

БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ТА ВИРОБИ

УДК 666.97

ПОРИСТІСТЬ І ДЕФОРМАТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ МОДИФІКОВАНИХ ЗОЛОШЛАКОБЕТОНІВ

Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін, В. В. Лащівський

У статті наведені результати визначення параметрів пористої структури золошлакобетонів, модифікованих комплексними добавками, що включають суперпластифікатор С-3 і фтористий активатор Na_2SiF_6 . Наведені експериментальні дані, що характеризують вплив складів золошлакобетонів і вміст добавок на їх міцнісні показники, динамічний модуль пружності, умовну розтяжність, а також усадочні деформації.

В статье приведены результаты определения параметров пористой структуры золошлакобетонов, модифицированных комплексными добавками, включающими суперпластификатор С-3 и фтористый активатор Na_2SiF_6 . Приведены экспериментальные данные, характеризующие влияние составов золошлакобетонов и содержания добавок на их прочностные показатели, динамический модуль упругости, условную растяжимость, а также усадочные деформации.

The results of determination of porous structure parameters of ash-slag concrete modified by complex admixtures including the superplasticizer C-3 and fluorine activator Na_2SiF_6 are resulted in the article. Experimental information characterizing influence of ash-slag concrete compositions and contents of admixtures on their strength indexes, dynamic modulus of elasticity, conditional extensibility and also shrinkage deformations, is resulted.

Вступ

Для бетонів не менше значення ніж міцність мають деформативні властивості. Напружений стан бетонів обумовлений силовими факторами, вологісними градієнтами, тиском пари в структурі бетону. Певний вклад в напружений стан бетону вносять також усадочні деформації. Як наслідок розвитку напружень у бетоні виникають тріщини. На процес руйнування бетонів суттєво впливає тиск водяної пари, яка утворюється при сушінні і нагріванні, що в свою чергу залежить як від загальної пористості бетону, так і розподілу пор за розмірами. Найбільш небезпечними з позиції розвитку напруженого стану бетону є капілярні пори, насичені водою.

В статті наведені результати визначення параметрів пористості і деформативних властивостей золошлакобетонів із застосуванням портландцементу ПЦ-І М500 підприємства "Волинь-цемент", золи-виносу і золошлакової суміші Бурштинської ТЕС. Золи-виносу використовували як активну тонкомелену добавку у складі в'язучого (100 кг/м^3), золошлакову суміш як заповнювач дрібнозернистого бетону.

Визначення параметрів пористості золошлакобетону

Універсальним методом визначення порової структури цементного каменю є метод водопоглинання [2], який базується на явищі капілярності і дозволяє визначити як інтегральні (уявна пористість), так і диференціальні (показники середнього розміру пор і однорідності розмірів пор) параметри. Параметри порової структури розраховуються при апроксимації кривих водопоглинання експоненціальною функцією типу:

$$W_{\tau} = W_{\max} \left[1 - e^{-(\lambda\tau)^{\alpha}} \right], \quad (1)$$

де W_{\max} – умовна величина максимального водопоглинання;
 λ – коефіцієнт, який характеризує середній розмір капілярів;
 α – коефіцієнт, який характеризує однорідність розмірів капілярів.

