

І. Н. Дудар, д. т. н., проф.; В. Л. Дмитренко

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ОХОЛОДЖЕННЯ ВИРОБІВ ІЗ ВІБРОПРЕСОВАНОГО БЕТОНУ

В статті розглянуто особливості розподілу поля температури, тиску і вологомисткості по перерізу пластини з вібропресованого бетону (ВПБ) при односторонньому і двосторонньому охолодженні. Проведено аналіз особливостей напруженого стану тверднучого під тиском бетону в процесі охолодження з врахуванням виникаючих при цьому градієнтів температури, вологомисткості і тиску, а також через різницю деформаційних властивостей складових компонентів, викладено найбільш повні узагальнені критеріальні рівняння інтенсивності зниження температур і тисків при охолодженні виробів з вібропресованого бетону.

Ключові слова: вібропресований бетон, напружений стан, градієнт температури, рівняння інтенсивності зниження температур.

Інтенсифікація виробництва, забезпечення високого кругообігу прес-форм під час виробництва виробів з вібропресованих бетонів можливі лише за умови забезпечення мінімальної тривалості циклу теплової обробки, що включає періоди нагріву і охолодження. Зазвичай вироби з вібропресованого бетону твердіють в герметичних формах, що частково чи повністю виключає випаровування вологи з їхньої поверхні і сприяє більш повільному охолодженню бетону.

Розглянемо особливості розподілу поля температури, тиску і вологомисткості по перерізу пластини з вібропресованого бетону (ВПБ) при односторонньому і двосторонньому охолодженні. Стан, що характеризується перепадами температури Δt , вологості Δu і тиску Δp , покажемо для необмеженої пластини в середині періоду охолодження τ_{III} . Розподілу полів температур, вологомисткості і тисків, що викликають відповідні потоки рідкої фази в бетоні q_{mt} , q_{mu} , q_{mp} , які змушують масу внутрішньої вологи рухатися до поверхні виробу (рис. 1).

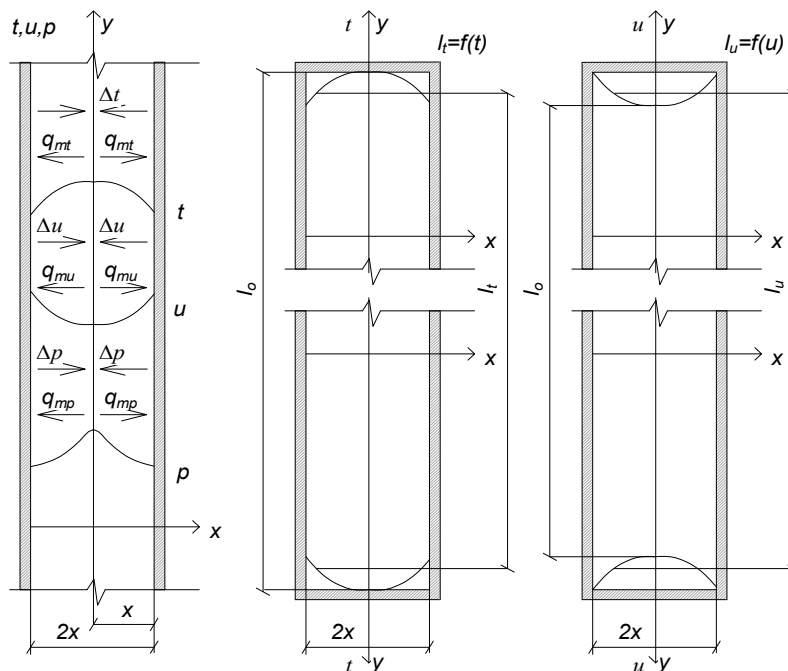


Рис. 1. Схеми полів температур, вологовмісту і тисків у період охолодження вібропресованого бетону

В силу зниження температури прес-форми і бетону пластинка намагається скоротитися по

