

**УДК 624.012.4-183.4**

**КОНСТРУКЦІЙНІ ТА КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНІ  
ЛЕГКІ БЕТОНИ НА ПОРИСТИХ ЗАПОВНЮВАЧАХ**

**КОНСТРУКЦИОННЫЕ И КОНСТРУКЦИОННО-  
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ЛЁГКИЕ БЕТОНЫ НА ПОРИСТЫХ  
ЗАПОЛНИТЕЛЯХ**

**STRUCTURAL AND CONSTRUCTIVE INSULATING LIGHT WEIGHT  
CONCRETE WITH POROUS AGGREGATES**

**Кравченко С.А., к.т.н., доц, Постернак О.О., к.т.н., доц, Столевич І.А.,  
к.т.н., доц. (Одеська державна академія будівництва та архітектури, г.  
Одеса).**

**Кравченко С.А., к.т.н., доц, Постернак А.А., к.т.н., доц, Столевич И.А.,  
к.т.н., доц. (Одесская государственная академия строительства и  
архитектуры, г. Одесса).**

**Kravchenko S.A., candidate of technical sciences, docent, Posternak A.A.,  
candidate of technical sciences, docent, Stolevic I.A., candidate of technical  
sciences, docent. (Odessa state academy of civil engineering and architecture)**

**Наведені данні експериментального дослідження міцнісних і  
деформативних властивостей конструкційних та конструкційно-  
теплоізоляційних легких бетонів.**

**Приведены результаты экспериментальных исследований прочностных  
и деформативных свойств конструкционных и конструкционно-  
теплоизоляционных лёгких бетонов.**

**The results of experimental researches durabilities and deformations  
properties structural and constructive insulating light weight concrete.**

**Ключові слова:**

**Міцність, деформативність, конструкційно-теплоізоляційний, легкий бетон.  
Прочность, деформативность, конструкционно-теплоизоляционный, лёгкий  
бетон.**

**Durability, deformations, constructive insulating, light weight concrete.**

**Введення.** Останніми роками увага зосереджена на розробці і вживанні конструкцій з використанням нових матеріалів і компонентів, що володіють кращими теплоізоляційними і експлуатаційними властивостями. При раціональному проектуванні конструктивних систем, будівель слід враховувати, що власна маса несучих конструкцій з легких бетонів завдяки їх низькій щільності до 1,5 разів менше, ніж аналогічних конструкцій з важких бетонів.

Дослідження і виробничий досвід показують, що переваги будівництва в цілому ряду істотно передбачається вживанням легких бетонів, особливо в тих випадках, коли є досить потужна база для виробництва місцевих пористих заповнювачів [1, 2, 3].

Проведені раніше дослідження показали технічну можливість і економічну доцільність використання відходів промисловості в бетонах на штучних пористих заповнювачах.

**Стан питання та задачі дослідження.** Проблема використання легких бетонів є дуже актуальним завданням, оскільки передбачає вирішувати багато актуальних завдань сучасного будівництва і одночасно вирішувати екологічні, ресурсозберігаючі та економічні проблеми за рахунок технологічних і техногенних відходів при використанні та виготовленні місцевих пористих заповнювачів, а також багатоконпонентних в'язучих.

**Аналіз останніх досягнень.** За останній час накопилось багато досліджень міцності і деформацій легких бетонів і конструкцій на їх основі, які були приведені в роботах М.А. Ахматова, Є.М. Бабіча, В.М. Вирового, Б.С. Комісаренко, Р.Л. Маїляна, Л.П. Орендліхера, Н.Я. Співака, В.Г. Суханова, О.Б. Пирадова та інших.

На сучасному рівні значний внесок у розвиток бетонів з використанням шлаку і золи внесли Ш.Т. Бабаєв, О.В. Гончикова, С.О. Висоцький, Л.І. Дворкин, О.Л. Дворкин, О.Г. Зоткін, М.Ю. Лещинський, М.Р. Рузієв, О.В. Каляскін та інші, але в основному ресурсозберігаючі питання за рахунок вживання промислових відходів при виготовленні пористих заповнювачів та багатоконпонентних в'язучих розглядаються для важких бетонів.

**Основна мета статті** полягає в дослідженні міцнісних і деформативних властивостей конструкційних і конструкційно-теплоізоляційних легких бетонів.

