УДК 624.21.037

Ярослав Ковальчик
викладач кафедри архітектурних конструкцій НАОМА,

Людмила Левківська
кандидат технічних наук,
доцент кафедри архітектурних конструкцій НАОМА

Проблема термонапруженого стану в масивах бетону монолітних прогонових будов мостів

Анотація. Висвітлено проблему термонапруженого стану при будівництві монолітних попередньо напружених залізобетонних прогонових будов мостів. Пропонуються регулювання напружень, які виникають у процесі набуття міцності в масиві бетону.

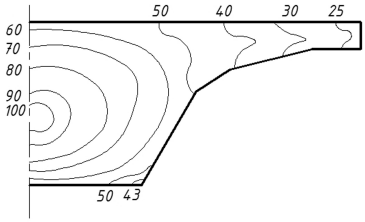
Ключові слова: монолітні прогонові будови мостів, термонапружений стан бетону, попередньо напружений залізобетон.

Постановка проблеми. Важливою умовою при зведенні транспортних споруд є забезпечення їхньої надійності та довговічності. Для залізобетонних конструкцій одним із визначальних факторів, який суттєво впливає на ці показники, є тріщиноутворення в бетоні. Наявність тріщин у бетоні конструкцій порушує їхню цілісність і впливає на напружено-деформований стан елементів, пришвидшує процеси деградації бетону, викликає корозію арматури в місцях утворення тріщин.

Проблема тріщиноутворення набуває особливого значення при виділенні тепла гідратації у великих масивах монолітного залізобетону. В мостобудуванні вона стосується не тільки масивів фундаментів та опор, але й монолітних прогонових будов, які віднедавна почали частіше споруджувати в Україні.

Аналіз останніх досліджень. Ще 1891 року І. Малюга [1] звернув увагу на те, що при твердненні цементного розчину відбувається виділення тепла. А. А. Байков [2] у 1906 році помітив, що різні за хімічним складом цементи мають різні характери температурних кривих, тобто процес хімічної реакції цементного в'яжучого з водою може відбуватися з різною швидкістю. Питання гідратації цементів та бетонів досліджували П. Н. Бондаренко, О. П. Мчедлов-Петросян [3], А. В. Ушеров-Маршак [4], К. Д. Некрасов [5], Коротин В. Н. [6]. Через різницю температури в перерізі бетону, який злегка схопився, виникають різні напруження, які навіть при невеликих його геометричних розмірах можуть спричинити тріщиноутворення.

Досвід будівництва монолітних прогонових мостів за кордоном свідчить, що проблема утворення тріщин



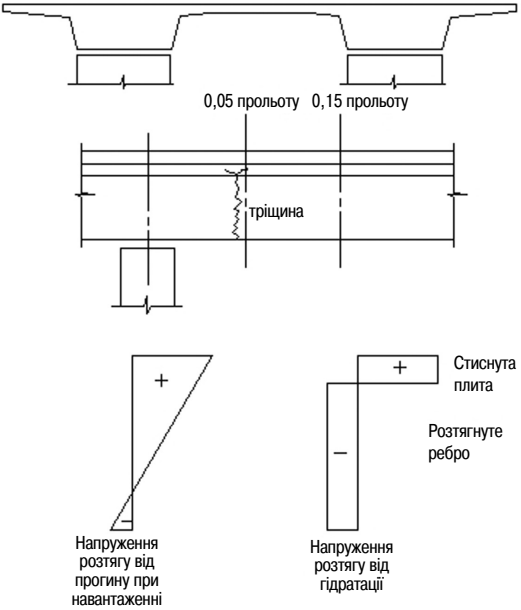
Іл. 1. Температурний градієнт перерізу прогонової будови на МКАДі при застиганні бетону

при влаштуванні цих конструкцій є актуальною. При спорудженні низки монолітних попередньо напружених прогонових будов у Росії після знімання опалубки були виявлені поперечні тріщини в плиті між ребрами і в консольній частині її [7]. Виникла потреба визначення причин і розробки необхідних заходів для попередження тріщиноутворення [8].

