

УДК 691.32:624.012.44.042

Д. В. РУДЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Міське будівництво та господарство», Запорізька державна інженерна академія, пр. Соборний, 226, Запоріжжя, Україна, 69006, тел. + 38 (098) 214 04 85, ел. пошта [veberc@ukr.net](mailto:veberc@ukr.net), ORCID 0000-0003-0827-042X

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ МОДИФІКОВАНОГО МОНОЛІТНОГО БЕТОНУ

**Мета.** Стаття присвячена дослідженню напруженого стану модифікованого монолітного бетону природного тверднення. **Методика.** Для досягнення поставленої мети проведені дослідження мікроструктури дисперсно модифікованої цементної матриці бетону, механізму структуроутворення модифікованого бетону природного тверднення; визначені методи надійної оцінки деформативних властивостей бетону. **Результати.** Розвиток внутрішніх напружень по-різному впливає на властивості бетону. При наростанні температурно-усадкових деформацій у часі і, отже, при збільшенні структурних напружень у цементній оболонці навколо зерен заповнювача можуть розвиватися два протилежних процеси: зона пластичного плину або зона тріщин. **Наукова новизна.** Встановлено, що комплекс структурних особливостей модифікованого бетону при передачі навантаження призводить до формування широкої зони передруйнування, здатної поглинати значний об'єм пружної енергії деформації, що забезпечує отримання проектних деформативних властивостей бетону спеціального призначення. Отримали подальший розвиток уявлення про визначення критерію тріщиноутворення модифікованого бетону, що твердне в природних умовах. **Практична значимість.** Отримані рівняння дозволяють вирішити питання про мінімальний рівень структурних напружень у монолітному бетоні при певному насиченні його крупним заповнювачем, а також оцінити вплив структурних напружень на властивості бетону. У звичайних бетонів з відносно тонкою цементною оболонкою при температурно-усадкових деформаціях виникають високі тангенціальні та невеликі радіальні напруження. У природних умовах ці напруження вище в результаті підвищення значень  $\Delta\epsilon(\tau)$ , чого не спостерігається у модифікованих бетонів. У модифікованих бетонах найбільшу небезпеку для структури представляють лише тангенціальні напруження. Зміна усадкових напружень у часі має однозначний характер. Сумарні температурно-усадкові деформації мають пилкоподібний графік. Для модифікованого бетону амплітуда коливань на 48...53 % менше. Це дозволить вирішити ряд технологічних завдань при зведенні монолітних будівель.

**Ключові слова:** модифікований бетон; монолітний бетон; напружений стан; деформативні характеристики

### Вступ

Сучасний рівень розвитку будівництва вимагає подальшого розвитку концепції бетонів нового покоління, які необхідні для сприйняття зростаючих впливів природного і техногенного характеру, а також для особливих умов експлуатації [8, 9, 17].

Отримання бетонів нового покоління з високими експлуатаційними властивостями (ВЕВ) має забезпечуватися технологією, заснованою на використанні існуючої виробничої бази і традиційних матеріалів. Такі бетони повинні мати міцність класу В 70 і вище, підвищену щільність і довговічність, зберігаючи всі переваги, які зробили їх основним конструкційним матеріалом будівництва. Удосконалена технологія вимагає

якісно нового підходу, здатного забезпечити повну реалізацію в'язучих властивостей цементу і потенційний запас міцності бетону [20, 21].

У природних умовах у результаті нерівномірного нагрівання (охолодження) або висихання (зволоження) по перерізу бетонних конструкцій виникає температурно-вологісний градієнт і, отже, власні напруження, урівноважені в об'ємі всієї конструкції. Якісно інші внутрішні напруження – структурні – викликаються температурно-вологісними деформаціями в анізотропній структурі бетону. Аналіз структурних напружень бетону показав, що величина їх значна і часто переважає границю міцності матеріалу [13, 16]. Структурні напруження врівноважуються в зоні зерен заповнювача [10–12].

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Субмікроструктурні напруження виникають у цементній матриці бетону при розвитку кристалогідратних новоутворень [7, 22]. Дослідження цих напружень значно ускладнені, тому що вони урівноважені в мікроскопічних об'ємах цементної матриці бетону. Розвиток мікротріщин кристалізації в бетоні не спостерігається. Це, вочевидь, можна пояснити капілярно-пористою будовою цементної матриці. Більш того, існує думка [15, 17] про корисність напружень кристалізації, що поліпшують міцність спайки спонтанно зростаючих новоутворень. Очікувати різких відмінностей напруженого стану твердучого гелю в різних умовах не доводиться через можливості релаксації напружень при деформації пор матеріалу [18].