поверхні на величину l_{iq} , а одночасно з цим під дією q_{mt} , що зумовлений градієнтом температури, підвищується вологомисткість поверхневого шару, що призводить до збільшення лінійних розмірів пластини на величину l_{uq} . Результируючу деформацію пластини можна виразити як $l_{об} = l_{iq} - l_{uq}$. Поверхневі шари бетону виробу витримують максимальні напруження від перепаду температури Δt і вологості ΔU , до яких додаються впливи від перепаду тиску, що зростають з ростом швидкості охолодження. При цьому температурні деформації металу форм при охолодженні виробів значно перевищують деформації бетону, оскільки охолодження виробів повільніше, ніж охолодження оснастки. Перепади температур між гарячим бетоном і прес-формою, що швидко охолоджується, можуть сягати 45...55 °С (рис. 2).

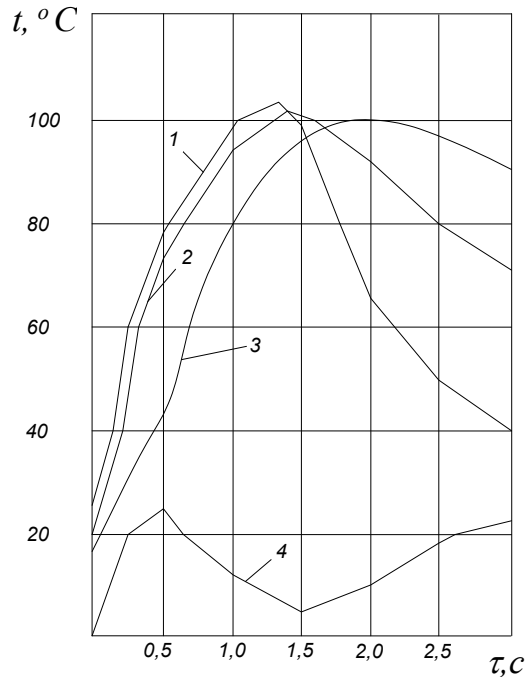


Рис. 2. Розподілення температур в період охолодження залізобетонної віброгідропресованої труби після двосторонньої термообробки в металевих ковпаках.

1, 2, 3 – температура зовнішньої форми, бетону в захисному і підарматурному шарах виробу відповідно, 4 – температура внутрішньої форми

З цієї причини на контакті бетону і форми виникають дотичні напруження, що обтискають виріб у процесі охолодження. Якщо форма має хоча б одну площину, що не щільно прилягає до виробу, то з її боку на поверхні бетону можуть виникати розтягуючі напруження внаслідок згину пластини під дією дотичних напружень з боку жорсткої форми (рис. 3).

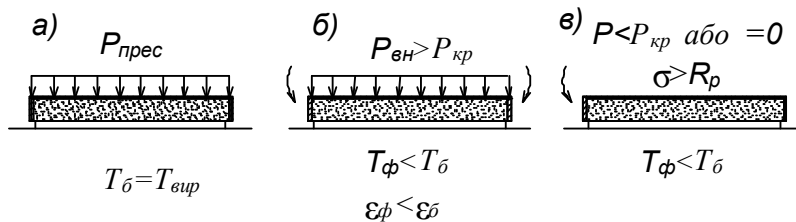


Рис. 3. Схеми взаємодії виробу з вібропресованого бетону з формою:

а) в період ізотермічного прогріву; б) при охолодженні під тиском; в) при охолодженні під тиском за відсутності зовнішнього впливу

Розглянемо вплив послідовності зняття тиску на напружений стан плоскої пластини. Припустимо, що на початку процесу охолодження тиск пресування зменшиться до
 Наукові праці ВНТУ, 2008, № 1

атмосферного за невеликий проміжок часу (0,10...0,15 год.), тоді у верхній зоні можуть виникнути розтягуючі зусилля, при цьому, якщо їх величина буде перевищувати гранично допустимі напруження на розрив R_p , на поверхні бетонної пластини утворюються мікротріщини.