**Методика дослідження.** У дослідженнях використовували: портландцемент ОАО «ЮГ цемент» марка 400; вапно активністю 60% з СаО; зола Ладжінської ТЕС з  $S_{уд}=3000 \text{ см}^2/\text{г}$ ; керамзитовий гравій фракції 5...10 і 10...20мм в співвідношенні  $V_{5...10}/V_{10...20}=1,5$ ; кералітовий гравій отриман в печах випалення ПВ 2,5х40, як сировину використовували мулісті ґрунти на берегових гидровідвалів портів Білгород-Дністровський, Усть-Дунайськ і Південний фракції 5.10 і 10.20мм; карбонатний пісок Орловського родовища; пісок річний щільний "кар'єр Тельмановський", модуль крупності 1,36; пісок перлітовий "ООО Перліт-Інвест" пластифікатор С-3.

При підборі складів використовували розрахунково-експериментальний метод відповідно до рекомендацій [4], що включає наступні операції:

- вибір заповнювача;
- призначення попередньої витрати в'язучого;
- призначення зернового складу і витрати заповнювача;
- визначення витрати води, що забезпечує легкоукладуваність бетонної суміші;
- встановлення залежностей між витратою в'язучого і міцністю бетону;
- коректування і призначення виробничого складу.

Випробування зразків кубів і призм для визначення міцнісних і деформативних властивостей легких бетонів проводили відповідно до діючих норм ДСТУ.

**Результати дослідження.** Оптимальні склади та міцнісні характеристики досліджуваних бетонів приведені у табл.1.

У роботах [1,3,5,6] досліджені основні властивості керамзитобетону на карбонатному і кварцовому пісках із застосуванням багатокомпонентних в'язучих, призначені оптимальні склади для виготовлення збірних і монолітних залізобетонних елементів і конструкцій.

За результатами експериментальних досліджень з 95% надійністю отримані квадратичні рівняння регресії кубікової та призмної міцності у віці 28 діб, керамзитобетону на багатокомпонентному в'язучому і кварцовому піску, які з врахуванням лише значимих коефіцієнтів регресії мають вигляд:

$$f_{ck}(28)=19,95+3,7x_1+1,7x_2+1,9x_3+3,0x_4+2,7x_1^2+1,2x_1x_3-1,4x_4^2-2,1x_5^2; \quad (1)$$

$$f_{cd}(28)=18,5+3,3x_1+1,5x_2+1,7x_3+2,8x_4+2,5x_1^2+1,1x_1x_3-1,178x_4^2-1,833x_5^2. \quad (2)$$

Для спрощення квадратичних рівнянь регресії (1,2), була використана лінійна залежність вигляду:

$$f_{ck}(28)= 55,2 - 34,4[(В/МКВ) + r]; \quad (3)$$

$$f_{cd}(28)= 19,2 - 30,3[(В/МКВ) + r]. \quad (4)$$

В результаті використання регресійного аналізу прийнято лінійне рівняння регресії модуля пружності керамзитобетону на кварцовому піску і багатокомпонентному в'язучому, яке має вигляд:

$$E_c(28) \cdot 10^{-3} = 25,136 - 12,8[(В/МКВ) + r]. \quad (5)$$

Таблиця 1

## Склади та характеристики легких бетонів

Проектна міцність, МПа	Цемент, кг/м <sup>3</sup>	Зола, кг/м <sup>3</sup>	Вапно, кг/м <sup>3</sup>	Великий заповнювач, кг/м <sup>3</sup>	Пісок, кг/м <sup>3</sup>	Вода, л	$f_{ck(m)}$ , МПа	$f_{ck(28)}$ , МПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Примітка
Керамзитобетон на карбонатному піску										
10	250	-	-	392	472	270	-	10,6	1190	Бетон природного тверднення
15	400	-	-	267	750	250	-	19,7	1480	
20	550	-	-	152	1002	230	-	22,9	1670	
25	550	-	-	143	933	270	-	25,7	1690	
Кералітобетон на карбонатному піску										
10	250	-	-	211	1194	202	7,4	10,7	1685	Карбонатний пісок Орловського родовища
15	280	-	-	342	1025	178	11,7	19,1	1675	
20	360	-	-	325	975	192	15,4	23,7	1690	
25	455	-	-	306	919	203	20,1	25,9	1710	
Керамзитобетон на кварцовому піску та багатокомпонентному в'язучому (МКВ)										
10	110	150	130	420	480	245	9,8	10,8	1320	С-3 – 0,3...0,5%, гіпс – 25кг/м <sup>3</sup>
15	120	200	150	350	430	266	13,2	16,1	1425	
20	180	150	125	440	360	275	18,6	21,9	1400	
25	240	200	150	350	280	284	25,8	28,5	1450	
Керамзитоперлітобетон на багатокомпонентному в'язучому та кварцовому піску										
5	100	100	160	450	190	225	4,2	5,1	1120	С-3 – 0,3%, гіпс – 20кг/м <sup>3</sup>
7,5	160	150	130	440	210	240	6,3	7,4	1260	
10	190	210	130	520	350	305	8,7	10,4	1370	
12,5	210	200	150	480	475	325	11,7	13,2	1450	
Керамзитобетон на карбонатному піску та цементно-зольному в'язучому										
15	250	90	-	545	572	210	14,5	16,4	1565	С-3 - 0,6%
20	300	120	-	430	725	225	17,6	20,7	1665	
25	350	150	-	505	540	245	21,2	26,6	1690	