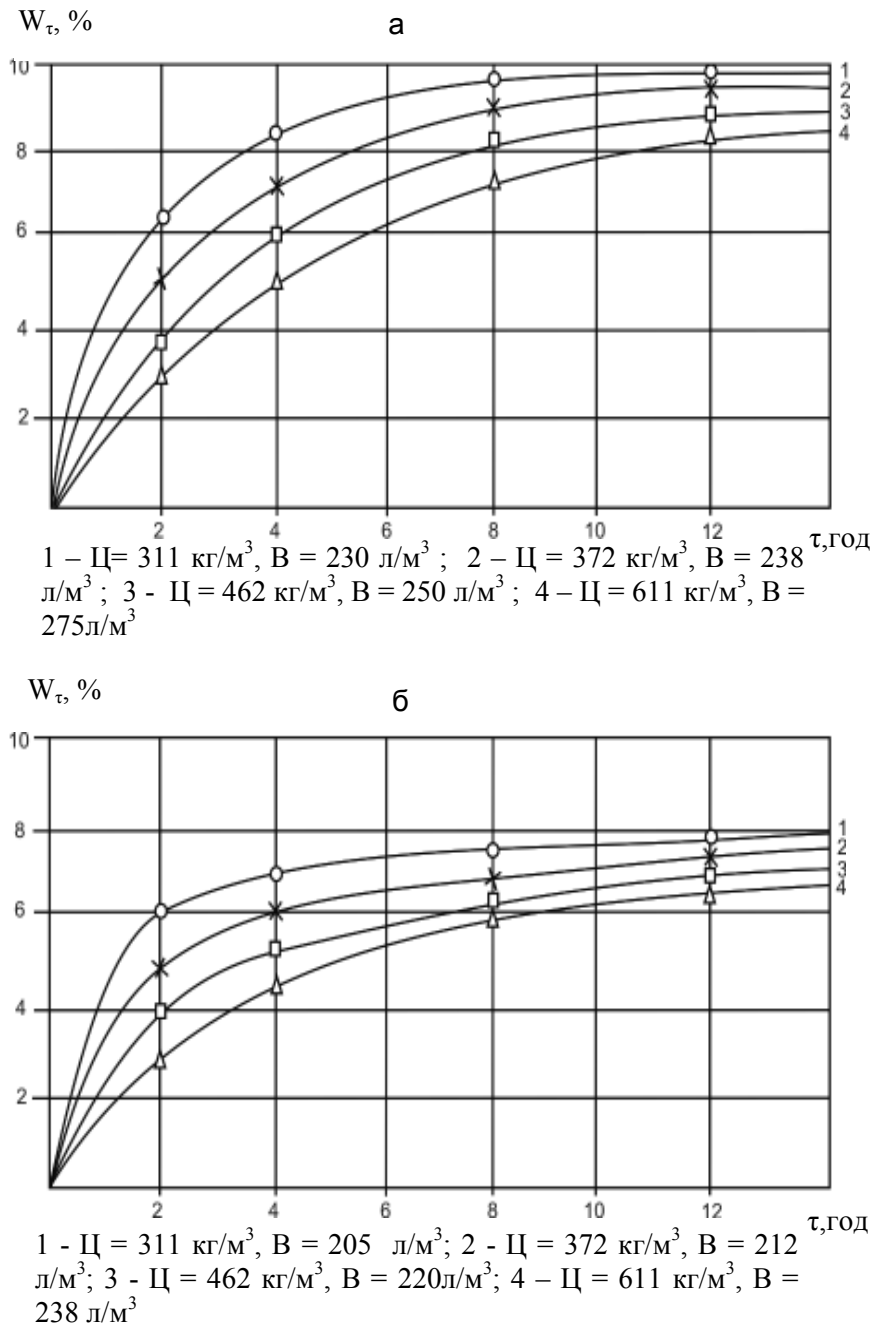


Рис. 1. Кінетика водопоглинання золошлакобетонів:
а – без добавок; б – з добавкою С-3+ Na₂SiF₆

Визначали параметри пористості дрібнозернистих золошлакобетонів з ОК=1...4 см. Для визначення параметрів пористості за кінетикою водопоглинання [1] виготовляли зразки-куби з розміром ребра 70 мм. Зразки після 28 діб твердіння висушували при 105...110° С до постійної маси. Зважування зразків виконували через 0,25; 1; 6 і 24 години.

За результатами водопоглинання розраховували такі характеристики:

- водопоглинання за масою :

$$W_m = \frac{m_{24} - m_0}{m_0} 100; \quad (2)$$

- середню густину зразків:

$$\rho_0 = \frac{m_0 \rho_B}{m_{24} - m_{24}^B}; \quad (3)$$

- об'ємне водопоглинання (уявну пористість):

$$W_0 = W_{m\rho_0} = \frac{m_{24} - m_0}{m_{24} - m_{24}^B} \times 100; \quad (4)$$

- загальну пористість:

$$P_i = \left[1 - \frac{\rho_0}{\rho} \right] \times 100. \quad (5)$$

У наведених вище формулах m_0 , m_{24} – маса зразка до занурення і через 24 год після занурення у воду, визначена на повітрі, m_{24}^B – маса зразка через 24 год після занурення, визначена у воді; ρ – густина бетону.

Метод дослідження пористості бетону за кінетикою водопоглинання виявляє і кількісно характеризує достатньо великий діапазон розмірів пор і капілярів бетону, які активно впливають на його властивості. Результати дослідів із визначень водопоглинання наведені на рис.1, а розрахунку параметрів порової структури – в табл. 1.