Ще у 1980 р. Т. Гансен [3] встановив, що перші тріщини в бетоні з'являються у віці декількох діб, у той час як теоретичний період тріщиноутворення повинен був становити 5 тижнів. У цьому ж огляді було встановлено, що утворення тріщин залежить не тільки від величини усадки, але і від фізико-механічних властивостей бетону. Тріщиностійкість у більшій мірі визначалася природою заповнювача. Заповнювачі великої пружності сприяли розвитку тріщиноутворення. За даними [4, 5] розтягуючі напруження в бетоні від усадки цементного каменю становлять 4,0...5,0 МПа. Величина цих напружень, обчислена авторами [14, 23], становить 12–16 МПа, тобто перевищує міцність матеріалу на розтяг. О.Я. Берг [2], який також досліджував усадкові напруження, встановив, що усадка, ідентична охолодженню бетону на 70 °С, викликає напруження, близькі до вказаних.

У монолітному бетоні природного тверднення важливу роль відіграють два види власних напружень:

а) напруження першого роду від градієнтів температурно-вологісних деформацій по перерізу елементів характеризуються певною орієнтацією залежно від геометричних обрисів конструкцій [1, 6]. Напруження першого роду часто називають механічними, оскільки вони визначаються методами теорії пружності;

б) структурні напруження другого роду від температурно-вологісних деформацій в анізотропній структурі бетону [1, 6]. Напруження другого роду певним чином орієнтовані

відносно поверхні частинок заповнювача. Для їх визначення, крім теорії пружності і пластичності, необхідний також аналіз структури матеріалу.

Вочевидь, що поля цих напружень дуже різні, але безсумнівне їх взаємне накладення і спільний вплив на суцільність конструкцій і релаксацію напружень у часі. Міцність і деформативність бетону залежать в основному від напружень першого і другого роду, тому критерій тріщиноутворення бетону необхідно визначати від їх спільної дії з урахуванням віку матеріалу і зони конструкції [3]. Більш того, при розгляді пружної задачі розвитку тріщиноутворення в бетонних елементах вважається справедливою аддитивність напружень першого і другого роду.

Як відомо, бетон є пружно-пластичним матеріалом [4, 5], і ця передумова справедлива лише частково. У будь-якому випадку, у виникненні тріщин велику роль відіграють пластичні властивості бетону. У зв'язку з поступовою зміною в часі вологісні деформації розвиваються монотонно. Через їх тривалий розвиток напруження, які викликаються ними, значно релаксують у часі [2]. Таким чином, прояв пластичних властивостей бетону тут найповніший.

### Мета

Метою роботи є дослідження напруженого стану модифікованого монолітного бетону природного тверднення. Завдання дослідження полягає в запобіганні виникненню технологічних тріщин в конструкціях від температурно-усадкових деформацій бетону в процесі його тверднення.

### Методика

Для досягнення поставленої мети виконані дослідження формування мікроструктури модифікованої цементної матриці бетону з визначенням механізму зниження тріщиноутворення; визначені методи надійної оцінки деформативних характеристик бетону.

### Результати

Розвиток внутрішніх напружень по-різному впливає на властивості бетону. При наростанні температурно-усадкових деформацій у часі

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

і, отже, при збільшенні структурних напружень у цементній оболонці навколо зерен заповнювача можуть розвиватися два протилежних процеси: зона пластичного плину або зона тріщин.

Можливість будь-якого з процесів залежить від міцності і пружних характеристик матеріалу. Використовуючи теорію міцності матеріалу [3–5], умова утворення пластичної зони навколо зерна заповнювача запишеться у вигляді

$$\tau_{\max} = \frac{V \cdot \Delta E(t)}{\frac{1+V}{K_1} + \frac{1-V}{K_2}} \leq \frac{k_{nn} R_t}{2}. \quad (1)$$

Умову початку утворення зони тріщин запишемо, використовуючи залежність Фере для міцності бетону на розтяг [2]

$$\sigma_T^{\max} = \frac{(1+2V) \cdot 0,5 \cdot \Delta E(t)}{\frac{1+V}{K_1} + \frac{1-V}{K_2}} = \frac{1}{2} \sqrt[3]{R_t^2}. \quad (2)$$

