

*Ю.І.Орловський, д.т.н., професор (Львівський інститут пожежної безпеки МНС України),  
Т.М.Шналь, к.т.н. (Національний університет "Львівська політехніка"),  
Ю.Е.Павлюк (Львівський інститут пожежної безпеки МНС України)*

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВОГНЕЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ БЕТОННИХ І ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ У ЖОРСТКИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ УМОВАХ

В статті приведено результати досліджень ефективності вогнезахисних покриттів бетонних та залізобетонних конструкцій з урахуванням критерію крихкого руйнування бетону. Запропоновано логічну схему для вирішення задачі монолітності покриття з бетонною підкладкою. Проведена оцінка температурно-усадкової тріщиностійкості бетонних взірців за спеціальною методикою на основі методики оцінки усадкової тріщиностійкості.

При пожежі в будинках і спорудах із застосуванням бетонних і залізобетонних конструкцій, часто відбувається крихке вибухонебезпечне руйнування бетону, що починається, як правило, через 5-20 хвилин від початку вогневого впливу і продовжується протягом усього часу пожежі до їхнього повного руйнування. Імовірність такого виду руйнування при пожежі оцінюється за величиною критерію крихкого руйнування бетону.

Причиною крихкого руйнування є критичні деформації двох видів: розширення бетону внаслідок підвищення температури, особливо в результаті теплового удару (пожежа) і усадки в результаті випаровування води, що міститься в порах і капілярах бетону. Перший вид деформації може мати оборотний характер, другий - необоротний.

Одним зі способів захисту бетону від дії вогню і підвищених температур є нанесення на поверхню конструкцій вогнезахисних покриттів, що здимаються. Ефективність такого захисту залежить як від надійної роботи покриття, міцності когезійних і адгезійних зв'язків, так і шару бетону, що захищає від прогріву арматуру до критичної температури, рівної  $500^{\circ}\text{C}$  і зміни його фізико-механічних властивостей при підвищенні температури.

Результати досліджень, у тому числі авторів, свідчать про залежність коефіцієнтів температурного розширення бетону як від температури, так і від вологості. При нагріванні бетону можуть одночасно з'являтися деформації температурного розширення ( $\varepsilon_{b,t}$ ) і температурної усадки ( $\varepsilon_{b,sh,t}$ ). У цьому випадку температурна деформація бетону буде меншою від температурного розширення ( $\varepsilon_{b,t}$ ) на величину температурної усадки ( $\varepsilon_{b,sh,t}$ ). Деформацію температурного розширення можна розрахувати за формулою:

$$\varepsilon_{b,t} = \varepsilon_{b,sh,t} - \varepsilon_{b,t} = (\alpha_{b,sh,t} - \alpha_{b,t})t = \alpha_{b,t}t \quad (1)$$

Варто враховувати, що під впливом вогню в бетоні розвиваються усадочні деформації при нормальній температурі, особливо при відносній вологості повітря менше 40%. Значення деформації усадки бетону до моменту часу  $\tau$  визначаються за залежністю

$$\varepsilon_{b,sh}(\tau, \tau_w) = \varepsilon_{b,sh}(\tau=0, \tau_w) [1 - e^{-\alpha_{b,t}(\tau - \tau_w)}], \quad (2)$$

де  $\tau_w$  – вік бетону в момент закінчення вологого зберігання, доби.

При розрахунках усадочну деформацію бетону умовно розділяють на деформації, що протікають при нормальній температурі і деформації усадки, що викликані нагріванням. Величина останніх залежить не тільки від температури, але також від швидкості нагрівання, розміру зразків, початкової вологості бетону, виду в'язучого і наповнювачів.

За пропозицією В.І.Мурашева, при розрахунку температурних деформацій користуються середнім коефіцієнтом тепла, що в інтервалі температур від  $t$  до  $t+\Delta t$  обчислюються за залежністю:

$$\alpha_{b,t} = \frac{\varepsilon_{b,t}(t + \Delta t) - \varepsilon_{b,t} \cdot t}{\Delta t} \quad (3)$$

Відомо, що при нагріванні бетону змінюються не тільки його фізико-механічні, але і теплофізичні характеристики. Вологість бетону і випаровування води в процесі нагрівання змінюють характер прогріву бетону. Численні теоретичні й експериментальні дослідження дозволили успішно вирішити одне зі складних питань при аналітичних дослідженнях теплотехнічної задачі вогнестійкості - залежності теплофізичних характеристик бетону від температури, а також впливу його вологості на прогрів конструкцій.