Отримані дані по керамзитобетону на карбонатному піску близькі з результатами для керамзитобетону на кварцовому піску і на 15-20%

перевищують значення модуля пружності керамзитобетону на керамзитових пісках. На рис.1 наведена залежність модуля пружності від міцності.

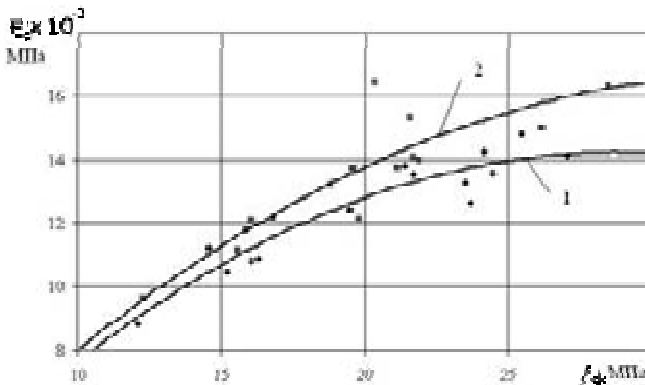


Рис. 1. Залежність модуля пружності від кубикової міцності:  
 1- керамзитобетон на карбонатному піску[3];  
 2 – керамзитобетон на кварцовому піску [5].

З рис.1 слід зауважити, що модуль пружності керамзитобетону на кварцовому піску більший, ніж на карбонатному, і в середньому їх значення відрізняються на 10%. Знижений модуль пружності для деяких видів легких бетонів був наведений також і в роботах інших авторів.

Одним з основних чинників, що впливають на параметричні точки мікротріщиноутворення, є міцність зчеплення між цементним каменем і зернами заповнювача.

З рис. 2 для лінії 1 отримані лінійні залежності напруги осьового стиску від призменної міцності керамзитобетону (5) і (7).

$$R_{cr}^0 / f_{cd} = 0,2618 + 0,08731 \lg(f_{cd}); \quad (6)$$

$$R_{cr}^v / f_{cd} = 0,7629 + 0,05891 \lg(f_{cd}). \quad (7)$$

На рис.2 приведені дані характеристик деформування призм, з яких видно, що напруга осьового стиску для керамзитобетону LC12/15 дорівнює  $R_{cr}^0 = (0,49 - 0,54) f_{cd}$  і для C16/20 -  $R_{cr}^0 = (0,51-0,57) f_{cd}$ . Напруга, яка відповідає початку утворення магістральних тріщин руйнування, дуже близька до призматичної міцності керамзитобетону ( $R_{cr}^v = 0,9 - 0,95 f_{cd}$ ), що і, пояснює крихке руйнування призм.

У справжніх дослідженнях підвищені межі мікротріщиноутворення, дозволяють рекомендувати керамзитобетони, у тому числі і на цементно-зольному в'язучому для конструкцій.