Звідси виразимо залежність  $\Delta E$ :

а) з умови утворення пластичної зони –

$$\Delta E_{nn} = \frac{k_{nn} \cdot R_t}{2V} \cdot \left( \frac{1+V}{K_1} + \frac{1-V}{K_2} \right); \quad (3)$$

б) з умови утворення зони тріщин –

$$\Delta E_{mp} = \sqrt[3]{R_t^2} \left( \frac{\varphi}{K_1} + \frac{\xi}{K_2} \right). \quad (4)$$

Вочевидь, для позитивних температур граничні деформації тріщиноутворення завжди значно менше деформацій пластичного плину. В області нереальних складів бетону при  $V > 0,8$  можливий прояв пластичного плину при низьких значеннях  $R/K$ , тому в подальшому слід розглядати лише умову тріщиноутворення як найбільш ймовірний наслідок об'ємних деформацій бетону.

Рівняння рівноваги для сферичного елемента, виділеного з оболонки навколо заповнювача, має вигляд [5]

$$2 \cdot (\sigma_p - \sigma_T) + r \frac{d\sigma_p}{dr} = 0 \quad (5)$$

де  $r$  – радіус оболонки елемента.

Для зони тріщин при  $\sigma_T = 0$  після розділення змінних воно набуде вигляду

$$\frac{d\sigma_p}{\sigma_p} = -2 \frac{dr}{r} \quad (6)$$

Інтегруючи одержане рівняння у межах  $a \leq r \leq r_T$ , де  $r_T$  – радіус зони тріщин, знайдемо

$\ln \sigma_p = -2 \ln r + \ln H$ . Звідси  $\sigma_p = \frac{H}{r^2}$ . Використовуючи граничні умови, визначимо довільну постійну інтегрування при  $r = a$ ,  $\sigma_p = \sigma_{pa}$ .

Звідси, враховуючи  $a = \frac{d}{2}$ ;  $H = \frac{\sigma_{pa} \cdot d^2}{4}$ , оста-

точно  $\sigma_r = \sigma_{pa} \frac{d^2}{4r^2}$ . Рівняння справедливе лише у межах зони тріщин.

Радіальні напруження на межі пружної зони і зони тріщин рівні між собою, а тангенціальні напруження при  $r = r_T$  у границі рівні міцності матеріалу на розтяг у даний момент часу  $t$ :  $\sigma_T(t) = R_p(t)$ . З цієї умови можна визначити радіус зони тріщин

$$\sigma_t(\tau) = \frac{V \cdot \left( 1 + 2 \frac{r_T^3}{\eta^3 d^3} \right) \Delta E(t)}{2 \frac{r_T^3}{\eta^3 d^3} \left( \frac{1+V}{K_1} + \frac{1-V}{K_2} \right) \times (1 + 0,5 \varphi_t)} = R_p. \quad (7)$$

Тут прийнято  $b = \eta \cdot d$ . При цьому коефіцієнт  $\eta$  може бути визначений за величиною відносного вмісту заповнювача в одиниці об'єму бетону  $V$ :  $\eta = \frac{1}{2 \cdot \sqrt[3]{V}}$ .

Радіус зони тріщин навкруги заповнювача дорівнює

$$r_T = \frac{d}{2} \times \sqrt[2]{2 \left\{ \left[ \frac{R_p}{K_1} \cdot (1+V) + \frac{R_p}{K_2} \cdot (1-V) \right] - \Delta E_t \cdot V \right\}} \quad (8a)$$

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

З одержаної формули видно, що розмір зони тріщиноутворення збільшується зі збільшенням розміру частинок заповнювача ( $d$ ) і деформацій  $\Delta E(t)$ . Залежність (8а) можна спростити,

приймаючи, наприклад,  $K_I = K$  і  $\frac{R_p}{K} = E_R$

$$r_T = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\Delta E(t)}{4E_R(1+0,5\varphi_t) - 2\Delta E(t) \cdot V}} \quad (8б)$$

Виконаємо аналіз радіальних і тангенціальних напружень у пружній зоні оболонки заповнювача.

У теорії пружності розглянуто задачу про напружений стан в осесиметричних тілах, з якої відомо:

$$E_p = \frac{dU}{dr} = -\frac{2A}{r^3} + B, \quad (9а)$$

$$E_p = \frac{U}{r} = \frac{A}{r^3} + B, \quad (9б)$$

де  $U$  – радіальне зміщення даної точки елемента.

