

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.

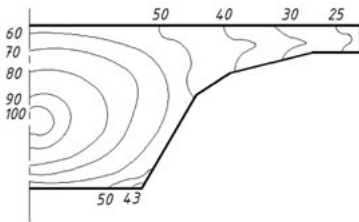
Ключові слова: монолітні прогонові будови мостів, термонапружений стан бетону, попередньо напружений залізобетон.

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. Малуґа [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 цементу мають різні характери температурних кривих, тобто процес хімічної реакції цементного в'язучого з водою може відбуватися з різною швидкістю. Питання гідратації цементів та бетонів досліджували П. Н. Бондаренко, О. П. Мchedлов-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

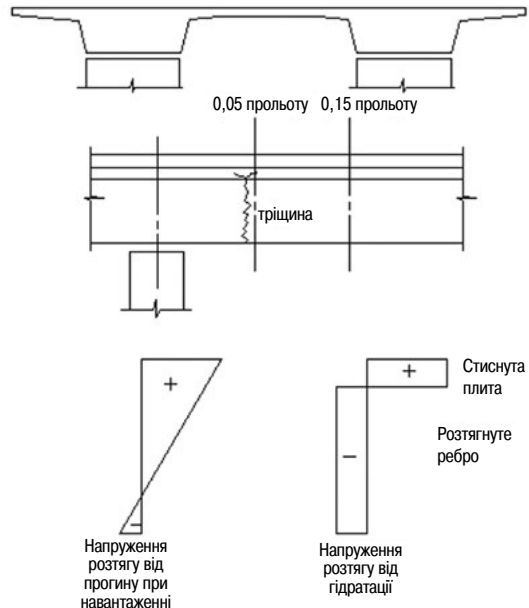
при влаштуванні цих конструкцій є актуальною. При спорудженні низки монолітних попередньо напружених прогонових будов у Росії після зняття опалубки були виявлені поперечні тріщини в плиті між ребрами і в консольній частині її [7]. Виникла потреба визначення причин і розробки необхідних заходів для попередження 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°C в масиві ребра і мати значно меншу температуру $50^{\circ}\text{C}-25^{\circ}\text{C}$ на консолі (іл. 1).

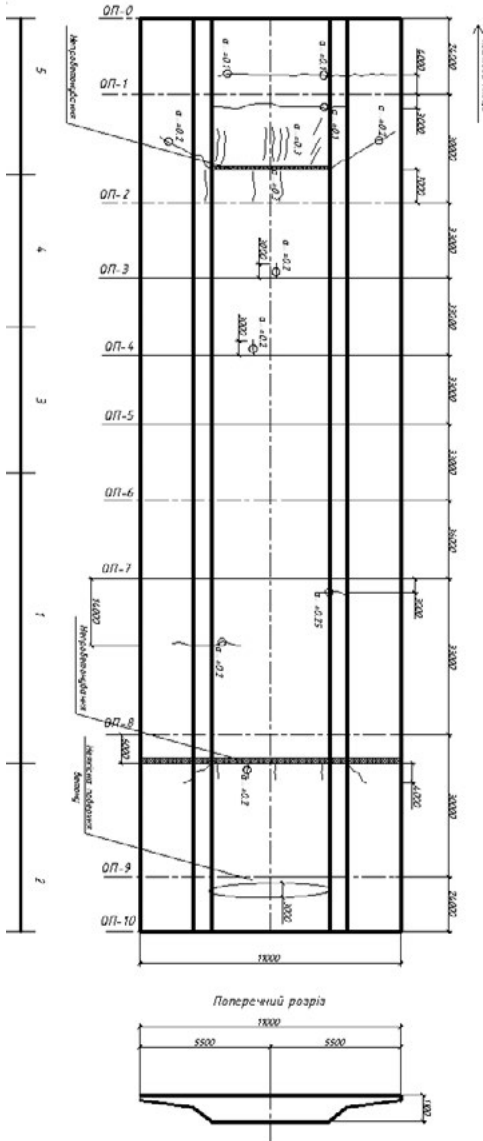
Утворення тепла при гідратації супроводжувалося сильним розтріскуванням прогонової будови при будівництві в Англії [10]. Плита складається з двох широких попередньо напружених ребер заввишки 1,5 м, з'єднаних між собою тонкою залізобетонною плитою, з боковими консолями. При демонтажі