У випадку охолодження в умовах збереження всебічного стискання, абсолютне значення якого достатнє для створення контрзусилля, здатного компенсувати вплив згинаючих зусиль, тріщиноутворення буде відсутнє. Критична величина тиску термонавантаження $P_{прес}^{крит}$ є функцією перепаду температур Δt , висоти виробу h , міцності бетону на розтяг R_p , теплофізичних властивостей бетону і форми, а також її конструкції:

$$P_{прес}^{крит} = \int (\Delta t_{ф.б.}, R_p^{\delta}, h, \alpha_{ф}, \alpha_{б} \dots).$$

З іншого боку, в процесі охолодження бетону, нагрітого під тиском до температур більше 100°C, при різкому зменшенні тиску пресування можливе явище „закипання” незв’язаної рідини внаслідок її перегріву, що, як відомо, сприятиме утворенню направленої пористості і погіршенню структури бетону. Умови, за яких неможливе явище перегріву рідкої фази, тобто вона не може опинитися у стані „закипання”, в будь-який момент часу можна записати у вигляді:

$$\bar{t}_{б}^{-i} \leq 100 \sqrt[4]{P_{прес}^t} - \Delta t_{зан}; \tag{1}$$

$$P_{прес}^t \leq \left(\frac{\bar{t}_{б}^{-i}}{100} \right) + \Delta P_{зан}, \tag{2}$$

де $P_{прес}^t$ – зовнішній тиск на поверхню бетону при його охолодженні в будь-який момент, $\times 10^{-1}$ МПа; $\bar{t}_{б}^{-i}$ – середня температура бетону по розрізу виробу, °C; $\Delta t_{зан}$ – безпечне зниження температури нижче точки насичення, зумовлене перепадами температури у виробі; $\Delta P_{зан}$ – підвищення тиску вище тиску насичення, зумовлене нерівномірністю розподілення тиску і температур.

Величини $\Delta t_{зан}$ і $\Delta P_{зан}$ враховують градієнти температур і тисків по розрізу і слугують ніби додатковим фактором, що видаляє можливе локальне пароутворення в точках виробу, де спостерігається максимальна температура. Необхідна величина додаткового тиску при градієнті температури по розрізу не більше 10°C в залежності від максимальної температури прогріву бетону (від 100 до 200°C) змінюється в межах 0,04...0,428 МПа (табл. 1).

За загальноприйнятою думкою, у затверділому бетоні існує внутрішнє поле напруження, зумовлене усадкою, неоднорідністю в об’ємі вологості, температури і тиску [1]. За даними робіт на давачах, що розміщені в цементному тісті після тверднення, впродовж трьох діб за нормальних умов зафіксовані стискаючі напруження величиною 2,0...3,0 МПа. При твердненні бетону в процесі теплової обробки в середовищі з 100%-ою вологістю не встановлено наявності стискаючих напруг на заповнювачі-давачеві [2]. У пресованих бетонах, що твердіють під тиском, за даними роботи [3], повинні існувати обтискаючі заповнювачі напруги, теоретична величина яких сягає 3,0...4,0 МПа (в залежності від виду заповнювача, його деформаційних властивостей і тиску пресування).

Однак результати експериментальних досліджень, проведених останнім часом, не підтвердили існування обтискаючих заповнювачів напруг ні при усадці, ні при дії зовнішнього пресуючого тиску величиною 2,0 МПа і більше після тверднення бетону впродовж 18...21 доби [4]. На думку авторів роботи [4], пояснюється це явище наявністю контракції цементного каменю в процесі його тверднення, ця контракція знімає зовнішній тиск на заповнювач до кінця процесу формування структури бетону.

