

## ПРОЦЕС УСАДКИ БЕТОНУ В УМОВАХ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР\*

*С. Бурченя, аспірант, І.Шмиг, аспірант  
Львівський державний аграрний університет*

**Ключові слова:** усадка бетону, температурна усадка, коефіцієнт лінійної усадки, критична вологість, температура.

**Key words:** concrete slump, temperature slump, linear shrinkage coefficient, critical humidity, temperature.

The article reveals analytical description of the process of concrete slump under conditions of increased temperatures.

**Постановка проблеми.** Під усадкою бетону розуміють довільне, не зумовлене зовнішнім навантаженням об'ємне скорочення бетону як під час зберігання на повітрі, так і під час нагрівання. Донині немає систематичного викладу основ застосування бетону в умовах підвищених температур, вкрай необхідного широкому колу будівельників. Причиною цього є відсутність єдиних поглядів на фізичну природу тужавіння бетону в різних умовах, частково за підвищених до 60-80°C температур [5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відомі теорії та гіпотези, які пояснюють природу і механізм усадки, умовно можна поділити на дві групи. За теорією професора А.С.Шейкіна, усадка бетону безпосередньо пов'язана з об'ємними змінами гелевої структури складової цементного каменю [8]. Інші дослідники (за Лапласом та Е.Фрейссіне) бетон розглядають як псевдотверде тіло з сіткою дуже маленьких пор, наповнених водою і повітрям. Науковці припускають, що усадка є наслідком всебічного стиску, спричиненого системою внутрішніх сил, зумовлених капілярним явищем. Ще Е.Фрейссіне [7] зазначав, що сили стягування окремих складових цементного каменю можуть сягати значних розмірів, здатних деформувати бетонний елемент.

У роботах В.В. Михайлова, В.Д. Харлаба і Л.А. Дулиной на основі математичного опису різних моделей доводиться дієздатність капілярних сил під час розвитку усадкових деформацій цементного каменю і бетону. Водночас Лерміт, торкаючись капілярної теорії усадки бетону, запропонованої Е.Фрейссіне, зазначає, що він "сам розробив аналогічну теорію, але це виявилось даремною роботою, оскільки точне випробовування, проведене з метою її перевірки, виявило її необґрунтованість"[9]. Александровський С.В. дослідив особливості усадки й набухання бетону і дійшов висновку, що загалом капілярна теорія сама по собі не може пояснити звичайно спостережувані великі значення деформацій бетону під час його висихання і зовсім непридатна для опису його деформацій набухання у воді. Автор пропонує оцінювати лише частку усадки бетону, пов'язану з капілярними явищами, а оскільки усадка бетону є наслідком зміни його вологомісткості, для розрахунку усадкових деформацій і напружень у бетоні необхідно володіти даними про залежність усадки бетону від зменшення його вологи [1].

Відомо, що капілярна усадка впливає на зміну розмірів дослідного зразка в умовах короткотривалого нагріву, проте, коли капілярний тиск сягає певного максимального значення, вона поступово знижується [9].

Вивчаючи усадкові деформації під час нагрівання бетону, І.Н. Заславський, Інгланд і Росс відзначили, що з ростом температури деформації усадки збільшуються. Так експериментально було встановлено, що за температур, вищих від 100°C, суттєво зростають деформації усадки [6].

---

\* Робота виконується під науковим керівництвом к.т.н., в.о. професора І.М. Добрянського.

В умовах підвищених температур усадка бетону суттєво змінюється від відносного складу заповнювача в бетоні. За Р.Лермітом, краще визначати усадку бетону ( $\varepsilon_y$ ) за значенням вільної усадки цементного каменю ( $\varepsilon_{ov}$ ) і відносним складом заповнювача в бетоні (V) [6]. Практично всі дослідники відзначали значну складність механізму усадки бетону.

**Постановка завдання.** Мета нашого теоретичного дослідження – визначити, яка з відомих гіпотез і методик найточніше може описати явище усадки бетонних елементів в умовах підвищених температур.