Таблиця 1

Основні параметри порової структури золошлакових бетонів

№ з/п	Витрати цементу та води, кг/м ³		Наявність добавки C-3+ Na ₂ SiF ₆	Пористість, %		Показник середнього розміру пор λ	Показник однорідності пор за розміром α
	Ц	В		загальна	відкрита		
				P_i	W_0^{\max}		
1	311	230	-	20,3	18,8	1,55	0,36
2	372	238	-	19,5	18,3	1,31	0,48
3	462	250	-	19,1	17,5	1,25	0,59
4	611	275	-	18,8	16,5	1,25	0,70
5	311	205	+	18,4	16,6	1,26	0,41
6	372	212	+	17,3	16,1	1,24	0,62
7	462	220	+	16,9	15,6	1,22	0,72
8	611	238	+	16,1	14,8	1,21	0,83

Аналіз даних табл. 1 показує, що, як і очікувалось, загальна та відкрита пористість золошлакобетонів зменшується зі зменшенням їх водовмісту і збільшенням витрати цементу. Для бетонів з комплексною добавкою C-3+ Na₂SiF₆ крім загальної і відкритої пористості зменшується середній розмір пор, підвищується однорідність їх розподілення.

Зменшення пористості золошлакобетонів при введенні добавок, які включають суперпластифікуючий і активуючий компонент, узгоджується з відомою формулою пористості (р), яка впливає із загальнотеоретичних передумов:

$$p = \frac{B - \lambda C}{1000} \cdot 100, \quad (6)$$

де λ – ступінь гідратації цементу,
 B і C - відповідно витрати води і цементу.

Крім суттєвого пластифікуючого ефекту, добавки збільшують ступінь гідратації, що сприяє зниженню як загальної, так і відкритої капілярної пористості.

Аналіз деформативних властивостей золошлакобетонів

Тріщиностійкість бетону в значною мірою пов'язана з відношенням міцності на розтяг при згині до міцності на стиск, деформативністю і усадочними деформаціями, які розвиваються в бетоні [2].

Як впливає з експериментальних даних, наведених на рис. 2, хоча для всіх досліджених бетонів з переходом від 3 до 28 добового віку знижується темп падіння відношення $R_{3г}/R_{ст}$, для активованих золошлакобетонів порівняно з бетонами без добавок це співвідношення залишається більш високим, що певним чином відображає особливості їх пористої і кристалізаційної структури.