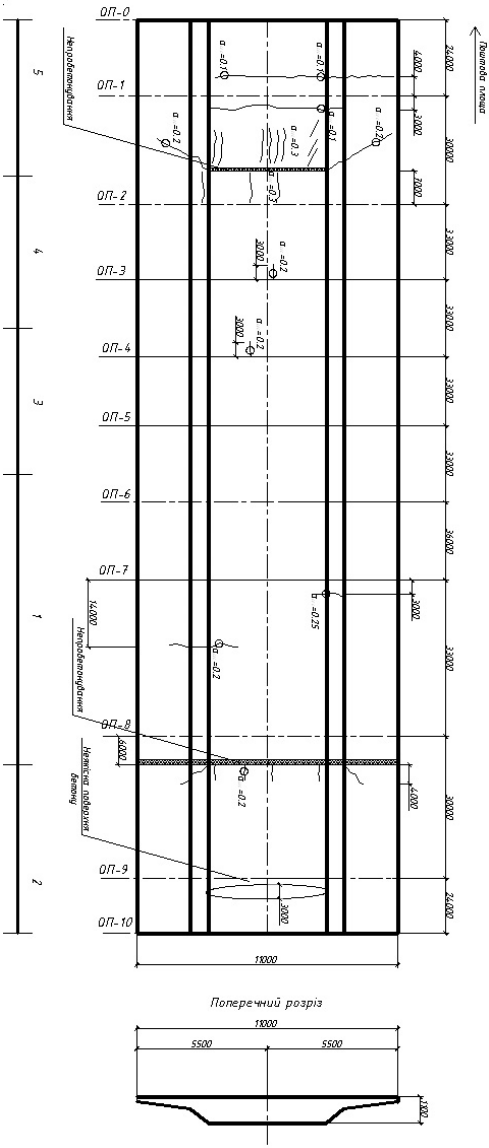
Відповідно до комп'ютерних розрахунків [9], бетон в одній з прогонових будов, зведених на МКАД (московська кільцева автомобільна дорога) в 1999 році, може досягати температури — 110°С в масиві ребра і мати значно меншу температуру 50°С–25°С на консолі (іл. 1).

Утворення тепла при гідратації супроводжувалося сильним розтріскуванням прогонової будови при будівництві в Англії [10]. Плита складається з двох широких попередньо напружених ребер заввишки 1,5 м, з'єднаних між собою тонкою залізобетонною плитою, з боковими консолями. При демонтажі опалубки були виявлені тріщини з шириною розкриття понад 1мм в 1/20-й довжини прольоту. Тріщини проходили крізь всю висоту ребра і закінчувалися на верхній плиті перерізу (іл. 2). В даному разі причиною появи тріщин в ребрах прогонової будови вважається виникнення значних напружень розтягування при гідратації бетону.

При обстеженні естакади з монолітною прогоновою будовою по вул. Набережно-Хрещатицькій в м. Києві були виявлені дефекти прогонової будови (іл. 3) [11], в тому числі осадочні тріщини з шириною розкриття 0,1–0,3 мм. Отже, в Україні проблема утворення тріщин при влаштуванні монолітних прогонових будов також є актуальною і потребує вирішення.



Іл. 2. Схема тріщиноутворення



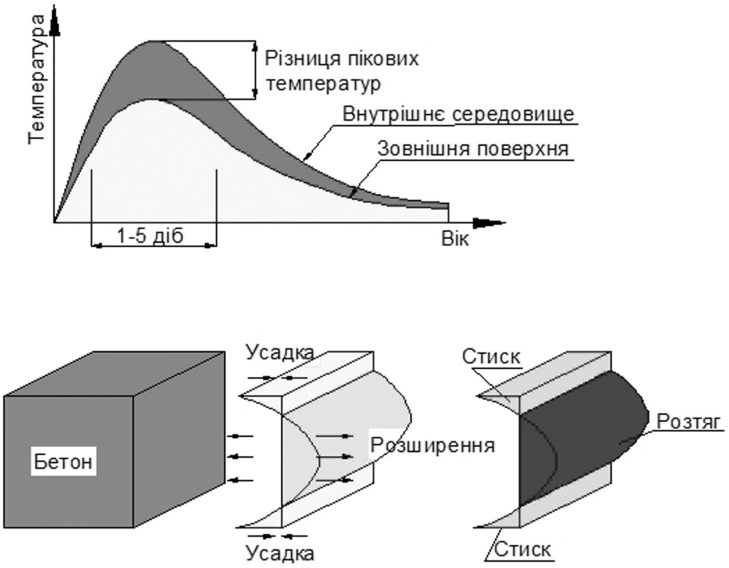
Іл. 3. Схема дефектів прогонової будови та її поділу на секції бетонування