**Виклад основного матеріалу.** Вплив температури на ненавантажений бетон призводить до виникнення в ньому температурних деформацій і додаткового розвитку деформацій усадки. На думку А.Ф.Мілованова та К.Д.Некрасова [3], деформації усадки бетону за підвищених температур залежать в основному від кількості вологи, видаленої з бетону, і від температури випробовування. Температурні деформації залежать в основному від виду заповнювача, вологості бетону до моменту нагріву і від температури нагріву.

Усадка по перерізу дослідного зразка неоднакова через нерівномірне висихання. З ділянок бетону, розміщених ближче до поверхні, до моменту нагріву видаляється частина вільної води і вода макро- і мікрокапілярів, а також якась частина адсорбційно зв'язаної води. Коли починається інтенсивне виділення адсорбційно зв'язаної води, розвиваються деформації температурної усадки. Спершу після початку нагріву усадка тим більша, чим вища температура. Проте чим вища температура нагріву, тим швидше згасають деформації усадки [4].

Від властивостей цементного каменю проявляти усадкові деформації значною мірою залежить низка важливих характеристик – мікрощільність і стійкість у різному середовищі, міцність (особливо під час розтягу і згину), опір утворенню тріщин тощо. У статично невизначених конструкціях усадка є причиною розвитку в них значних зусиль ще до навантаження, а в елементах статично визначених конструкцій призводить до виникнення власних напружень. У результаті цього можуть виникати тріщини в місцях з'єднання елементів конструкції або в тілі бетону. Від усадкових деформацій значною мірою залежить і ефективність штучного створення початкових напружень у бетонних і залізобетонних конструкціях. На думку багатьох дослідників, вивчення явища усадки може дати ключ до вивчення фізичної природи та розробки числових моделей досить важливої властивості бетону і залізобетону – повзучості [8]. Якщо бетонний елемент нагрівається рівномірно по всьому об'єму і вільні температурні деформації, що при цьому виникають, нічим не обмежуються, то початкові температурні напруження не з'являються.

Коли ж нагрівання бетонного елемента відбувається нерівномірно або температурні деформації обмежені (закріплення елемента, що перешкоджає його пошкодженню, помітна різниця в коефіцієнтах лінійного розширення цементного каменю і заповнювача тощо), виникають температурні напруження, які за певних умов можуть спричиняти появу температурних тріщин у бетоні [2].

У роботі [1] подано методику визначення деформацій усадки бетону за нормальної температури, яка встановлює залежність між деформаціями усадки і вологи втратами бетону введенням коефіцієнта лінійної усадки  $\beta$ :

$$\varepsilon_y = \beta(U_{кр}^{bem} - U_0), \quad (1)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт лінійної усадки бетону  $\frac{мм/мм}{\%}$ ;

$U_0$  – відносна вологість бетону, яка відповідає моменту часу висихання, для якого визначається деформація усадки в  $\%$ ;

$U_{кр}^{бет}$  – відносна критична вологість бетону, починаючи з якої під час його висихання розвивається усадка, визначається за формулою (2) або дослідним шляхом в  $z/z$ .

$$U_{кр}^{бет} = \frac{U_{кр}^{цем.міста}}{1 + \Pi + \text{Щ}}, \quad (2)$$

Якщо початкова вологість бетону  $U_{поч}$  нижча від його критичної вологості під час усадки, замість формули (2) потрібно користуватися такою формулою:

$$\varepsilon_y = \beta(U_{поч} - U). \quad (3)$$

На всьому діапазоні підвищених температур залежність між коефіцієнтами лінійної усадки, температурою і вологістю бетону можна задовільно виразити формулою:

$$\beta(t, U) = \beta(20^\circ) \cdot \frac{1,37(t - 20^\circ)10^4 + 5,6 \cdot 10^{-2} \exp \left[ \frac{-2,5 \cdot 10^3 U}{(t - 20^\circ)} \right]}{1}, \quad (4)$$

де  $\beta(20^\circ)$  – коефіцієнт лінійної усадки за нормальної температури, який для тяжкого бетону беруть  $3 \cdot 10^{-2}$ ;

$U$  – вологість бетону за підвищеної температури  $t$ .