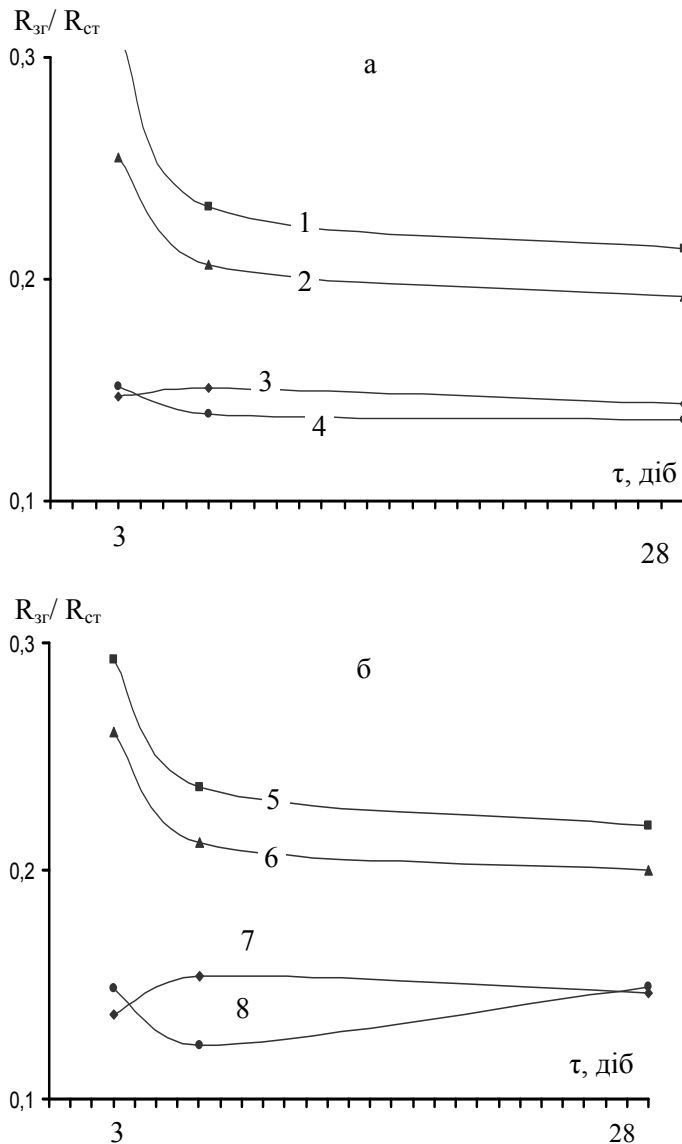


Рис. 2. Зміна відношення R_{zg} / R_{st} золошлакобетонів в часі: (а - суміші з ОК=1...4 см, б - Ж=11...20 с)
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 - номери кривих відповідають складам 2, 1, 8, 7, 10, 9, 16, 15 наведеним в табл. 2

$$E_{st} = \frac{(v_k + (2 - v_k)E_3 / E_k)}{2 - v_k + v_k E_3 / E_k} \quad (8)$$

де v_k – об’ємна концентрація цементного каменю;
 E_3 і E_k – модулі пружності заповнювача і цементного каменю.

На модуль пружності цементного каменю вирішальний вплив має пористість цементного каменю v_n і модуль пружності $E_{г.к}$ його складових гідратних сполук і негідратованих зерен (“гелевокристалічної фази”). Це впливає [2] з виразу:

$$E_k = (1 - v_n)^3 E_{г.к} \quad (9)$$

Відомі значення міцності золошлакобетонів при згині і динамічного модуля пружності (табл. 2) дозволили розрахувати величину умовної розтяжності ϵ_y (рис.3).

Умовна розтяжність золошлакових бетонів без комплексної добавки зі збільшенням Ц/В і тривалості тверднення має тенденцію до зниження, в той час як для пластифікованих і активованих бетонів вона зростає. Очевидно, характер зміни умовної розтяжності бетону і відповідно тріщиностійкості погоджується зі зміною співвідношення міцності бетонів на розтяг при згині до міцності при стиску.

Опір бетону виникненню тріщин в напруженому стані пов’язаний з його деформативністю або граничною розтяжністю. Одним з найбільш простих критеріїв деформативності близьких за величиною до граничної розтяжності, вимірювання якої є достатньо складним, можна вважати умовну розтяжність ϵ_{zp}^y [3], яку можна розраховувати як відношення міцності на розтяг при згині R_{zg} до величини динамічного модуля пружності $E_{дин}$:

$$\epsilon_{zp}^y = R_{zg} / E_{дин} \quad (7)$$

Як відомо з [3], динамічний модуль пружності відображає пружні властивості матеріалів без впливу повзучості. Численні експериментальні дані [4] показують, що відношення статичного $E_{ст}$ і динамічного $E_{дин}$ модулів пружності бетону знаходиться в інтервалі 0,85...0,95.

Динамічний модуль пружності золошлакобетонів визначали ультразвуковим імпульсним методом. Результати випробувань наведені в табл. 2.

При аналізі отриманих значень $E_{дин}$ можна відмітити, що вони в основному узгоджуються з міцністю бетонів при стиску. Відомо, що модуль пружності можна прогнозувати, грунтуючись на теоретичному виразі, отриманому при розгляді бетону як двофазної системи із сферичними частинками, які рівномірно розподілені у цементному камені:

