучення вогнезахисного матеріалу.

Сутність методу визначення лінійного коефіцієнта спучення полягає у визначенні співвідношення товщини вогнезахисного матеріалу, що нанесений на сталеву пластину, до та після впливу температури 613 К. Для випробувань за методом визначення лінійного коефіцієнта спучення вогнезахисні покриття (фарби, лаки) наносять, згідно з технологією підприємства-виробника, на дві сталеві квадратні пластини зі стороною  $(50 \pm 1)$  мм та товщиною  $(2,0 \pm 0,2)$  мм.

Товщина шару покриття після висихання має становити  $(1,0 \pm 0,5)$  мм. Допускається нанесення шару іншої товщини, якщо це передбачено технологією підприємства-виробника. З вогнезахисних матеріалів, що постачаються у вигляді стрічок, пластин тощо, вирізають зразки довжиною  $(50 \pm 1)$  мм та фактичною шириною, але не більше  $(50 \pm 1)$  мм, які накладають або наклеюють на сталеві пластини, згідно з технологією підприємства-виробника.

Підготовлені зразки висушують за температури  $(20 \pm 5)$  °С протягом 48 год та за температури  $(70 \pm 5)$  °С протягом 3 год. Після охолодження до температури навколишнього середовища вимірюють товщину шару покриття із вогнезахисного матеріалу  $h_n$  за формулою:

$$h_n = h_z + h_m, \quad (1)$$

де  $h_z$  – товщина зразка (разом із сталеву пластину), мм;

$h_m$  – товщина сталеві пластини, мм.

Пристроєм регулювання, підтримання та контролю температури у печі задають температуру  $(340 \pm 5)$  °С та доводять її до сталої температури протягом не менше 1 год.

Два зразки вносять до печі за час не більше 20 с. Після закриття печі вмикається секундомір. Через 20 хв пластини виймають із печі та встановлюють на пластину з негорючого матеріалу для охолодження. Через 30 хв штангенциркулем визначається середня висота спученого шару матеріалу  $h_c$  на кожній пластині.

Для визначення середнього значення висоти вимірюють висоту у п'яти точках у центрі пластини і в середніх точках між центром та кутами пластини.

За результатами випробувань за методом визначення лінійного коефіцієнта спучення розраховується коефіцієнт спучення на пластинах  $K_r$  за формулою:

$$K_r = 0,5 (h_{c1} / h_{n1} + h_{c2} / h_{n2}), \quad (2)$$

де  $h_{c1}, h_{c2}$  – середні значення товщини спученого шару матеріалу на першій та другій пластинах, мм;  
 $h_{n1}, h_{n2}$  – середні значення товщини початкового шару матеріалу на першій та другій пластинах, мм.

Вогнезахисний засіб вважається таким, що витримав випробування, якщо значення коефіцієнта спучення становить не менше 80 % від значення коефіцієнта спучення, що подане підприємством-виробником у технологічному регламенті на відповідний вогнезахисний засіб.

Склади досліджуваних модельних систем покриттів представлені в табл. 1.

**Таблиця 1**

*Склади досліджуваних модельних систем покриттів*

№ складу покриття	Вміст компонентів, мас.%			
	КО-08	магнію оксид	глинозем	пісок кварцовий
1	22,37	7,16	34,0	36,46
2	22,37	12,25	31,23	34,13
3	22,37	15,21	29,53	32,88
4	22,37	13,42	26,84	37,36

Проведеними дослідженнями встановлено лінійні коефіцієнти спучення та теплопровідності для чотирьох складів вогнезахисних покриттів, які наведено у табл. 2.