Мета даної **роботи** — описати й проаналізувати процес тріщиноутворення при тужавінні бетону монолітних прогонових будов мостів, дати пропозиції з попередження тріщиноутворення в таких конструкціях.

Опис існуючої проблеми. На хімічному рівні тепловиділення залежить від мінерального складу цементу, його хімічного складу, витрати цементу на 1м³ бетону, від хімічних добавок, введених до бетонної суміші, початкової температури вкладеної суміші, температури бетону при вкладанні [6, 9, 12].

До технологічних причин виникнення тріщин належать: примикання структури нового бетону до старого, защемлення бетону нової конструкції в старому бетоні, обмеження в русі бетонної маси (опорні елементи, жорсткі з'єднання, перепад в геометричних розмірах та в плані масиву), наявність додаткових зовнішніх джерел тепла.

Виклад основного матеріалу. Нагрівання бетону відбувається в перші години і дні після його вкладання [1], як правило, упродовж 1–5 днів. Взаємодія цементного порошку з водою супроводжується виділенням тепла, яке при укладанні бетону великими масами може призвести до значного розігрівання бетону до 30–50°С, а іноді і більше, порівняно з температурою бетонної суміші при укладанні. Коли внутрішня температура укладеного бетону швидко



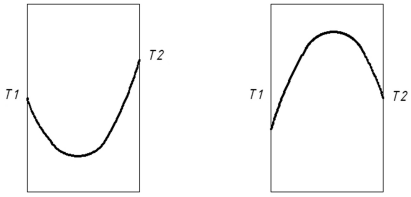
Іл. 4. Схема процесу тріщиноутворення при гідратації бетону

підвищується за рахунок тепла від гідратації, внутрішній об'єм його розширюється, але деформації бетонної поверхні малі за рахунок температури навколишнього середовища, як це показано на іл. 4. При наступному охолодженні зовнішні поверхні бетонних масивів вистигають швидше, ніж бетон всередині, і скорочуються в об'ємі — з'являються так звані температурні розтягуючі і стискаючі напруження, внаслідок чого виникають волосяні тріщини [5], які з часом можуть розширюватися і ставати осередками прогресуючої корозії бетону.

Температурними мікронапруженнями вважаються напруження, що виникають в бетоні внаслідок різниці коефіцієнтів температурного лінійного розширення і модулів пружності для крупного заповнювача і цементного розчину (мікронапруження першого роду), різниці коефіцієнтів температурного лінійного розширення і модулів пружності дрібного заповнювача і цементного каменю (мікронапруження другого роду), різниці коефіцієнтів температурного лінійного розширення і модулів пружності окремих кристалів цементного каменю (мікронапруження третього роду) [5].

Ці напруження впливають на величину допустимого розтягування бетону як матеріалу. Величина їх залежить від рівня температури, за якої створюється просторова кристалізаційна структура з гідросилікатів кальцію у тверднучому цементному камені в момент набору бетоном міцності 0,25...0,3 R28 [5].