Динамічний модуль пружності золошлакобетонів

№ з/п	Ц/В	Добавки		Границя міцності при стиску, МПа, у віці		E _{дин} , (×10 ³ МПа), у віці	
		С-3	Na ₂ SiF ₆	7 діб	28 діб	7 діб	28 діб
<i>Суміші з ОК=1...4 см, R_т=42,3 МПа</i>							
1	1,35	-	-	11,6	17,8	24,8	30,7
2	1,52	+	+	18,4	26,5	32,2	37,1
3	1,6	-	-	19,3	25,5	30,2	33,7
4	1,8	+	+	24,4	32,4	36,0	39,6
5	1,85	-	-	20,5	31,4	34,0	39,7
6	2,1	+	+	28,9	37,5	38,2	41,4
7	2,22	-	-	25,8	37,4	38,2	43,0
8	2,56	+	+	31,1	41,1	37,2	40,3
<i>Суміші з Ж=11...20 с, R_т=42,3 МПа</i>							
9	1,35	-	-	13,1	19,1	26,5	31,7
10	1,52	+	+	19,8	28,5	33,2	38,1
11	1,6	-	-	19,5	26,5	30,3	34,2
12	1,8	+	+	26,4	35,5	37,1	40,7
13	1,85	-	-	21,8	33,5	34,9	40,5
14	2,1	+	+	29,5	38,9	38,5	41,8
15	2,22	-	-	28,3	38,2	39,5	43,3
16	2,56	+	+	31,8	42,4	37,5	40,6
<i>Суміші з ОК=1...4 см, R_т= 38,8 МПа</i>							
17	1,35	-	-	9,4	14,5	22,0	27,9
18	1,52	+	+	15,5	22,6	29,7	35,0
19	1,6	-	-	13,3	21,3	25,3	31,5
20	1,8	+	+	20,4	27,9	33,6	37,8
21	1,85	-	-	19,8	28,1	33,5	38,3
22	2,1	+	+	24,5	32,9	36,1	39,8
<i>Суміші з Ж=11...20 с, R_т=38,8 МПа</i>							
23	1,35	-	-	10,5	15,1	23,5	28,5
24	1,52	+	+	15,8	23,5	30,0	35,5
25	1,6	-	-	14,5	21,4	26,5	31 526
26	1,8	+	+	20,9	28,5	33 942	38 063
27	1,85	-	-	19,5	27,5	33 311	37 983
28	2,1	+	+	25,1	33,5	36 416	40 060

Багато досліджень містять протилежні дані про вплив золошлакових матеріалів на усадочні деформації бетону.

Більшість дослідників вважають, що в початкові строки наявна тенденція до зростання усадки при введенні золи-виносу, яка в більш віддалені строки твердіння стає практично такою ж як в бетонах без золи. При заміщенні частини цементу золою характерне зменшення усадочних деформацій бетону при зниженні водопотреби бетонної суміші. Зменшення усадки пояснюється також тим, що зола адсорбує з цементу розчинні луки і утворює стійкі нерозчинні алюмосилікати. Усадка золошлакобетонів ϵ_{yc} як і інших видів бетону залежить як від усадки цементного каменю $\epsilon_{ц}$, так і від об'єму введеного заповнювача ($V_{зан}$):

$$\epsilon_{yc} = \epsilon_{yc}^n (1 - V_{зан})^n \quad (10)$$

Деформації усадки досліджуваних бетонів визначали за допомогою індикаторів

годинникового типу з ціною поділки 1 мкм, встановлених на двох протилежних гранях призм на базі 160 мм. Досліди проводили при температурі $18 \pm 2^{\circ}\text{C}$ і відносній вологості $(75 \pm 5)\%$. Криві усадочних деформацій наведені на рис. 4. Їх аналіз показує, що для всіх досліджувальних складів усадочні деформації стабілізуються до 90...100 діб.

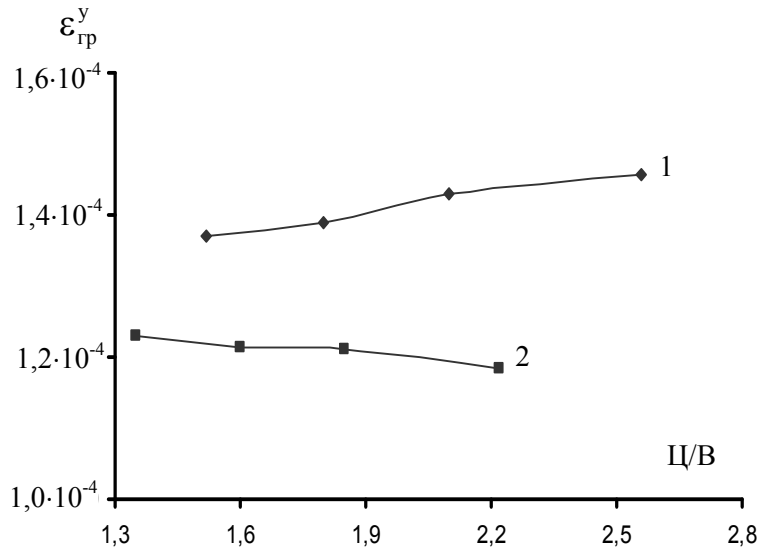


Рис. 3. Залежність умовної граничної розтяжності золошлакобетонів від Ц/В (суміші з ОК=1...4 см, $R_{ц}=42,3$ МПа): 1 - з добавкою С-3+ Na_2SiF_6 ; 2 - без добавки

Через 7 діб тверднення усадочні деформації складають 0,15...0,20, 28 діб – 0,35...0,45 деформацій, які розвиваються у віці 100 діб.

