

шляхової роздачі води з напірного трубопроводу // Промислова гідравліка і пневматика.– 2006.– № 4 (14).– С.37–40. 15. Чернюк В.В., Орел В.И. Уменьшение неравномерности путевой раздачи воды из напорного трубопровода с помощью добавок полиакриламида: Тр. VII Междунар. конгр. “Вода: экология и технология” (Экватэк-2006). – М., 2006. – С. 2.

УДК 624.131.64

Т.М. Шналь, М.І. Стасюк

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра будівельних конструкцій і мостів

ВПЛИВ ВОЛОГОСТІ НА КРИХКЕ РУЙНУВАННЯ БЕТОНУ В УМОВАХ ПОЖЕЖІ

© Шналь Т.М., Стасюк М.І., 2007

При пожежах спостерігається крихке руйнування бетону будівельних конструкцій. Показано роль вологості бетону під час нагрівання і закономірності зміни фізико-механічних і теплофізичних характеристик. Розглянуто причини і критерій крихкого руйнування бетону.

There is fragile destruction of concrete of build constructions at fires. The role of humidity of concrete is rotined at heating and conformity to the law of change of mechanical and thermophysical descriptions. Reasons and criterion of fragile destruction of concrete are considered.

Постановка проблеми. Відповідно до останніх досліджень під час пожеж спостерігається крихке руйнування бетону в будівельних конструкціях. Це пояснюється тим, що в будівництві широко стали використовувати високоміцні бетони, особливо в тонкостінних і попередньо напружених конструкціях.

За дії високих температур, що розвиваються під час пожежі, змінюються усі характеристики бетону. Головну роль при цьому відіграють зміни, що відбуваються в цементному камені, який утворюється внаслідок хімічної взаємодії портландцементного клінкеру з водою (процес гідrataції цементу). За дії температур у цементному камені відбувається інтенсивна дегідrataція клінкерних мінералів, що одночасно призводить до зниження міцності і маси. Після нагрівання за дії вологи на цементний камінь спостерігається повторна гідrataція мінералів клінкеру переважно за рахунок окису кальцію, внаслідок чого збільшується об'єм і порушується структура бетону [1, 2].

Наявність у структурі бетонів незв'язаної і хімічно зв'язаної води, очевидно впливає на швидкість прогрівання конструкцій під час пожежі. Відомо, що під час нагрівання бетонних конструкцій до температури 200 °С, тимчасово припиняється наростання температур. Це пов'язано з тим, що частина тепла витрачається на випаровування незв'язаної води. Уповільнення нагрівання за більш високих температур обумовлено випаровуванням хімічно зв'язаної води. Отже, експлуатаційна вологість бетону конструкцій відіграватиме важливу роль під час оцінки можливості крихкого руйнування бетону під час пожежі.

Під час пожежі бетонні і залізобетонні конструкції піддаються швидкому короточасному і тривалому нагріванню, що змінює усі властивості бетону, який має природну вологість. Особливо інтенсивно відбувається зниження міцності за тривалого нагрівання бетону.

Експериментальні дослідження. Зниження міцності бетону пояснюється такими причинами і явищами. Нагрівання бетону природної вологості до температури 100 °С супроводжується адсорбційним зниженням міцності цементного каменю. При цьому відбувається глибше проникнення води в мікротріщини в цементному камені і збільшується його істинна поверхня, покрита адсорбційним прошарком води. Це призводить до зменшення поверхневої енергії кристалів цементного каменю і полегшує розвиток існуючих мікротріщин за дії на бетон зовнішнього навантаження. Порушенню структури бетону в цьому інтервалі температур сприяє і та обставина, що коефіцієнт температурного розширення води в багато разів перевищує коефіцієнт температурного розширення цементного каменю і заповнювачів. Це призводить до посилення дії водяних плівок, що розклинають, оболікаючи цементний камінь і заповнювачі.

Подальше підвищення температури від 200 °С поряд з інтенсивною дегідратацією клінкерних мінералів цементного каменю призводить до деструктивних процесів, що відбуваються внаслідок різниці температурних деформацій і пружних властивостей матеріалів, з яких складається бетон. Під час нагрівання звичайного бетону вище від температури 500–600 °С на поверхні зразків утворюються дрібні тріщини, що призводять до руйнування бетону.

Міцність бетону на стиск $R_{b,tem}$ за короткочасного і тривалого нагрівань виражається через міцність бетону за нормальної температури:

$$R_{b,tem} = R_b \cdot \gamma_{bt} , \quad (1)$$

де γ_{bt} – коефіцієнт умов роботи бетону за підвищення температур.