Формула (1) для підвищеної температури запишеться у вигляді:

$$\varepsilon_y[t, U(t)] = \sum_{U(20^\circ)}^{U(t)} \beta(t, U) \Delta U, \quad (5)$$

де  $U(20^\circ)$  – вологість бетону перед початком нагріву;

$\Delta U$  – зміна вологості на інтервалу часу дії температури  $t$ .

Деформації усадки за складніших температурних режимів, частково за поступово зростаючих, більші, ніж за ізотермічного температурного режиму для всіх температур випробовування, попри те, що вологовтрати бетону приблизно однакові для однієї і тієї ж температури. Це пояснюється зменшенням коефіцієнта лінійної усадки із зростанням температури, а також тим, що у разі поступового зростання режиму більша частина вологи із бетону виділяється за нижчих температур, ніж за ізотермічного режиму, тобто їй відповідає більша деформація усадки. Аналогічне становище спостерігається і на ступені піднімання температури від нормальної і до підвищеної: чим у більш ранньому віці бетону відбувається нагрівання, тим менші сумарні значення деформацій усадки.

Відносну деформацію усадки бетону за підвищених температур за довільний інтервал часу  $T$  з урахуванням модуля поверхні елемента необхідно визначати за формулою:

$$\varepsilon_y(t, T) = \varepsilon_y(t, T = \infty) [1 - \exp(-c)] \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( 0,3 - \frac{6}{25 + m^2} \right) (t - 20^\circ) 10^{-2} T \right] \right\}, \quad (6)$$

де  $c = 0,2m - 5 \cdot 10^{-3}(t - 50^\circ)$ ;  $m$  – модуль поверхні елемента,  $m^{-1}$ ;  $\varepsilon_y(t, T = \infty)$  – повна відносна деформація бетону за температури  $t$ , визначається за формулою:

$$\varepsilon_y(t, T = \infty) = [55 - 0,05(t - 50^\circ) + 0,0025(t - 50^\circ)^2] \cdot 10^{-5}. \quad (7)$$

Загальне значення деформацій ненавантаженого бетону (див. рис.) у разі дії підвищених температур охоплює три види деформацій – деформацію усадки, зворотні і незворотні температурні деформації, які визначають за формулою:

$$\varepsilon_\varepsilon = \varepsilon_\varepsilon^n(t) + \varepsilon_\varepsilon^0(t) - \varepsilon_y(t), \quad (8)$$

де  $\varepsilon_\varepsilon^n(t)$  і  $\varepsilon_\varepsilon^0(t)$  – відповідно незворотні й зворотні температурні деформації під час нагріву бетону до температури  $t$ , визначаються до відповідних умов згідно з методикою [3];

$\varepsilon_y(t)$  – деформації усадки бетону за підвищених температур.

За методикою ГОСТ 24544 – 81 “Бетони. Методи определения деформаций усадки и ползучести”, результати визначення деформацій температурної усадки під час короткочасного або довготривалого нагрівання оформляють у вигляді діаграми, на якій по осі абсцис відкладають температуру, а по осі ординат – значення температурної деформації під час першого, другого і третього нагрівання і охолодження. Під час першого нагрівання обчислюють температурну деформацію бетону  $\varepsilon_t$ , під час другого і третього нагрівання – деформацію температурного розширення  $\varepsilon_{pt}$ . Різниця деформації температурного розширення  $\varepsilon_{pt}$  і температурної деформації  $\varepsilon_t$  є деформацією температурної усадки  $\varepsilon_{уст}$  за короткочасного або довготривалого нагрівання.