Напруження в розчинній оболонці, використовуючи узагальнений закон Гука, дорівнюють:

$$\sigma_p = \frac{E_1}{1-\mu_1-2\mu_1^2} [2\mu_1 E_T + (1-\mu_1) E_{p1}], \quad (10а)$$

$$\sigma_T = \frac{E_1}{1-\mu_1-2\mu_1^2} [E_T + \mu_1 E_p]. \quad (10б)$$

Підставляючи в рівняння (10) значення відносних деформацій з (9), отримаємо

$$\sigma_p = \frac{E_1}{1-\mu_1-2\mu_1^2} \times \left[ -\frac{2A}{r^3} \cdot (1-2\mu_1) + B(1+\mu_1) \right], \quad (11а)$$

$$\sigma_T = \frac{E_1}{1-\mu_1-2\mu_1^2} \left[ \frac{A}{r^3} \cdot (1-2\mu_1) + B(1+\mu_1) \right]. \quad (11б)$$

Для опису властивостей матеріалу, еквівалентного прийнятій структурній моделі, необхідно знайти сім постійних інтегрування, дійсних для кожного шару ( $A, B, A_1, B_1, A_2, B_2,$

$A_3$ ). Для цього використовуються умови рівності на стику кожного шару елемента радіальних зсувів (9б) і напружень (11а) у вигляді

$$U = Ar + Br^{-2}, \quad \sigma_p = 3KA - 6\lambda \cdot K \cdot Br^{-3}, \quad (12)$$

де  $K$  – об'ємний модуль пружності матеріалу даного шару;  $\lambda$  – параметр поперечної пружності.

Наведені рівняння справедливі лише у шарах елемента вільних тріщин. Для зони тріщин, де приймається умова  $\sigma_T = 0$ , визначимо нові інтегральні форми рівнянь (12) з наступних умов.

При  $\sigma_T = 0$  із загального закону Гука слідує:

$$E_p = \frac{\sigma_p}{E} \text{ або } E_T = -\mu \frac{\sigma_p}{E}. \quad (13)$$

Виразивши радіальну деформацію через переміщення  $E_r = \frac{dU}{dr}$ , знайдемо:

$$\sigma_p = \frac{dU}{dr} \cdot E. \quad (14)$$

Одержана залежність  $\sigma_p$  від  $U$ , а також рівняння рівноваги (5), дозволяють записати рівняння спільності деформацій на ділянці між тріщинами:

$$\frac{d^2U}{dr^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{dU}{dr} = 0. \quad (15)$$

Інтегрування отриманого диференційного рівняння другого порядку призводить до залежності:

$$U = A + Br^{-1}. \quad (16)$$

Для відшукування  $A$  і  $B$  необхідно в даному визначнику замінити відповідно перший і другий стовпці правою частиною рівнянь.

$K_{\max}$  визначено з формули, одержаної з умови, що  $r_T = a$

$$K_{\max} = \frac{K_1 K_2}{K_2 - (K_1 - K_2) \cdot V}. \quad (17)$$

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

При  $V=0$   $K_{\max} = K_1$ , а при  $V=1,0$   $K_{\max} = K_2$ .

Постійні інтегрування А і В дозволяють вирішувати цілу низку завдань. Вирази для визначення постійних при  $r_T=0$  після елементарних спрощень мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{4}{3} \sigma_y \cdot 3b^3 - (1-V)/K_1 - V/K_2 \\ B &= -3\sigma_y b^3 \cdot \frac{K}{K_1} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Використовуючи ці значення в рівнянні (11) спільно з критерієм тріщиностійкості, а також залежність (17), можливо обчислити умови збереження суцільності матеріалу, що залежать від величини граничних усадкових деформацій бетону.

Запишемо рівняння тангенціальних напружень для випадку повного розкриття тріщини в розчинній оболонці  $r_T = b$ , а  $\Delta E_y$  виразимо через граничну усадку розчину і об'ємне насичення бетону крупним заповнювачем. Тоді дійсні тангенціальні напруження з урахуванням їх релаксації дорівнюватимуть

$$\sigma_T = \frac{3V[\Delta E]}{2 \left( \frac{1+V}{K_1} + \frac{1-V}{K_2} \right) S} = R_p, \quad (19)$$

де  $S$  – функція релаксації внутрішніх напружень, рівна для терміну тверднення 28 діб

$$S = 1 + 0,5\varphi_t \quad (20)$$

тут  $\varphi_t$  – характеристика повзучості, приймається для терміну тверднення бетону 28 діб рівною  $\varphi = 2,0$ .