При нагріванні конструкції зовні утворюється ввігнуте температурне

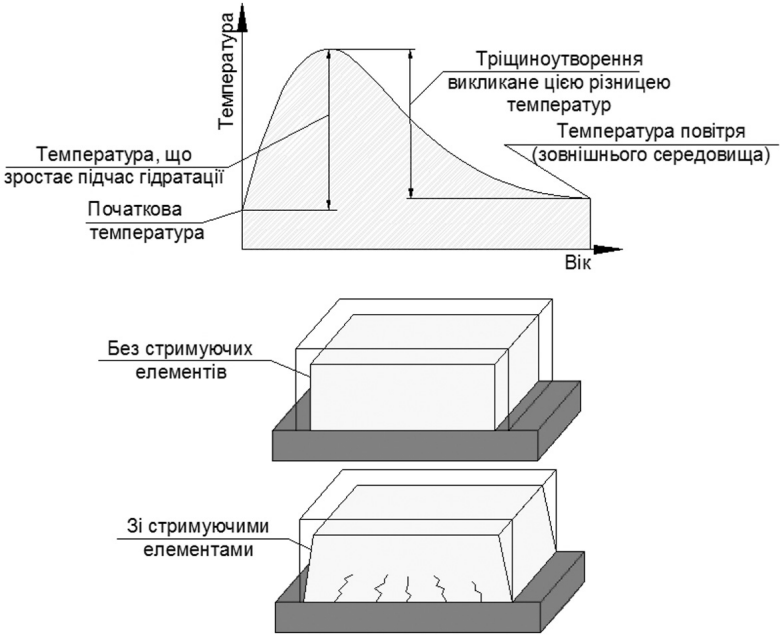


а *б*

Іл. 5. Температурна крива нульових напружень: *а* — ввігнута; *б* — вигнута

поле, або температурна крива нульових напружень. За такої кривої виникає власний несприятливий стан (іл. 5, а). Справа в тому, що при вирівнюванні температур по перерізу конструкції зовнішні розігріті шари будуть схильні до більших температурних деформацій, ніж внутрішні. Внутрішні шари перешкоджатимуть деформаціям зовнішніх, внаслідок чого при вирівнюванні температур по перерізу стінки зовнішні шари ставатимуть розтягнутими і менш тріщиностійкими, ніж внутрішні.

При внутрішньому розігріванні бетону за рахунок екзотермії цементу бетон у центральних шарах скоріше твердне і більше нагрівається (іл. 5, б). Надалі при вирівнюванні температур по перерізу стінки зовнішні шари деформуватимуться менше, ніж внутрішні, стаючи стиснутими і більш тріщиностійкими, ніж розтягнуті внутрішні. В такій конструкції з випуклою кривою нульових напружень утворюється сприятливий власний термонапружений стан, який підвищує тріщиностійкість стінки.



Іл. 6. Механізм тріщиноутворення внаслідок стримуючого фактора

Урахування цих особливостей і правильне використання їх дозволяє в ряді випадків суттєво збільшити задану величину допустимих температурних перепадів при вистиганні конструкції і цілеспрямовано досягти підвищення тріщиностійкості бетонних конструкцій.

Для визначення умовного формування власного термонапруженого стану в залізобетонних конструкціях потрібно проводити теплофізичні розрахунки тверднучого бетону за допомогою автоматизованих програм і будувати температурні поля нульових напружень.

На іл. 6 показаний найбільш поширений випадок тріщиноутворення при вистиганні масиву бетону після нагрівання, коли стримуючим фактором є структура прилягаючого старого бетону, який гальмує зсідання масиву бетону. Окрім цього, на площині стику укладеного масиву бетону із старим бетоном значно менший коефіцієнт конвекції, ніж на поверхневих площинах масиву (повітря, опалубка). Цей коефіцієнт змінює теплообмін між старим та новим бетоном.

У тонких бетонних конструкціях тепло гідратації швидко розсіюється і не спричиняє істотного розігрівання бетону.

Оскільки на більших відстанях виникають великі напруження, то при значних геометричних розмірах конструкції тепловиділення цементів у масивних спорудах є досить небажаним. Тобто на термонапружений стан у монолітних масивах впливають два взаємозалежних фактори: геометричні розміри й різниця температур у бетонній суміші при її укладанні. Регулювання цих факторів і точне розуміння температурних процесів у масиві дасть змогу ефективно контролювати температуру і, в кінцевому рахунку, економити час, зусилля, затрати та уникнути виникнення тріщин в бетоні.

Висновки. Для запобігання тріщиноутворення пропонується наступне.

1. Регулювання часу та швидкості тепловиділення складом бетону (цементом, його частки вмісту).

2. Регулювання геометричних характеристик перерізу конструкції та довжини стику із суміжними секціями; забезпечення плавності епюр розподілу середніх температур у зоні контакту суміжних елементів; раціональна розбивка на шари при бетонуванні.