З випробувань на зчеплення арматури з бетоном по залежностях:  
 $\tau_{\text{сц}} = N / \pi d \ell_{\text{зал}}$ ;  $\sigma_0 = N / A_s$ , отримані з 95 % надійністю рівняння регресії

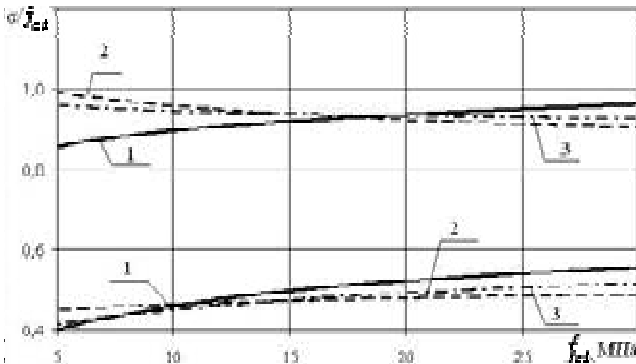


Рис. 2. Залежність верхньої та нижньої межі мікротріщиноутворення керамзитобетону від призменної міцності: 1 – на карбонатному піску та цементно-зольному в'язучому [7]; 2 – на кварцовому піску і МКВ [5]; 3 – на карбонатному піску [3].

руйнуючої напруги зчеплення  $\tau_{\text{сц}}^{\text{II}}$  і  $\tau_{\text{сц}}^{\text{сст}}$  та напруги в арматурі у момент зрушення незавантаженого кінця арматури  $\sigma_0^{\text{II}}$ ,  $\sigma_0^{\text{сст}}$ :

$$\tau_{\text{сц}}^{\text{II}} = 6,884 + 0,638x_1 - 1,38x_2 - 0,242x_1^2 - 0,09x_1x_2 + 0,863x_2^2; \quad (8)$$

$$\tau_{\text{сц}}^{\text{сст}} = 8,117 + 0,837x_1 - 1,645x_2 + 0,02x_1^2 - 0,068x_1x_2 + 0,885x_2^2; \quad (9)$$

$$\sigma_0^{\text{II}} = 170,3 + 57,44x_1 + 103,1x_2 + 3,955x_1^2 + 29,97x_1x_2 + 29,88x_2^2; \quad (10)$$

$$\sigma_0^{\text{сст}} = 195,5 + 60,0x_1 + 129,0x_2 - 1,603x_1^2 + 31,61x_1x_2 + 36,1x_2^2. \quad (11)$$

Із зростанням міцності (класу) бетону  $\tau_{\text{сц,разр}}$  збільшується пропорційно. Для рівних довжин закладення приріст  $\tau_{\text{сц,разр}}$  різне і зменшується із збільшенням закладення.

Для різної міцності керамзитобетону на багатокомпонентному в'язучому пропареного і природного тверднення переміщення незавантаженого кінця, які пропорційні навантаженням, різні, і знаходяться у таких межах: R15 МПа – 8–12 мкм; R20 МПа – 10–15 мкм; R25 МПа – 15–20 мкм.

Дослідні значення усадкових деформацій керамзитобетону природного тверднення склали  $(66,90)10^{-5}$ , при використанні тепловлажностної обробки усадку керамзитобетону на вапняковому піску можна зменшити на 30%.

Повзучість пропареного керамзитобетону на кварцовому піску вище на 18–22,6% значень повзучості керамзитобетону на карбонатному піску.

За результатами експериментальних досліджень з 95% надійністю отримані квадратичні рівняння регресії кубікової та призменної міцності у

віці 28 діб, керамзитоперлітобетону на багатокомпонентному в'язучому і кварцовому піску, які з врахуванням лише значимих коефіцієнтів регресії мають вигляд::

$$f_{ck}(28)=6,99+4,4x_1+1,14x_2 - 0,95x_3+0,45x_1x_2 - 0,46x_1^2+0,54x_2^2+0,29 x_3^2; \quad (12)$$

$$f_{cd}(28)=5,87+4,27x_1+1,14x_2 - 0,93x_3+0,59 x_1x_2 - 0,21 x_2x_3 +0,47x_2^2 +0,42x_3^2. \quad (13)$$

Для спрощення квадратичних рівнянь регресії (12,13), була використана лінійна залежність вигляду::

$$f_{ck}(28)= 24,4 - 17,1[(B/MKB) + r]; \quad (14)$$

$$f_{cd}(28)= 23,5 - 16,8[(BMKB) + r]. \quad (15)$$

В результаті використання регресійного аналізу прийнято лінійне рівняння регресії модуля пружності керамзитоперлітобетону на кварцовому піску і багатокомпонентному в'язучому, яке має вигляд:

$$E_c(28) \cdot 10^{-3}=21,1 - 13,4[(B/MKB) + r]. \quad (16)$$

Отримані дані по керамзитоперлітобетону на багатокомпонентному в'язучому близькі з результатами для керамзитобетону на багатокомпонентному в'язучому та кварцовому піску і на 5-10% менше значення модуля пружності керамзитобетону на карбонатних пісках.