Визначимо величину тангенціальних напружень як функцію об'ємного насичення бетону крупним заповнювачем

$$\sigma_T = \frac{3 \cdot E_p \cdot K \cdot V \cdot (1-V)}{2 \cdot S \cdot [(1-V) + nV] \times [(1+V) \cdot n + (1-V)]} \quad (21)$$

де  $E_p$  – усадкова деформація розчинної оболонки бетону;  $n$  – відношення модулів

об'ємної пружності заповнювача і розчину  $\left( n = \frac{K_2}{K_1} \right)$ .

Для цього необхідно визначити похідну  $d\sigma/dV$  і прирівняти її нулю. Однак, оскільки в загальному вигляді похідне рівняння досить громіздке, то це складне становище можна обійти, даючи величинам  $n$  певне значення і диференціюючи конкретне рівняння при даному значенні  $n$ . Наприклад, при  $n=1$  тангенціальні напруження дорівнюють

$$\sigma_T = \frac{3 \cdot E_p \cdot K_2}{4 \cdot S} \cdot V \cdot (1-V).$$

Таким чином,

$$\frac{d\sigma}{dV} = \frac{3 \cdot E_p \cdot K_2}{4S} \cdot (1-2V) = 0,$$

звідки при  $n=1$   $V_{opt} = 0,50$ ; аналогічно  $n=2$ ;  $V_{opt} = 0,38$ .

### Наукова новизна та практична значимість

1. Встановлено, що комплекс структурних особливостей модифікованого бетону при передачі навантаження призводить до формування широкої зони передруйнування, здатної поглинати значний об'єм пружної енергії деформації, що забезпечує отримання проектних деформативних властивостей бетону спеціального призначення.

2. Отримали подальший розвиток уявлення про визначення критерію тріщиноутворення модифікованого бетону, що твердне у природних умовах.

Отримані рівняння дозволяють вирішити питання про мінімальний рівень структурних напружень у монолітному бетоні при певному насиченні його крупним заповнювачем, а також оцінити вплив структурних напружень на властивості бетону. Це дозволить вирішити низку технологічних завдань при зведенні монолітних будівель.

### Висновки

1. У звичайних бетонах з відносно тонкою цементною оболонкою при температурно-усадкових деформаціях виникають високі

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

тангенціальні і невеликі радіальні напруження. У природних умовах ці напруження вище в результаті підвищення значень  $\Delta\varepsilon(\tau)$ , чого не спостерігається у модифікованих бетонах.

2. У модифікованих бетонах найбільшу небезпеку для структури становлять лише тангенціальні напруження.