опалубки були виявлені тріщини з шириною розкриття понад 1 мм 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 прогоною 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



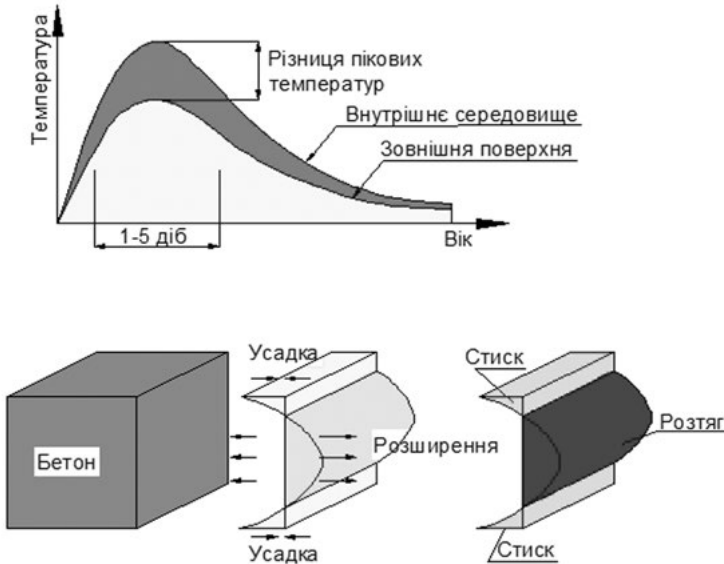
Лл. 3. Схема дефектів прогонової будови та її поділу на секції бетонування

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 тепловідлення 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 бетону, 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°C, 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

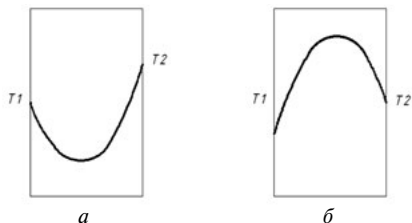
підвищується за рахунок тепла від гідратації, внутрішній об'єм його розширюється, але деформації бетонної поверхні малі за рахунок температури навколишнього середовища, як це показано на іл. 4. При наступному охолодженні зовнішні поверхні бетонних масивів вистигають швидше, ніж бетон всередині, і скорочуються 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 цемент-