Збільшення деформативності бетону за високих температур також є наслідком порушення зміни його структури. З підвищенням температур модуль пружності бетону знижується внаслідок збільшення пружних деформацій (рис.1). Відносна зміна модуля є величиною змінною, що залежить від температури:

$$E_{bt(t)} = E_b \beta_b(t) ; \quad (2)$$

$$\beta_b(t) = 1 - \beta_0 t + 0,5 \beta_1 t^2 . \quad (3)$$

Експериментально встановлено, що для важкого бетону на гранітному щебені коефіцієнти β_0 , і β_1 є сталими величинами і відповідно дорівнюють, $\beta_0 = 2,5 \cdot 10^{-3}$ та $\beta_1 = 3,26 \cdot 10^{-6}$.

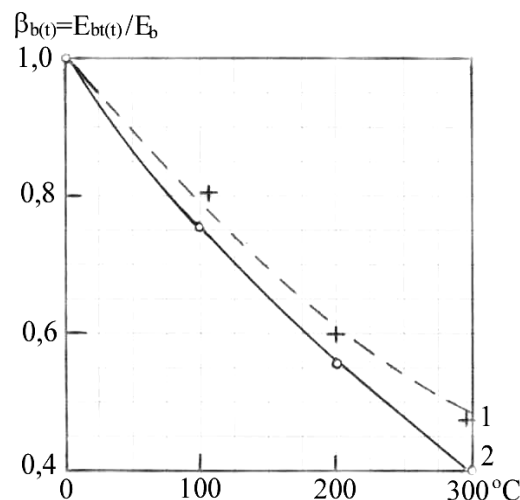


Рис. 1. Зміна відносного модуля пружності важкого бетону на гранітному щебені в інтервалі температур 200–300 °С

Деструктивні процеси, що спостерігаються під час нагрівання бетону, які призводять до зниження міцності і тріщиностійкості, підвищення деформативності і збільшення загальної пористості, викликають у бетонних елементах під дією зовнішнього навантаження перерозподіл напружень у матеріалі. Під дією стискувальних і напружень, що розтягують, відбувається розвиток невірноважених тріщин і, як наслідок, – вибухоподібне руйнування бетону за високих температур.

Розробка нових і удосконалення існуючих складів бетонів викликає необхідність оцінки можливості крихкого їх руйнування під час пожежі. Для бетонів нормального тверднення таку оцінку рекомендується робити за величиною критерію крихкого руйнування F [3], використовуючи положення механіки руйнування твердих тіл.

Застосовуючи механіку крихкого руйнування до бетону, варто враховувати особливості його структури як неоднорідного матеріалу, у якому до нагрівання і під час нагрівання завжди є мікро- і макротріщини, які виникли під дією розглянутих вище напружень.

Критерій крихкого руйнування визначається за такою формулою:

$$F = a \frac{\alpha_{bt} \cdot E_{bt} \cdot \rho}{K'_{IC} \cdot \lambda \cdot \Pi} W_o^3, \quad (4)$$

де a – коефіцієнт пропорційності, що дорівнює $1,16 \times 10^{-2}$, $(\text{Вт} \times \text{м}^{5/2})/\text{кг}$; α_{bt} – коефіцієнт лінійної температурної деформації бетону, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; E_{bt} – модуль пружності нагрітого бетону, $\text{Мн}/\text{м}^2$; ρ – щільність бетону в сухому стані, $\text{кг}/\text{м}^3$; K'_{IC} – коефіцієнт псевдоінтенсивності напружень неоднорідного матеріалу, $\text{Мн} \times \text{м}^{3/2}$; λ – коефіцієнт теплопровідності бетону, $\text{Вт}/(\text{м} \times ^{\circ}\text{C})$; Π – загальна пористість, $\text{м}^3/\text{м}^3$; W_o^3 – об'ємна експлуатаційна вологість бетону, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Експлуатаційна об'ємна вологість бетону зі щільним заповнювачем визначається як його середня рівноважна вологість:

$$W_o^3 = W_b \cdot \rho \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

де W_b – рівноважна вологість бетону за масою, $\text{кг}/\text{кг}$; ρ – щільність бетону в сухому стані, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Рівноважна вологість бетону на щільних заповнювачах за масою визначається залежно від відносної розрахункової вологості повітря φ , за якої передбачається експлуатація конструкції, і від витрати цементу (рис. 2). Загальна пористість залежить від витрати цементу і відношення В/Ц визначається за такими формулами:

$$\text{при } \frac{B}{\text{Ц}} \geq 0,4, \quad \Pi = \text{Ц} \left(\frac{B}{\text{Ц}} - 0,2 \right) \cdot 10^{-3}; \quad (6)$$

$$\text{при } \frac{B}{\text{Ц}} < 0,4, \quad \Pi = \frac{B}{\text{Ц}} \cdot \text{Ц} \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}. \quad (7)$$