Таблиця 1

Залежність величини тиску пресування від середньої температури бетону і перепаду температур у виробі

Середня температура бетону $T_b, ^\circ\text{C}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Необхідна величина тиску $P_{прес} \times 10^{-1}$ МПа	1,42	2,02	2,78	3,77	5,00	6,48	8,3	10,46	13,02	16,03	19,83
Тиск насиченого пару $P_n \times 10^{-1}$ МПа	1,01	1,43	1,98	2,70	3,61	4,76	6,18	7,92	10,03	12,55	15,55
Величина додаткового тиску через перепади температур $(T_\delta - T) = 10^\circ\text{C}$	0,41	0,55	0,80	1,07	1,39	1,72	2,12	2,54	3,00	3,48	4,28

Розглянемо тепер фізичні явища, що виникають при охолодженні виробу із вібропресованого бетону. Так при зниженні тиску пресування на величину ΔP за час Δt в порах бетону знижується щільність пари, а це в свою чергу супроводжується виникненням додаткової кількості насиченої пари, $\Delta G = \Pi_{ce} \partial''_t / \partial t$. В результаті цього в порах шару бетону виробу виникнуть надлишкові тиски, що дорівнюють $dP \Delta x / dx$, які будуть намагатися відірвати цей шар плити від її поверхні, що призведе до виникнення напружень розтягнення з боку вільної поверхні. Для визначення величини зусиль розтягнення від дії надлишкового тиску автор роботи [2] пропонує використовувати залежність:

$$d\tau_p = \frac{\bar{\Pi}_{ce} dP \Delta x}{100 dx}, \tag{3}$$

де $\bar{\Pi}_{ce}$ – об'єм вільних пор в бетоні; Δx – товщина шару плити, що розглядається; $\frac{dP}{dx}$ – градієнт тиску по товщині плити.

Допустимий перепад тиску по розрізу плити можна визначити за умови, що величина внутрішніх напружень розтягнення в будь-якій точці розрізу буде менша межі міцності бетону на розтяг $R_p^{(x)}$:

$$\Delta P_{дон} = \frac{100 R_p^{(x)} K_{дон}^{-1}}{\bar{\Pi}_{ce}}. \tag{4}$$

Якщо у вираз (4) підставити значення всіх змінних, величина допустимих перепадів тиску, викликана впливом додаткового пароутворення для вібропресованого бетону з міцністю на стискання (після теплової обробки) 20,0...40,0 МПа, буде складати 1,02...2,0 МПа.

Як відомо, в процесі охолодження залізобетонних виробів виникають істотні перепади температур по розрізу. Допустиму величину напружень в бетоні, що викликані градієнтом температури можна визначити за такою аналітичною залежністю:

$$\sigma_{x(t)} = \frac{\alpha(\bar{t} - t_{(x,\tau)}) \bar{E}}{1 - \mu} \leq R_p^{(x)} K_3^{-1}, \tag{5}$$

тут α – коефіцієнт температурного розширення бетону; \bar{t} – середня температура бетону по розрізу; $t_{(x,\tau)}$ – температура в шарі в момент часу τ ; \bar{E} – середнє значення модуля деформації по розрізу; μ – коефіцієнт Пуассона бетону; K_3 – коефіцієнт запасу.

Якщо підставити початкові дані для віброгідропресованого бетону, можна визначити значення допустимого перепаду температур по розрізу виробу:

$$\Delta t_{\max} = \bar{t} - t_{(x,\tau)} = \frac{R_p(1-\mu)}{E\alpha} = \frac{1,5 \cdot 10^{-4}(1-0,2)}{1 \cdot 10^{-2}} \approx 12^\circ C, \quad (6)$$

де R_p/E – відношення, що приймають рівним максимальній розтяжності віброгідропресованого бетону, яке знаходиться в межах $1,5 \cdot 10^{-4}$; μ – значенням коефіцієнта Пуассона задаємося в межах 0,2.

Виходячи з даної умови, можна обчислити допустимий перепад тиску по розрізу виробу, який у цьому випадку не буде перевищувати $0,5 \cdot 10^{-1}$ МПа. При цьому перепад температури по розрізу викликає напруження розтягу по поверхні плити, а перепад тиску – в перпендикулярній площині по товщині виробу.