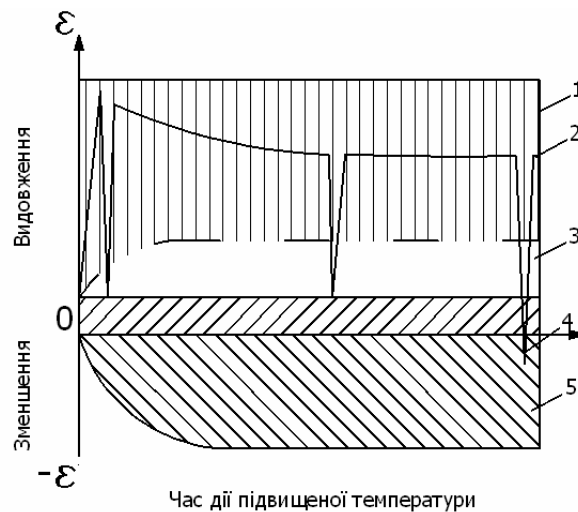


Рис. Компоненти температурно-усадкових деформацій бетону за підвищених температур: 1 – зворотні температурні деформації; 2 – узагальнена крива температурних деформацій; 3 – зменшення зворотних температурних деформацій, спричинене зниженням вологості бетону; 4 – незворотні температурні деформації; 5 – деформації усадки.

Відносну температурну деформацію бетону  $\varepsilon_t$  обчислюють за формулою:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{1t} - \varepsilon_g, \quad (9)$$

де  $\varepsilon_{1t}$  – виміряна відносна деформація у разі ввімкненої електропечі ненавантаженого зразка-близнюка під час нагріву за режимом, прийнятим для визначення  $\varepsilon_1(t)$ .

Деформації  $\varepsilon_1(t)$  і  $\varepsilon_{1t}$  слід приймати для однієї й тієї самої температури бетону, отриманої за показами термопар, встановлених у центрі зразка і на його поверхні.

$\varepsilon_g$  – відносна температурна деформація виносних подовжувачів під час нагрівання від початкової температури  $t_1$  до необхідної температури  $t_2$ , яку обчислюють за формулою:

$$\varepsilon_g = \alpha_{g2} t_2 - \alpha_{g1} t_1, \quad (10)$$

де  $\alpha_{g1}$ ,  $\alpha_{g2}$  – коефіцієнти температурного розширення подовжувачів відповідно за початкової температури  $t_1$  і необхідної температури  $t_2$ ; температуру  $t_2$  для подовжувачів із кварцового скла беруть рівною температурі робочого простору печі і для інвару – рівною температурі подовжувача.

Деформацію температурного розширення бетону обчислюють за СНиП 2.03.04 – 84 за формулою

$$\varepsilon_{pt} = (\alpha_{bt} + \alpha_{cs})t, \quad (11)$$

де  $\alpha_{bt}$  – коефіцієнт лінійної температурної деформації бетону залежно від температури і швидкості піднімання температури, необхідно брати за табл. 14 СНиП 2.03.04 – 84;  $\alpha_{cs}$  – коефіцієнт температурної усадки бетону, приймають за табл.15 СНиП 2.03.04 – 84.

**Висновки.** Запропонована методика розрахунку процесу усадки бетону в умовах підвищених температур має добру збіжність з експериментальними дослідженнями різних авторів.

#### **Бібліографічний список**

1. Александровский С.В. Некоторые особенности усадки бетона // Бетон и железобетон. – 1959. – №4. – С.169 – 174.
2. Голишев О.Б., Бамбура А.М. Курс лекцій з основ розрахунку будівельних конструкцій і з опору залізобетону. – К.: Логос, 2004. – С.141-142.
3. Кричевский А.П. Расчет железобетонных инженерных сооружений по температурным воздействиям. – М.: Стройиздат, 1984. – 149 с.
4. Милованов А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1986. – 222 с
5. Бетон в условиях повышенных температур / В.Н. Пунагин и др. – Днепропетровск: Арп – При,1999. – 292 с.
6. Некрасов К.Д. Тяжелый бетон в условиях повышенных температур. – М.: Стройиздат, 1972. – 128 с.
7. Фрейсине Э. Переворот в технике бетона. – М.: ОНТИ, 1968. – 192 с.
8. Шейкин А.Е. Структура и свойства цементных бетонов. – М.:Стройиздат,1979. – 344 с.
9. Цилосани З.Н. Усадка и ползучесть бетона. – Тбилиси, 1979. – С.89 – 90.