ного 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 вигнуте температурне

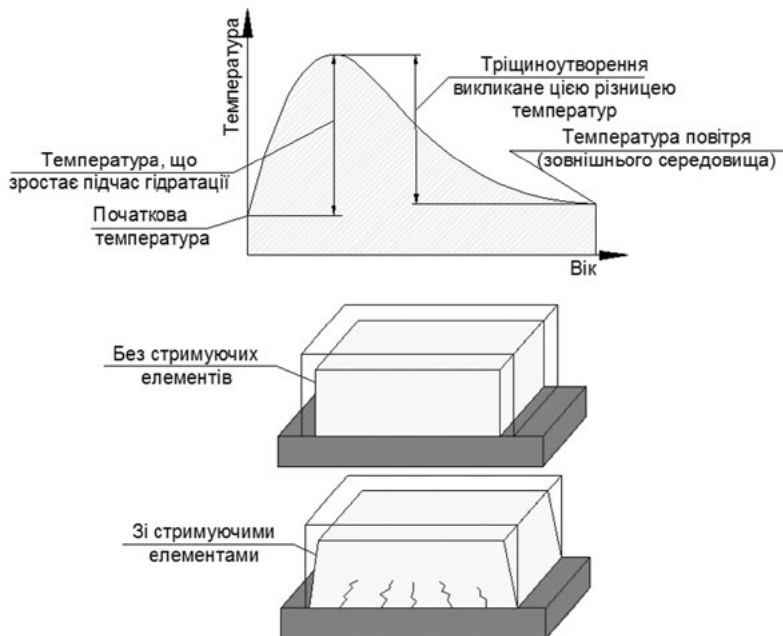


Іл. 5. Температурна крива нульових напружень: *a* — ввігнута; *б* — вигнута

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 деформуваватимуться 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 поргландского цемента (и других гидравлических вяжущих) в применении его и испитании. — Инженерный журнал, 1891, № 9, с. 36–46.
2. *Байков А., Богданов Н.* Тепловые явления при схватывании и твердении поргландце-мента. — 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 международный конгресс 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. *Соловьянчук 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.

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

Yaroslav Kovalchuk, Liudmyla Levkivs'ka

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.

Experience of monolithic span bridges abroad building shows that cracking problem of these structures constructing are relevant as they significantly affect on their endurance.

The problem of cracking acquires a special importance in the heat of hydration in large arrays of reinforced concrete. In bridge construction, it applies not only to arrays of foundations and supports, but also to the monolithic spans that have begun to build in Ukraine more recently.

The purpose of this paper is to describe and analyze the crack formation process during concrete monolithic spans bridges hardening and give proposals to warning crack formation in these structures.

At the chemical level heat generation depends on the mineral composition of cement, its chemical composition, cement consumption in 1m concrete, from chemical supplements introduced to the concrete mix, the initial temperature of the enclosed mixture, temperature at places.

Technological causes of cracks appearance include: adjacency structure of the new concrete to old, jamming concrete new construction in the old concrete, limiting movement in the concrete mass (supporting elements rigid connection to the geometric difference in terms of size and array), the availability of additional external sources heat.

Heating concrete occurs in the first 1–5 days. Interaction cement powder with water accompanied by heat, which at the conclusion of concrete large masses can cause significant heating in concrete, compared with the temperature of concrete mixture at the conclusion. When the internal temperature of concrete increases rapidly concluded by the heat of hydration, increasing its internal volume but small concrete surface deformation due to ambient temperature. In the subsequent cooling of the outer surface of the concrete arrays cools faster than the concrete inside, and reduced in volume there are so-called compressive and tensile thermal stresses, causing hair cracks that may eventually expand and become centers of progressive corrosion of concrete.

Considering the features of hardening concrete and proper use them in some cases allows to substantially increase the value of the specified allowable temperature differences during construction cooling and purposefully to reach increase of fracture toughness of concrete structures.

For determining the formation of its own thermostressed state in reinforced concrete structures necessary to conduct thermal calculations hardening concrete using automated software build and temperature fields zero stress.

Since there are large distances greater tension, then the significant geometrical dimensions of the design heat cements massive structures is quite undesirable. That is thermostressed state in monolithic arrays affecting two interrelated factors: the geometric dimensions and the temperature difference in a concrete mixture at its conclusion. Adjusting these factors and accurate understanding of thermal processes in the array will allow to effectively control temperature and, ultimately, save time, effort, costs and avoid cracks in the concrete.

To prevent cracking, the following chemical and technological solutions. Adjust the time and speed of heat dissipation of concrete. Adjusting the geometric characteristics of the design section and length of the junction adjacent sections. Creating a particular stress in the construction of monolithic prestressed spans. Forced cooling by internal and external pipelines. Adding structural reinforcement share of 15% span on both sides of the poles and finished butt sections; 0.15% reinforcement stretched most of the section, or 0.6% of foreign-section reinforcing strip to a depth of 400 mm. Laying concrete with one or two classes higher than accepted at the ends spans a distance of 3–5 meters.

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

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.