Напруження у ВПБ, зумовлені градієнтом вологомісткості, по розрізу виробу можна визначити за формулою:

$$\sigma_{x(u)} = \varepsilon_{x(u)} E = \frac{\beta_y (U_x - \bar{U})}{1-\mu} E \leq R_p^{(x)} K_3^{-1}, \quad (7)$$

тут β_y – коефіцієнт лінійної усадки бетону, який дорівнює приблизно $\beta_y = 3 \cdot 10^{-1} \frac{мм/мм}{z/z}$; U_x, \bar{U} – вологомісткість бетону в шарі x і середня вологомісткість по розрізу.

Допустимий перепад вологомісткості по розрізу не повинен перевищувати величини ΔU_{\max} :

$$\Delta U_{\max} = \frac{(1-\mu)R_p^{(x)}}{E\beta_y} = \frac{1,5 \cdot 10^{-4}(1-0,2)}{3 \cdot 10^{-2}} = 0,4 \cdot 10^{-2} \frac{z/z}{мм/мм}. \quad (8)$$

В результаті проведеного аналізу особливостей напруженого стану тверднучого під тиском бетону в процесі охолодження з врахуванням виникаючих при цьому градієнтів температури, вологомісткості і тиску, а також через різницю деформаційних властивостей складових компонентів стало можливим отримати найбільш повні узагальнені критеріальні рівняння інтенсивності зниження температур і тисків при охолодженні виробів з вібропресованого бетону:

$$R_p^{(x)} \geq K_3 \left\{ \frac{\Pi_{ce}}{100} \Delta P_{(x,\Delta)} + \frac{E}{1-\mu} [\alpha(\bar{t} - t_{(x,\tau)} + \beta_y (U_x - \bar{U}))] + \sigma_p^{poz} - \right\}, \quad (9)$$

$$t_6^{max} \leq 100^4 \sqrt{P_{\max}^t} - \Delta t_3^{t_{max}}. \quad (10)$$

Отже, при вирішенні задач оптимізації режимів охолодження вібропресованих бетонів у відповідності з рівняннями (9), (10) потрібно виходити з умови, що сума внутрішніх власних напружень в будь-якому розрізі виробу від перепадів тиску, температур, вологомісткості і від зниження тиску при розпресовці σ_p^{poz} , помножена на коефіцієнт запасу, не перевищувала перепаду межі міцності бетону на розтяг, а максимальна температура була нижчою температури насичення, що відповідає кінцевому тиску розпресовки, і зменшена на величину перепаду температур по розрізу виробу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Горчаков Г.И., Оrentлихер Л.П., Савин В.И. и др. Состав, структура и свойства цементных бетонов. – М.: Стройиздат, 1976. – 144 с.
2. Счастный А.Н. Оптимизация тепловой обработки изделий из цементных и силикатных бетонов: Автореф.

дис. кандидата тех. наук / ВЗИСИ. – М., 1979. – 35 с.

3. Мурашкин Г.В., Бутенко С.А., Сеськин И.Е. Начальное напряжённое состояние бетона, твердеющего под давлением, по анализу двухкомпонентной модели // Совершенствование методов расчёта и исследование новых типов железобетонных конструкций. – Л.: ЛИСИ, 1981. – С. 92 – 98.

4. Булатов А. И., Видовский А. Л. Обжатие цементным камнем заполнителей в бетоне // Бетон и железобетон. – 1985. – №3. – С. 24 – 26.

5. Требухин А.Ф. Исследование режимов охлаждения при производстве железобетонных конструкций: Автореф. дис. кандидата тех. наук / ВЗИСИ. – М., 1975. – 24 с.

Дудар Ігор Никифорович – завідувач кафедри містобудування та архітектури;

Дмитренко Вікторія Леонідівна – аспірант кафедри містобудування та архітектури.
Вінницький національний технічний університет