3. Зміна усадкових напружень у часі має однозначний характер. Сумарні температурно-усадкові деформації мають пилкоподібний графік. Для модифікованого бетону амплітуда коливань на 48–53 % менше.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баженов, Ю. М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю. М. Баженов, В. С. Демьянова, В. И. Калашников. – Москва : АСВ, 2006. – 368 с.
2. Берг, О. Я. Физические основы теории прочности бетона / О. Я. Берг. – Москва : Стройиздат, 1981. – 290 с.
3. Гансен, Т. Ползучесть и релаксация напряжений в бетоне / Т. Гансен. – Москва : Стройиздат, 1980. – 169 с.
4. Нильссен, Л. Дж. Ударное нагружение бетонных конструкций : [пер. с англ.] / Л. Дж. Нильссен. – Москва, 1989. – 171 с.
5. Пирадов, К. А. Механика разрушения железобетона / К. А. Пирадов, Е. А. Гузев. – Москва : Новый век, 1998. – 190 с.
6. Рабинович, Ф. Н. Композиты на основе дисперсноармированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции / Ф. Н. Рабинович. – Москва : АСВ, 2004. – 560 с.
7. Руденко, Д. В. Бетон на основі дисперсно модифікованої цементної системи / Д. В. Руденко // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 4 (64). – С. 169–175. doi: 10.15802/stp2016/78008.
8. Руденко, Д. В. Фізико-хімічна модифікація цементної системи монолітного бетону / Д. В. Руденко // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 174–182. doi: 10.15802/stp2015/57103.
9. Руденко, Д. В. Технологія модифікованих бетонів для монолітних споруд / Д. В. Руденко // Ефективні організаційно-технологічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві : матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф. / Харків. нац. ун-т буд-ва та архітектури. – Харків, 2016. – С. 90–91.
10. Руденко, Д. В. Модифіковані бетони для висотних споруд / Д. В. Руденко // Ефективні технології в будівництві : матеріали міжнар. наук.-техн. конф. / Київ. нац. ун-т буд-ва та архітектури. – Київ, 2016. – С. 107–108.
11. Хердтл, Р. Долговечность бетонов на основе многокомпонентных цементов / Р. Хердтл, М. Дитерманн, К. Шмидт // Цемент и его применение. – 2011. – № 1. – С. 76–80.
12. Collepari, M. Innovative Concretes for Civil Engineering Structures: SCC, HPC and RPC / M. Collepari // Workshop on New Technologies and Materials in Civil Engineering : Proc. – 2003. – P. 1–8.
13. Derucher, K. M. Composite materials: Testing and Design / K. M. Derucher. – New Orleans ; Philadelphia, 2009. – 697 p.
14. Hanehara, S. Rheology and early age properties of cement systems / S. Hanehara, K. Yamada // Cement and Concrete Research. – 2008. – Vol. 38. – Iss. 1. – P. 175–195. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.006.
15. Lee, C. Y. Strength and microstructural characteristics of chemically activated fly ash-cement systems / C. Y. Lee, H. K. Lee, K. M. Lee // Cement and Concrete Research. – 2003. – Vol. 33. – Iss. 3. – P. 425–431. doi: 10.1016/S0008-8846(02)00973-0.
16. Microcracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress Strain Curve / T. T. C. Hsu, F. O. Slate, G. Sturman, G. Winter // Intern. Concrete Abstracts Portal. – 1963. – Vol. 60. – Iss. 2. – P. 209–224. doi: 10.14359/7852.
17. Middendorf, B. Nanoscience and nanotechnology in cementitious materials / B. Middendorf, N. B. Singh // Cement International. – 2006. – № 4. – P. 80–86.
18. Neville, A. M. Wlasciwosci betonu / A. M. Neville. – Crakow : Polski Cement, 2000. – 874 p.
19. Rudenko, D. Properties of the phase components of the modified cement system / D. Rudenko // TEKA Kom. Mot. I Energ. Roln. – 2013. – T. 13, № 4. – P. 218–224.
20. Rudenko, N. The Development of Conception of New Generation Concretes / N. Rudenko // TEKA Kom. Mot. I Energ. Roln. – 2010. – T. 10B. – P. 128–133.
21. Rudenko, N. Technology of shotcreting based on activated binder / N. Rudenko // TEKA Kom. Mot. i Energ. Roln. – 2014. – T. 14, № 1. – P. 222–228.
22. Santiago, S. D. Fracture Mechanism of Concrete under Compressive Loads / S. D. Santiago, H. K. Hilsdorf // Cement and Concrete Research.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

- 1973. – Vol. 3. – Iss. 4. – P. 363–388. doi: 10.1016/0008-8846(73)90076-8. Rodney Hill 60th Anniversary Volume. – P. 653–686. doi: 10.1016/B978-0-08-025443-2.50025-2.
23. Willis, J. R. Elasticity theory of composites / J. R. Willis. // Mechanics of Solids. – 1982. – The

Д. В. РУДЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Городское строительство и хозяйство», Запорожская государственная инженерная академия, пр. Соборный, 226, Запорожье, Украина, 69006, тел. +38 (098) 214 04 85, эл. почта veberc@ukr.net, ORCID 0000-0003-0827-042X