**Таблиця 2**

*Лінійні коефіцієнти спучення та теплопровідності досліджуваних складів покриттів*

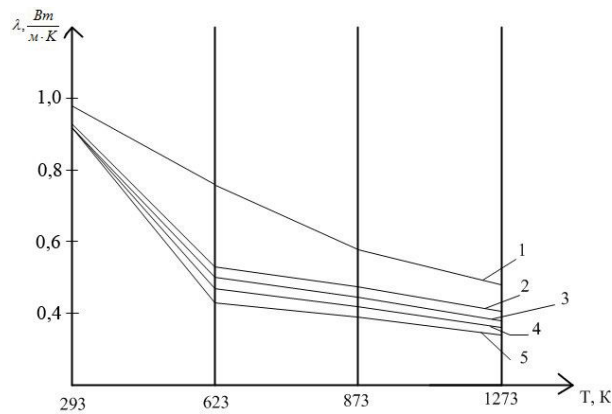
№ складу покриття	Лінійний коефіцієнт спучення, $K_L$	Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda, \frac{Вт}{м \cdot К}$ ( $T = 613K$ )
1	11,9	0,075
2	12,1	0,068
3	12,2	0,063
4	12,3	0,058

На рис. 1 та табл. 3 представлено залежність коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного бетону при нагріванні

**Таблиця 3**

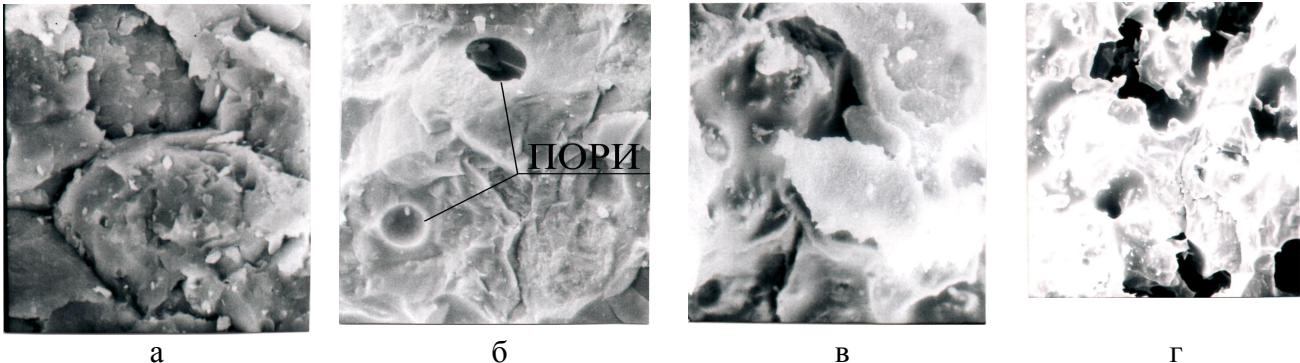
*Коефіцієнти теплопровідності вогнезахисного бетону при нагріванні*

№ складу покриття	Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda, \frac{Вт}{м \cdot К}$			
	293 К	623 К	873 К	1273 К
Без покриття	0,95	0,78	0,59	0,50
1	0,92	0,62	0,50	0,44
2	0,92	0,51	0,48	0,42
3	0,91	0,46	0,43	0,40
4	0,91	0,43	0,40	0,38



**Рис. 1.** Залежність коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного бетону при нагріванні: 1 – незахищений бетон; 2 – бетон захищений покриттям складу № 1; 3 – бетон захищений покриттям складу № 2; 4 – бетон захищений покриттям складу № 3; 5 – бетон захищений покриттям складу № 4.

Зменшення коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного бетону підтверджується утворенням на його поверхні теплоізоляційного поризованого шару. Вихідне покриття (рис. 2 а) представлено щільно з'єднаними між собою частинками оксидного наповнювача поліметилфенілсилоксановою зв'язкою. Нагрівання до 623 К завдяки термоокисній деструкції зв'язки призводить до утворення округлих пор з частковим розривом зв'язків між окремими частинками наповнювача (рис. 2 б). При температурі нагрівання 873 К (рис. 2 в) у структурі покриття з'являється значна кількість пор різноманітної конфігурації, а частинки наповнювача частково оплавляються. Нагрівання до 1273 К (рис. 2 г) призводить до утворення на поверхні бетону сильно поризованого вогнезахисного шару.