Відповідно до даних Міжнародної федерації з попередньо напруженого бетону (ФП) і Європейського комітету з бетону (ЄКБ) через 7 діб тверднення усадка складає 0,2, 28 діб – 0,4; 365 діб – 0,8 від граничної величини [2].

Величина усадки корелюється з вмістом бетонної суміші. При близькому значенні вмісту (табл. 3) зміна витрати цементу і відповідно Ц/В мало відображається на величині ϵ_{yc} , що погоджується з результатами досліджень Є. Н. Щербакова [4]. Введення комплексної добавки С-3+ Na_2SiF_6 дозволяє зменшити величину усадки золошлакобетонів на 25...30 %

А. Є. Десов, допускаючи, що зразки деформуються при усадці рівномірно за перерізом, запропонував [5] модуль тріщиностійкості цементного каменю, який обумовлений усадочними напруженнями:

$$T = R_p / \epsilon_{yc}, \quad (11)$$

де R_p – міцність зразків на розтяг;
 ϵ_{yc} – величина усадочних деформацій до моменту появи тріщин.

Ним встановлено, що тріщиноутворення цементного каменю характерно при T менше 3,5 МПа, тріщини від усадки утворюються в цементному камені при абсолютних значеннях усадки від 40 до 150 мкм/м.

Комплексним критерієм тріщиностійкості бетонів є коефіцієнт тріщиностійкості $K_{тр}$, який дозволяє, крім усадочних деформацій ϵ_{yc} , оцінити через показник умовної граничної розтяжності $\epsilon_{гр}^u$ також вплив міцнісних та інших властивостей:

$$K_{тр} = \epsilon_{гр}^u / \epsilon_y. \quad (12)$$

На величину $K_{тр}$ певний вплив мають властивості як цементного каменю, так і заповнювача, їх кількісне відношення у бетоні. Розрахункові значення $K_{тр}$, які наведені в табл. 3, показують більш високу тріщиностійкість золошлакобетонів, які вміщують комплексну добавку суперпластифікатора С-3 і активатора Na_2SiF_6 .