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО МОНОЛИТНОГО БЕТОНА

**Цель.** Статья посвящена исследованию напряженного состояния модифицированного монолитного бетона естественного твердения. **Методика.** Для достижения поставленной цели проведены исследования микроструктуры модифицированной цементной матрицы бетона, механизма структурообразования модифицированного бетона естественного твердения; определены методы надежной оценки прочности бетона. **Результаты.** Развитие внутренних напряжений по-разному влияет на свойства бетона. При нарастании температурно-усадочных деформаций во времени и, следовательно, при увеличении структурных напряжений в цементной оболочке вокруг зерен заполнителя могут развиваться два противоположных процесса: зона пластического течения или зона трещин. **Научная новизна.** Установлено, что комплекс структурных особенностей модифицированного бетона при передаче нагрузки приводит к формированию обширной зоны предразрушения, способной поглощать значительный объем упругой энергии деформации, что обеспечивает получение проектных деформативных свойств бетона специального назначения. Получили дальнейшее развитие представления об определении критерия трещинообразования модифицированного бетона, твердеющего в естественных условиях. **Практическая значимость.** Полученные уравнения позволяют решить задачу о минимальном уровне структурных напряжений в монолитном бетоне при определенном насыщении его крупным заполнителем, а также оценить влияние структурных напряжений на свойства бетона. В обычных бетонах с относительно тонкой цементной оболочкой при температурно-усадочных деформациях возникают высокие тангенциальные и небольшие радиальные напряжения. В естественных условиях эти напряжения выше в результате повышения значений  $\Delta\epsilon(\tau)$ , чего не наблюдается в модифицированных бетонах. В модифицированных бетонах наибольшую опасность для структуры представляют только тангенциальные напряжения. Изменение усадочных напряжений во времени имеет однозначный характер. Суммарные температурно-усадочные деформации имеют пилообразный график. Для модифицированного бетона амплитуда колебаний на 48...53 % меньше. Это позволит решить ряд технологических задач при возведении монолитных зданий.

**Ключевые слова:** модифицированный бетон; монолитный бетон; напряженное состояние; деформативные характеристики

D. V. RUDENKO<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Urban Construction and Management», Zaporizhzhia State Engineering Academy, Lenin Av., 226, Zaporizhzhia, Ukraine, 69006, tel. +38 (098) 214 04 85, e-mail veberc@ukr.net, ORCID 0000-0003-0827-042X

## RESEARCH OF THE STRESS STATE OF A MODIFIED IN-SITU CONCRETE

**Purpose.** The article focuses on investigation of the stress state of a modified in-situ concrete of natural hardening. **Methodology.** To achieve the aim, the research of the microstructure of the modified cement matrix of concrete, as well as the mechanism of structure formation of modified concrete with natural hardening was conducted; the methods for reliable evaluation of concrete strength were defined. **Findings.** The development of internal stresses affects the properties of concrete differently. With an increase in temperature-shrinkage deformations in time and, thus, with increasing structural stresses in the cement sheath around the grains of the filler two opposite processes may develop: zone of plastic flow or cracking. **Originality.** It was established that the

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

structural features complex of the modified concrete when the load transfer leads to the formation of extensive zones of prefracture which is able to absorb a significant amount of elastic strain energy that provides the design deformation properties of the concrete for special purposes. Ideas about the definition of the criteria of cracking modified concrete, hardening under natural conditions had further development. **Practical value.** The resulting equations allow to solve the problem about the minimum level of structural stress in monolithic concrete in a saturated large placeholder, as well as to assess the influence of structural stresses on the properties of concrete. In normal concrete with a relatively thin cement sheath at temperature-shrinkage deformations, high tangential and low radial tension occur. In vivo, this stress is higher as a result of higher values of  $\Delta\varepsilon(\tau)$ , which is not observed in the modified concrete. In the modified concretes only tangential stresses are the greatest danger to structures. The change of shrinkage stress with time is straightforward. The total temperature-shrinkage deformations have a sawtooth graph. For modified concrete the amplitude is 48...53% less. This will allow solving a number of technological challenges in the construction of monolithic buildings.

*Keywords:* modified concrete; in-situ concrete; stress state; deformation characteristics