Аналіз критерію крихкого руйнування бетону під час пожежі (4) показує, що в запропонованій залежності, поряд із достатньо вивченими фізико-механічними і теплофізичними характеристиками за підвищених і високих температур, входить маловивчений коефіцієнт інтенсивності напружень K'_{IC} , що характеризує величину напружень у вершині тріщини, яку може витримати цей матеріал у момент переходу тріщини з рівноважного в нерівноважний стан.

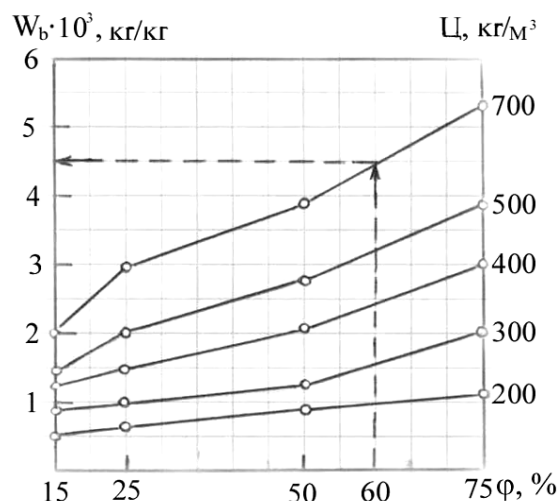


Рис. 2. Залежність рівноважної вологості бетону на щільних заповнювачах від відносної розрахункової вологості повітря і витрати цементу

Для підбору складу бетону, який мав би найменшу схильність до розтріскування під час пожежі, коли це потрібно для підвищення межі вогнестійкості конструкції, необхідно мати експериментальні величини коефіцієнтів інтенсивності напружень, що уможливають оцінити виникнення і розвиток тріщин у бетоні під час нагрівання і одночасної зміни властивостей і характеристик бетону. Об'єктом досліджень був важкий і легкий бетон на портландцементі.

Мета досліджень – експериментальне вивчення закономірності зміни коефіцієнта інтенсивності напружень залежно від температури, виду і складу бетонів.

Зразки розміром $0,1 \times 0,1 \times 0,4$ м із штучною тріщиною заввишки $0,025$ м випробовувалися за температур $20, 105, 200$ і 300 °С. Нагрівання здійснювали зі швидкістю 300 °С/год (найбільша швидкість нагрівання бетону на відстані $2-3$ см від поверхні в умовах стандартної пожежі), після чого температура стабілізувалася в часі до рівномірного прогрівання зразків за товщиною перерізу за температури випробування. Зразки руйнувалися в зоні чистого згину в двох точках на відстані $1/4$ довжини від центра. Пристрої, що завантажують, і опори зразків не обмежували свободи їхнього повороту і переміщень. Під час випробування автоматично на стрічці осцилографа фіксувалися навантаження і деформації бетону на поверхні зразків.

Величина K_{IC} визначалась залежно від руйнуючого навантаження P , відстані від точки опори до точки прикладення сили a , ширини зразка b , висоти h і висоти штучної тріщини c за формулою

$$K_{IC} = \frac{0,06 \cdot P \cdot a}{bh^2} \left[\frac{2h}{\pi} \left(10,08 \left(\frac{c}{h} \right)^2 - 1,225 \frac{c}{h} - 0,1917 \right) \right]^{1/2}. \quad (8)$$

Як показують результати випробувань, початковий коефіцієнт інтенсивності напружень за температури 20 °С залежить від міцності бетону і концентрації складового цементного каменю, дрібного і заповнювача.

Підвищення в'язкості руйнування бетонів із збільшенням вмісту заповнювачів за постійного водоцементного відношення із позицій механіки руйнування твердих тіл можна пояснити дією поверхні поділу між цементним каменем і заповнювачем. Зерна заповнювача створюють поверхню поділу – контактний прошарок, більш слабкий, ніж цементний камінь.