З цією метою було введено поняття приведенного коефіцієнта теплопровідності, обумовленого формулою

$$\alpha_{np} = \frac{3,6 \cdot \lambda_{t,cp}}{(c_{t,cp} + 0,05w)\gamma_c}, \quad (4)$$

де  $\lambda_{t,cp}, c_{t,cp}$  – розрахункові середні коефіцієнти теплопровідності і теплоємності бетону, що обчислюються при температурі 723К;

w – вологість бетону, %;

$\gamma_c$  – щільність сухого бетону, визначається за формулою:

$$\gamma_c = \frac{100\gamma_w}{(100 + w)}, \quad (5)$$

де  $\gamma_w$  – щільність вологого бетону.

Захист бетонних та залізобетонних конструкцій вогнезахисними покриттями вносить істотні зміни в характер їхнього прогріву. Задачею досліджень, проведених авторами, є вивчення закономірностей зміни монолітності шаруватої системи "покриття-конструкція" при підвищенні температури у режимі "стандартної" пожежі:

$$t_{c(\tau)} = t_0 + 345 \lg(8\tau + 1), \quad (6)$$

де  $t_0$  – початкова температура пожежі, 0 °С;

$\tau$  – час, г.

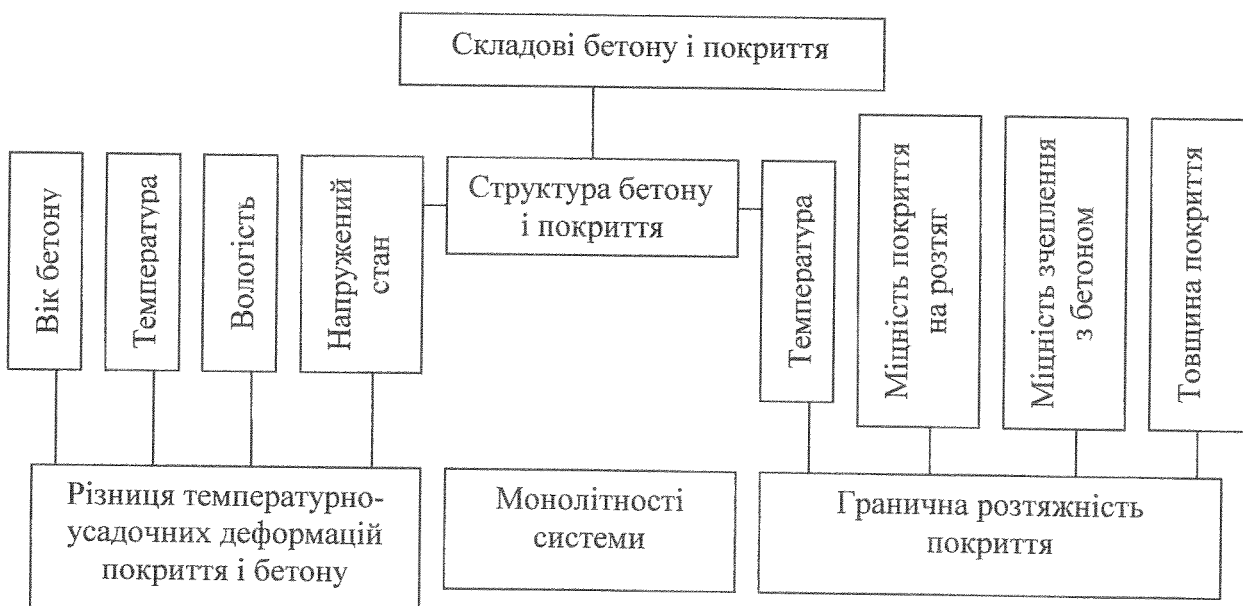


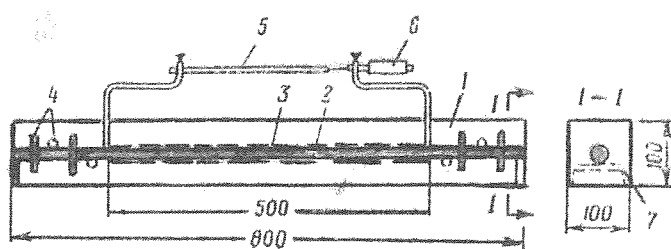
Рис. 1. Логічна схема для вирішення задачі монолітності покриття з бетонною підкладкою.

Для вирішення задачі визначалися: різниця температурних деформацій покриття і бетону та граничний розтяг покриття. Це дозволяє установити критерії монолітності системи. Логічна схема рішення задачі показана на рис.1.