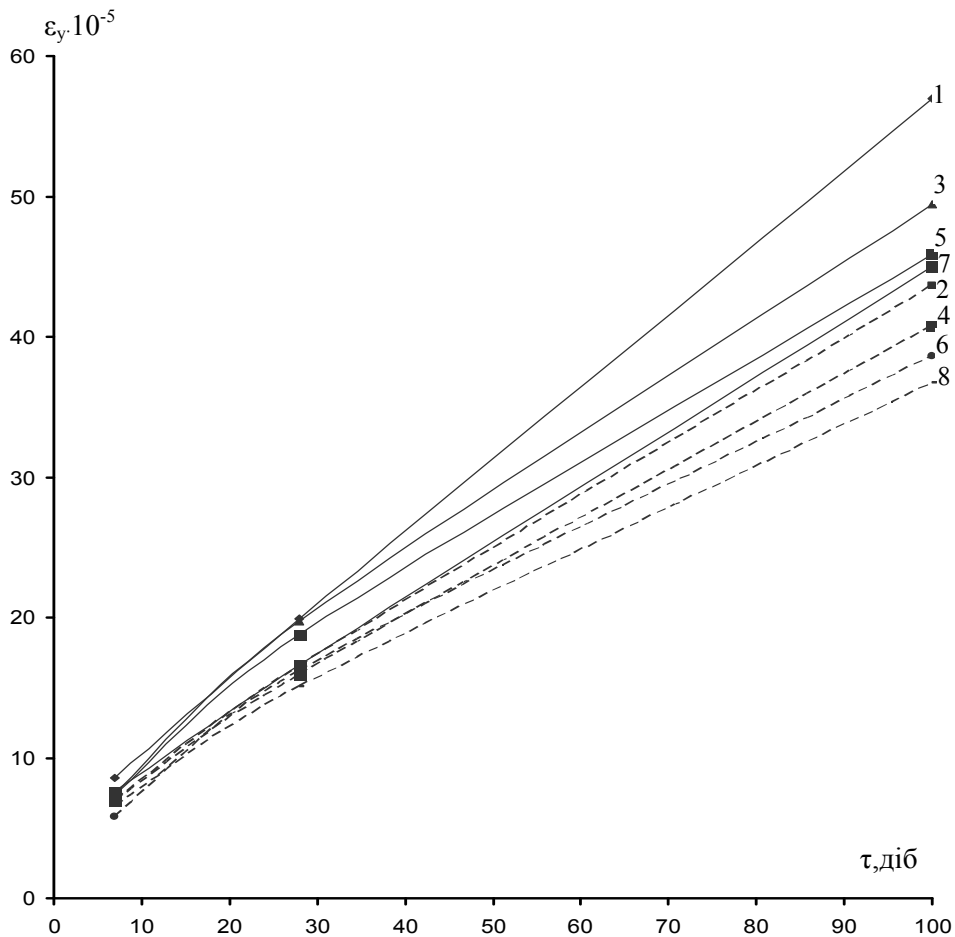


Рис. 4. Усадочні деформації золошлакобетонів (суміші з ОК=1...4 см, $R_{ц}=42,3$ МПа, – бетони з комплексною добавкою С-3+ Na_2SiF_6 , номера кривих відповідають табл. 2):

1 – В=275 л/м³; 2 – В=230 л/м³; 3 – В=250 л/м³; 4 – В=220 л/м³;
5 – В=238 л/м³; 6 – В=212 л/м³; 7 – В=235 л/м³; 8 – 205 л/м³

Таблиця 3

Розрахункові значення $K_{тр}$

№ з/п	Ц/В	Добавки		Витрата води, л/м ³ В	Умовна гранична розтяжність через 28 діб, $\epsilon_{гр}^y \times 10^{-4}$	Усадочні деформації, $\epsilon_y \times 10^{-5}$, 90 діб	Коефіцієнт тріщиностійкості, $K_{тр}, \times 10^{-4}$, 28 діб
		С-3	Na_2SiF_6				
<i>Суміші з ОК=1...4 см, $R_{ц}=42,3$ МПа</i>							
1	1,35	-	-	275	1,24	57	2,16
2	1,52	+	+	230	1,37	44	3,15
3	1,6	-	-	250	1,22	49	2,46
4	1,8	+	+	220	1,39	41	3,40
5	1,85	-	-	238	1,21	46	2,63
6	2,1	+	+	212	1,43	39	3,69
7	2,22	-	-	235	1,19	45	2,63
8	2,56	+	+	205	1,46	37	3,99

Висновки

- Для модифікованих золошлакобетонів з комплексною добавкою С-3 + Na₂SiF₆ поряд зі зменшенням загальної та відкритої пористості зменшується середній розмір пор і підвищується однорідність їх розподілу.
- Золошлакобетони з комплексними добавками С-3 + Na₂SiF₆ мають більш високу тріщиностійкість, що підтверджується більш високим відношенням для них міцності на згин до міцності на стиск, показником умовної граничної розтяжності, меншими усадочними деформаціями.

Список літератури

1. Шейкин А. Е. Структура и свойства цементных бетонов / А. Е. Шейкин, Ю. В. Чеховский, М. И. Бруссер. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.
2. Дворкин Л. И. Основы бетоноведения / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – С-Петербург: ООО «Стройбетон», 2006. – 692 с.
3. Стольников В. В. Трещиностойкость бетона / В. В. Стольников, Р. Е. Литвинова. – М.: Энергия, 1972. – 113 с.
4. Берг О. В. Высокопрочный бетон / О. В. Берг, Е. Н. Щербаков, Г. Н. Лисанко. – М.: Стройиздат, 1971. – 208 с.
5. Десов А. Е. Некоторые вопросы структуры, прочности и деформации бетонов // Структура, прочность и деформации бетонов / А. Е. Десов. – М.: Стройиздат, 1966. – С. 459.

Дворкін Леонід Йосипович – д.т.н., професор, зав. кафедрою технології будівельних виробів і матеріалознавства Національного університету водного господарства та природокористування.

Дворкін Олег Леонідович – д.т.н., професор кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства Національного університету водного господарства та природокористування.

Лащівський В. В. – інженер кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства Національного університету водного господарства та природокористування.