Ефективне гальмування розвитку тріщин відбувається за п'ятикратного ослаблення матеріалу на внутрішній поверхні поділу. Навіть контактний прошарок, що сформувався нормально, у бетоні має міцність на розтяг у $5-7$ разів меншу, ніж міцність цементного каменю. Отже, за допомогою контактної прошарку заповнювач припиняє розвиток тріщин у бетоні. Подальший їх розвиток можливий лише тоді, коли будуть досягнуті достатньо великі напруження (у нашому випадку температурні) – для повторного зародження тріщин. Тому, якщо такий процес повторюється часто, поглинається велика кількість енергії.

Підвищення температури призводить до накопичення деструктивних змін у структурі бетону до критичного рівня. Ці зміни являють собою результат комбінованого впливу термічних, вологісних і силових стимуляторів руйнування. При цьому зменшується опірність бетонів тріщиноутворенню, що відображається зниженням величини коефіцієнтів K_{IC} (рис. 3).

Обґрунтоване призначення коефіцієнтів K_{IC} залежно від температури, виду заповнювачів і їхньої концентрації дає змогу з більшою достовірністю визначати критерій крихкого руйнування бетону під час пожежі.

Порівняння розрахункового критерію крихкого руйнування важкого і легкого бетонів, обчисленого за формулою (4) із результатами натурних вогневих випробувань залізобетонних плит [4] показало, що за величиною критерію F можна прогнозувати можливість крихкого руйнування бетону конструкцій під час пожежі. За $F \leq 4$ бетон руйнуватися не буде і ніяких додаткових перевірок або заходів щодо захисту конструкцій не потрібно. За $F > 4$ можливе крихке руйнування і потрібні спеціальні заходи щодо захисту будівельних конструкцій. Ймовірність крихкого руйнування бетонів під час пожежі можна також оцінити на підставі середніх величин критичної вологості бетону за масою, знаючи достовірні умови експлуатації конструкцій. Так, для важкого

бетону з гранітним заповнювачем середня величина критичної вологості за даними експериментів становить 3 % легкого бетону з пористим заповнювачем – 5 %.

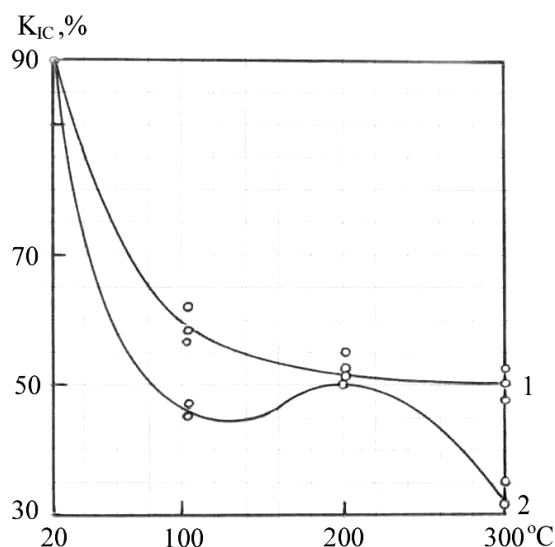


Рис. 3. Залежність відносної величини коефіцієнта інтенсивності напружень K_{IC} від температури: 1 – важкий бетон на гранітному заповнювачі; 2 – легкий бетон на пористому штучному заповнювачі (керамзиті)

Висновки. На підставі проведених досліджень коефіцієнта інтенсивності напружень K_{IC} зроблено такі висновки. За температури 20 °C значення K_{IC} переважно залежить від складу і міцності бетону. За збільшення водоцементного відношення і концентрації цементного тіста міцність і K_{IC} знижуються. За підвищення температури в усіх випадках спостерігається зниження K_{IC} , причому найбільше зниження спостерігається в інтервалі температур 20–105 °C, що свідчить про тенденцію бетонів до крихкого руйнування під час висихання. За нагрівання легкого бетону на пористому штучному заповнювачі рівномірного з важким спостерігається інтенсивніше зниження K_{IC} . Це свідчить про більш низьку опірність тріщиноутворенню такого бетону під час нагрівання. Із збільшенням концентрації заповнювача в бетоні ступінь неоднорідності його збільшується, що, з одного боку, призводить до зниження міцності, а з іншого, – до збільшення в'язкості руйнування матеріалу.

1. 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. 2. Милованов А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1986. – 224 С. 3. Рекомендации по защите бетонных и железобетонных конструкций от хрупкого разрушения при пожаре. – М.: НИИЖБ, 1979. – 22 С. 4. Орловский Ю.И., Шналь Т.Н., Соломонов В.В., Мантюренко А.В. Огнестойкость железобетонных плит, защищенных вспучивающимся покрытием // Бетон и железобетон. – 1998. – №3/4. – С. 4–7.