**Рис. 2.** Зміна мікроструктури захисного покриття при нагріванні: а – вихідне; б – 623 К; в – 873 К; г – 1273 К ( $\times 1000$ )

**Висновки.** Таким чином, шляхом експериментальних досліджень визначено вогнезахисну здатність наповнених силіційорганічних покриттів для бетону. Встановлено, що склади вогнезахисних покриттів № 3 та № 4 характеризуються найвищими лінійними коефіцієнтами спучення та найнижчими характеристиками коефіцієнтів теплопровідності, що, своєю чергою є важливими показниками ефективності вогнезахисту для бетонних будівельних конструкцій.

#### Література:

1. Милованов А.Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. – М.: Стройиздат, 1998. – 304 с.
2. Жуков В.В., Основы стойкости бетона при действии повышенных и высоких температур: Дис... д-ра техн. наук: 05.23.05. – М.: НИИЖБ, 1982. – 223 с.

**3. Ємченко І.В.** Шляхи регулювання властивостей оксидної кераміки, одержаної із наповнених силіційорганічних композицій / І.В. Ємченко, М.М. Гивлюд // Вісник Донецького державного університету економіки і торгівлі ім. М. Тугай – Барановського. – 2006. – № 1. – С. 148 – 152.

**4. Яковчук Р.С.** Кордієритові вогнетривкі захисні покриття для бетонних конструкцій / Р.С. Яковчук, Р.В. Пархоменко, Я.Й. Коцій // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів: ЛДУ БЖД, УкрНДІПБ МНС України, 2012. – № 21. – С. 195 – 200.

**5. ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29-2010** Захист від пожежі. Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання.

*Р.С. Яковчук, Р.В. Пархоменко, Н.Н. Гивлюд, Н.П. Сташко*

### **ОГНЕЗАЩИТНАЯ СПОСОБНОСТЬ НАПОЛНЕННЫХ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ БЕТОНА**

Рассмотрены вопросы огнезащитной способности наполненных кремнийорганических покрытий для бетона, основанной на образовании вспученного теплоизоляционного слоя на поверхности бетонной конструкции при температуре 473-773 К. Благодаря низкой теплопроводности пористый термоизоляционный слой покрытия предотвращает быстрый прогрев защищаемой строительной конструкции. Исследовано огнезащитную способность покрытия для бетона по стандартизированной методике, которая базируется на определении линейного коэффициента вспучивания материала покрытия.

Установлено составы огнезащитных покрытий, которые характеризуются высокими линейными коэффициентами вспучивания и низкими характеристиками коэффициентов теплопроводности.

**Ключевые слова:** огнезащитная способность, наполненные кремнийорганические покрытия, линейный коэффициент вспучивания, коэффициент теплопроводности, микроструктура покрытия.

*R.S. Yakovchuk, R.V. Parkhomenko, M.M. Hyvlyud, N.P. Stashko*

### **FIRE RESISTANT ABILITY OF FILLED SILICONE ORGANIC COATINGS FOR CONCRETE**

The issue of fire resistant efficiency of filled silicone organic coatings for concrete was considered, which is based on the formation of expanded thermo-insulating layer on surface of the concrete structure at temperature of 473-773 K. Due to low thermal conductivity the porous thermo-insulating coating layer prevents rapid heating of protected building structure. Fire resistant ability of coatings for concrete was researched according to standardized methodology, which is based on determining linear expansion ratio of fire resistant material.

The composition of fire resistant coatings, which are characterized by the highest linear expansion ratios and the lowest thermal conductivity characteristics, was determined.

**Keywords:** fire resistant ability, filled silicone organic coatings, linear expansion ratio, thermal conductivity ratio, coating microstructure.