3. Створення часткового напруження в конструкціях монолітних попередньо напружених прогонових будов.

4. Примусове охолодження через внутрішні та зовнішні трубопроводи.

5. Додавання конструктивної арматури часткою у 15 % довжини прольоту по обидва боки від опор та готових стикових секцій; на 0,15 % армування найбільш розтягнутої частини перерізу, або 0,6 % армування перерізу зовнішньої смуги на глибину 400 мм.

6. Укладати бетон класу В45 (на один-два класи вищий за прийнятий) в торцях прогонових будов на відстань 3–5 м.

1. *Малюга И. Г.* Свойства портландского цемента (и других гидравлических вяжущих) в применении его и испитании. — Инженерний журнал, 1891, № 9, с. 36–46.
2. *Байков А., Богданов Н.* Тепловые явления при схватывании и твердении портландцемента. — Цемент, 1906. — № 3–4. — с. 41–48; № 7–12, с. 98–105.

3. *Мчедлов-Петросян О. П., Бабушкин В. И.* Термодинамика и термохимия цемента. // Шестой международний конгрес по химии цемента. — М. : Стройиздат, 1976. — т. 2. — С. 6–16.
4. *Ушеров-Маршак А. В.* Калориметрия цемента и бетона. — Х. : Факт, 2002. — С. 184.
5. *Некрасов К. Д.* Тяжелый бетон в условиях повышенных температур. — М. : Стройиздат, 1972. — С. 20–24.
6. *Коротин В. Н.* Организация технологического обеспечения качества бетонных и арматурных работ при возведении монолитных железобетонных предварительно напряженных плитно-ребристых пролетных строений мостов: Автореф дис. канд. техн. наук: 05.02.22/ Междунар межакадем союз., М., 2005. — 58 с.
7. Отчет по результатам приемочного обследования и испытаний путепровода на 77 км МКАД (Бусиново). / Кришман Б. И., Сапронов И. М. НИЦ «Мосты» ОАО «ЦНИИС». — М., 1999.
8. *Соколов С. Б.* Методы предупреждения трещинообразования в железобетонных плитно-ребристых пролетных строениях мостов на стадии разогрева бетона от экзотермии цемента. — М., 2006. — 206 с.
9. *Соловьянчак А. Р., Шифрин С. А., Соколов С. Б.* Влияние температурного фактора на формирование потребительских свойств плитно-ребристых пролетных строений в период их возведения. // Научные труды ОАО «ЦНИИС». — Вып. № 217, 2003.
10. The Design of Prestressed Concrete Bridges. Concepts and principles. Robert Benaim, 2008. — 581 p.
11. *Коваль П. М., Сташук П. М., Ковальчик Я. І.* Дослідження тріщиностійкості монолітної попередньо напруженої естакади методом акустичної емісії // Зб. «Дороги і мости» Держдор НДІ ім. М. П. Шульгіна. — Вип. № 12. — К., 2010. — С. 56–62.
12. *Антонов Е. А.* Методика технологического регулирования термонапряженного состояния монолитных железобетонных транспортных сооружений: Дис. канд. техн. наук ОАО ЦНИИС. — 05.23.11. — М., 2005. — 229 с.

Проблема термонапряженного состояния в массивах бетона монолитных пролетных строений мостов

Ярослав Ковальчик, Людмила Левковская

Аннотация. Описана проблема термонапряженного состояния при строительстве монолитных предварительно напряженных железобетонных пролетных строений мостов. Указаны способы регулирования напряжений, возникающих при наборе прочности в массиве бетона.

Ключевые слова: монолитные пролетные строения мостов, термонапряженное состояние бетона, предварительно напряженный железобетон.

The problem of thermostress stain in concrete mass of monolithic bridge spans structures

Yaroslav Kovalchyk, Liudmyla Levkivska

Annotation. This paper describes the problem of thermo stress state at building of monolithic prestressed concrete spans of bridges. The methods of regulation stresses that occur in the recruitment strength in the array of concrete.

Keywords: monolithic bridges spans structure, thermal stress state of concrete, prestressed concrete.