## REFERENCES

1. Bazhenov Yu.M., Demyanova V.S., Kalashnikov V.I. *Modifitsirovannyye vysokokachestvennyye betony* [Modified high-quality concretes]. Moscow, ASV Publ., 2006. 368 p.
2. Berg O.Ya. *Fizicheskiye osnovy teorii prochnosti betona* [Physical foundations of the theory of concrete strength]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981. 290 p.
3. Gansen T. *Polzuchest i relaksatsiya napryazheniy v betone* [Creep and stress relaxation in concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980. 169 p.
4. Nilssen L.Dzh. *Udarnoye nagruzheniye betonnykh konstruksiy* [Shock loading of concrete structures]. Moscow, 1989. 171 p.
5. Piradov K.A., Guzeyev Ye.A. *Mekhanika razrusheniya zhelezobetona* [Fracture mechanics of concrete]. Moscow, Novyy vek Publ., 1998. 190 p.
6. Rabinovich F.N. *Kompozity na osnove dispersnoarmirovannykh betonov. Voprosy teorii i proyektirovaniya, tekhnologiya, konstruksii* [Composites based on fiber reinforced concrete. Questions of the theory and design, technology, construction]. Moscow, ASV Publ., 2004. 560 p.
7. Rudenko D.V. Beton na osnovi dyspersno modyfikovanoi tsementnoi systemy [Concrete based on modified disperse cement system]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2016, no. 4 (64), pp. 169-175. doi: 10.15802/stp2016/78008.
8. Rudenko D.V. Fyzyko-khimichna modyfikatsiia tsementnoi systemy monolitnoho betonu [Physico-chemical modification of monolithic concrete cement system]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 6 (60), pp. 174-182. doi: 10.15802/stp2015/57103.
9. Rudenko D.V. Tekhnolohiia modyfikovanykh betoniv dlia monolitnykh sporud [Technology of modified concrete for monolithic structures]. *Materialy VI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Efektyvni orhanizatsiino-tekhnologichni rishennia ta enerhozberihaiuchi tekhnolohii v budivnytstvi»* [Proc of VI<sup>th</sup> Intern. Sci. and Practical Conf. «Effective organizational and technological solutions and energy saving technologies in construction»]. Kharkiv, 2016, pp. 90-91.
10. Rudenko D.V. Modyfikovani betony dlia vysotnykh sporud [Modified concrete for high-rise buildings]. *Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Efektyvni tekhnolohii v budivnytstvi»* [Proc. of Intern. Sci. and Practical Conf. «Efficient technologies in construction»]. Kyiv, 2016, pp. 107-108.
11. Kherdtl R., Ditermann M., Schmidt K. Dolgovechnost betonov na osnove mnogokomponentnykh tsementov [Durability of concrete based on multicomponent cements]. *Tsement i yego primeneniye – Cement and its Applications*, 2011, no. 1, pp. 76-80.
12. Collepardi M. Innovative Concretes for Civil Engineering Structures: SCC, HPC and RPC. Workshop on New Technologies and Materials in Civil Engineering: Proc., 2003, pp. 1-8.
13. Derucher K.M. Composite materials: Testing and Design. New Orleans-Philadelphia, 2009. 697 p.
14. Hanehara S., Yamada K. Rheology and early age properties of cement systems. *Cement and Concrete Research*, 2008, vol. 38, issue 1, pp. 175-195. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.006.
15. Lee C.Y., Lee H.K., Lee K.M. Strength and microstructural characteristics of chemically activated fly ash-cement systems. *Cement and Concrete Research*, 2003, vol. 33, issue 3, pp. 425-431. doi: 10.1016/S0008-8846(02)00973-0.
16. Hsu T.T.C., Slate F.O., Sturman G., Winter G. Microcracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress Strain Curve. *Intern. Concrete Abstracts Portal*, 1963, vol. 60, issue 2, pp. 209-224. doi: 10.14359/7852.



## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

17. Middendorf B., Singh N.B. Nanoscience and nanotechnology in cementitious materials. *Cement International*, 2006, no. 4, pp. 80-86.
18. Neville A.M. Wlasciwosci betonu. Crakow , Polski Cement Publ., 2000. 874 p.
19. Rudenko D. Properties of the phase components of the modified cement system. *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, 2013, Vol. 13, No. 4, pp. 218-224.
20. Rudenko N. The Development of Conception of New Generation Concretes. *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, 2010, vol. 10B, pp. 128-133.
21. Rudenko N. Technology of shotcreting based on activated binder. *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, 2014, Vol. 14, No. 1, pp. 222-228.
22. Santiago S.D., Hilsdorf H.K. Fracture Mechanism of Concrete under Compressive Loads. *Cement and Concrete Research*, 1973, vol. 3, issue 4, pp. 363-388. doi: 10.1016/0008-8846(73)90076-8.
23. Willis J.R. Elasticity theory of composites. *Mechanics of Solids*, 1982, The Rodney Hill 60th Anniversary Volume, pp. 653-686. doi: 10.1016/B978-0-08-025443-2.50025-2.

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. А. Банахом (Україна), д.т. н., проф. М. І. Нетесою (Україна)*

Надійшла до редколегії: 08.09.2016

Прийнята до друку: 07.12.2016