Зі збільшенням різниці температурно-усадочних деформацій покриття і бетону можливі наступні види руйнування монолітності системи: при  $E_{в.т} \leq E_{max,t}$  можливе розшарування, при  $E_{в.т} < E_{max,t}$  може наступити розтріскування покриття. Для збереження монолітності слід прагнути до зближення величин кінцевої усадки і граничного розтягу, а у випадку розшарування – до збільшення міцності зчеплення покриття з бетоном.

Оцінка температурно-усадочної тріщиностійкості бетонних зразків проводилась за спеціальною методикою, розробленою на підставі методик оцінки усадочної тріщиностійкості бетону і визначення коефіцієнта інтенсивності напруг у зразках зі штучною тріщиною при випробуванні зразків у температурній камері.

Методика оцінки усадочної тріщиностійкості передбачала випробування зразків розміром 0,10×0,10×0,80м з розташованим по осі гладким сталевим стрижнем діаметром 18мм. У середній частині довжиною 0,5 м стрижень покривався мастилом і обгортався поліетиленовою плівкою для виключення зчеплення з бетоном. На кінцях до стрижня приварювалися коротиші для посилення анкерування кінців стрижня в бетоні. Для вимірювання поздовжніх деформацій стрижня до нього на відстані 0,50м один від одного приварювали тримачі, у які після укладання бетону у форму встановлювали індикатор і упорний стрижень (рис.2).



- 1– зрізці розміром 0,1х 0,1х 0,8м;
- 2– арматурний стрижень;
- 3– ізоляція із солідолу і 3-х шарів поліетилену;
- 4– анкерні коротиші;
- 5– упорний стрижень;
- 6– індикатор годинникового типу;
- 7– опорна скоба.

Рис.2 Зразок для вимірювання деформацій, викликаних усадкою бетону.

Спостереження за деформацією арматурного стрижня починалися з моменту твердіння бетону і продовжувалися до появи першої тріщини. Така методика випробувань дозволяє судити про усадочну тріщиностійкість бетону не тільки за часом появи тріщини, але і за чисельним значенням коефіцієнта усадочної тріщиностійкості  $K$ , що являє собою

$$K = \frac{R_{st}}{\sigma_{st.sh}}, \quad (7)$$

де  $R_{st}$  – межа міцності бетону при розтягу в 28-денному віці, МПа;  
 $\sigma_{st.sh}$  – напруження розтягу у бетоні від усадки в тому ж віці, МПа.

Значення  $R_{ot}$  визначалося методом розколювання кубів з ребра 0,1м, виготовлених і випробуваних в одному віці з призмами.

Напруження розтягу у бетоні від усадки визначали по вимірюваних деформаціях арматури за формулою

$$\sigma_{ot.sh} = E_{s.sh} \cdot E_s \cdot r, \quad (8)$$

де  $E_{s.sh}$  – відносна деформація стиску арматури на 28 добу після виготовлення зразка;  
 $E_s$  – модуль пружності арматури, МПа;

$r = \frac{F_s}{F_b}$  – відношення площі перетину стрижня до площі перетину бетону, рівне в нашому випадку 0,025.

Коефіцієнт  $K$  являє собою коефіцієнт запасу, так як вказує, у скільки разів межа міцності бетону на розтяг перевищує напруження розтягу від усадки в даному віці.

З умови сумісності деформацій бетону та арматури випливає, що

$$E_{s.sh} = E_{e.sh} - E_{e,t}, \quad (9)$$

де  $E_{e.sh}$  – вільні усадочні деформації бетону;

$E_{e,t}$  – деформація розтягу бетону.

З огляду на те, що  $E_s = n \cdot E'_{ot}$ , де  $E'_{ot}$  – модуль пружнопластичності бетону при розтягу, напругу розтягу в бетоні від усадки можна подати у вигляді:

$$\sigma_{ot.sh} = (E_{e.sh} - E_{e,t}) E'_{ot} \cdot n \cdot \mu, \quad (10)$$

Тоді коефіцієнт усадочної тріщиностійкості

$$K = \frac{R_{ot}}{(E_{e.sh} - E_{e,t}) E'_{ot} \cdot n \cdot \mu}, \quad (11)$$

З формули випливає, що коефіцієнт  $K$  залежить від величини вільної усадки, межі міцності і деформативності бетону при розтягу, модуля пружнопластичності бетону, модуля пружності арматури і відсотка армування. Мінімальні значення  $K=1$  будуть при  $\sigma_{ot.sh} = R_{ot}$  в момент утворення тріщини, максимальне  $K=\infty$  при напругах від усадки  $\sigma_{ot.cr} = 0$ . Можна також помітити, що зі збільшенням міцності при розтягу, зменшенні вільної усадки і модуля пружнопластичності бетону коефіцієнт  $K$  зростає.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Милованов А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций. –М.: Стройиздат, 1986. – 224 с.
2. Панюков Э.Ф. Оценка состояния железобетонных конструкций после пожара : 05.23.01: Дис...д-ра техн.наук. –М., НИИЖБ, 1991. –387 с.
3. Жуков В.В. Основы стойкости бетона при действии повышенных и высоких температур : 05.23.05: Автореф. дис...д-ра техн.наук. –М., НИИЖБ, 1982. –48 с.
4. RILEM Committee 44- PHT edited by U.Schneider: Behaviour of concrete at high temperatures; Gesamt hochule Kassel University, June 1985.
5. Khoury G.A. Compressive strength of concrete at high temperatures: reassessment; Magazine of Concrete Research. Vol. 44. № 161. Dec. 1992
6. Abrams M.S. Compressive strength of concrete at temperatures to 1600 F. ACI Publication SP 25 Paper SP25 – 2. American Concrete Institute, Detroit 1971.
7. Khoury G.A., Grainger B.N., Sullivan P.J.E. Strain of concrete during first heating to 600°C under load. Magazine of Concrete Research. Vol. 37. № 133. Dec. 1985.
8. Орловский Ю.И., Ивашкевич Б.П., Труш Л.Е., Шналь Т.Н. Вспучивающиеся покрытия для огнезащиты конструкций из стали и алюминиевых сплавов // Изв. вузов. Строительство. –1995. – № 9. –С.55-60.

9. Шналь Т.Н. Свойства и оптимизация составов вспучивающихся покрытий для огнезащиты металлических конструкций: 05.23.05: Дис...канд. техн.наук. –Львов, ГУ «Львовская политехника», 1995. –248 с.

10. Рекомендации по защите бетонных и железобетонных конструкций от хрупкого разрушения при пожаре. –М.: Стройиздат, 1979. – 22 с.

УДК 539.3:517.958

*М.Ф.Ясінський, к.т.н., доцент, А.Д.Кузик, к.ф.-м.н., В.М. Юзевич, д.ф.-м.н., професор (Львівський інститут пожежної безпеки МНС України), Л.М.Ясінська (Українська академія друкарства), В.В.Ковалишин, О.В.Ковалишин (Львівський інститут пожежної безпеки МНС України)*

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОДАЧІ ПІНИ

Розроблено математичну модель фізико-механічних процесів в швидко рухомій суміші двох фаз (рідкої і газоподібної) з урахуванням зовнішнього розмірного ефекту на основі методики опису поверхневих явищ

В період бурхливого розвитку пожежної техніки все більшу увагу привертають фізичні процеси на границі розділу середовищ. Але провести експеримент і безпосередньо оцінити взаємодію частинок рідини із стінками патрубків у міжфазних шарах досить важко. Тому спочатку необхідно побудувати не особливо громіздку в математичному плані математичну модель і провести обчислювальний експеримент для аналізу параметрів перехідного шару, а вже потім підбирати такі експерименти, які могли б дати непряму, але досить важливу інформацію про те, що діється на границі.

Розглядається швидкоплинна суміш рідини і газу в робочій частині патрубка. Проявляється зовнішній розмірний ефект, зумовлений зміною геометричних розмірів патрубка.

Мета першої частини даної праці – математичне моделювання фізико-механічних процесів в швидкоплинній суміші двох фаз (рідкої і газоподібної) з урахуванням зовнішнього розмірного ефекту на основі методики опису поверхневих явищ.

Суміш в першому наближенні вважаємо 3-компонентною:  $k = 3$  – рідина,

$k = 2$  – бульбашки газу,  $k = 1$  – розчинений в рідині газ. Вважаємо суміш стискуваною, а газ, що заповнює бульбашки, досконалим, тобто хімічні реакції в них (бульбашках) відсутні, вільних електричних зарядів немає, а в'язкістю суміші нехтуємо.

Основними процесами в суміші вважаємо теплові, деформаційні (рух суміші з великою швидкістю  $V$ ), а також виникнення (зникнення), перерозподіл в потоці газових бульбашок.

З метою опису зовнішнього розмірного ефекту тонкий приграничний шар, що обмежує суміш, моделюємо фізичною поверхнею з наданими їй властивостями приповерхневого шару.

При макроскопічному представленні процесів відповідно до відомих положень механіки суцільного середовища [1] і термодинаміки нерівноважних процесів [2] використовувалась гіпотеза локальної рівноваги в кожному малому елементі об'єму і поверхні.