За результатами експериментальних досліджень міцності властивостей кералітобетона з 95% надійністю були отримані квадратичні рівняння регресії кубікової та призмної міцності, модуля пружності, мікротріщиноутворення, граничного стислення, усадки, повзучості у віці 28 діб, для їх спрощення була досліджена і лінійна залежність [6].

$$f_{cd}(28)= 41,3 - 14,7[(B/Ц) + r]. \quad (17)$$

Для встановлення коефіцієнта призмної міцності  $\varphi_c$  були використані дослідні значення контрольованих параметрів  $f_{ck}(28)$ ,  $f_{cd}(28)$ , що дозволило методом найменших квадратів отримати рівняння регресії:

$$\varphi_c=0,933+0,0032 f_{ck}-0,000149 f_{ck}^2. \quad (18)$$

В результаті використання регресійного аналізу було отримано лінійне рівняння регресії модуля пружності кералітобетона яке має вигляд:

$$E_c(28) \cdot 10^{-3}=19,14 - 4,71[(B/Ц3) + r]. \quad (19)$$

Для визначення межі області мікротріщиноутворення кералітобетона на карбонатному піску використовували квадратичні рівняння регресії  $R_{кр}^0(28)$

та  $R_{кр}^V(28)$  у залежності від чинників складу. В результаті вживання регресійного аналізу для кожного з прийнятого віку кералітобетона були отримані лінійні рівняння регресії вигляду:

$$R_{кр}^0(28) = \{0,571 - 0,064(B/C+r)\} f_{cd}; \quad (20)$$

$$R_{кр}^V(28) = \{0,982 - 0,030(B/C+r)\} f_{cd}; \quad (21)$$

Розвиток в часі процесу усадки і повзучості кералітобетона досить достовірний може бути апроксимовано залежністю (22) у будь-який момент часу  $t > 1$ .

$$\epsilon_{кр}(t, \sigma) = \left[ 144,7 \left( \frac{B}{C} + r \right) - 731 \right] \cdot \left[ 1 - e^{-0,0001 \frac{B}{C} + 0,001 t} \right]. \quad (22)$$

Граничне значення міри повзучості у віці 28 діб можна визначити по лінійному рівнянню (23).

$$\sigma(\infty, 28) = 1,317 \left( \frac{B}{C} + r \right)^2; \quad (23)$$

Роботу попередньо-напружених елементів з керамзитобетону на карбонатному піску перевіряли на індустриальних виробач – ребристих плитах покриття, які запроєктовані під навантаження 300кг/м<sup>2</sup>. При порівнянні дослідних навантажень тріщиноутворення з розрахунковими підрахованими відповідно до ДБН В.2.6 -98:2009, помітно хорошу збіжність результатів. Максимальне відхилення склало 8% для ребристих плит. Відносний прогин при нормативному навантаженні склав (1/890.1/640) від розрахункової довжини. Максимальне відхилення прогинів від розрахункових підрахованих при коефіцієнті  $\varphi_{c1} = 0,85$ , складає 15% при середньому значенні 6%.

На Куліндоровському ЗБІ з кералітобетона були виготовлені і випробувані партії стінових каменів, стінових блоків, плит покриття та перекриття.

Середні значення для блоків склали: міцність – 8,3 МПа; кубів та призм, відповідно, 10,6 МПа та 9,7 МПа, модуля пружності – 7650 МПа; коефіцієнта Пуассона – 23; виникнення першої тріщини при 0,92  $N_{разр}$ ; щільність в повітряно-сухому стані -1310 кг/м<sup>3</sup>; у висушеному до постійної ваги – 1140кг/м<sup>3</sup>.

Плити покриття та перекриття – попередньо-напружені, по серії 1.141-1, вип.63, марки П63.15-8Ат-вл, суцільного перетину, з кералітобетона, класу по міцності на тиск – С12/15; щільністю Д1600. Середні результати випробувань: міцність кубикова



$-f_{ck} = 16,3$  МПа, призменна  $-f_{cd} = 14,2$  МПа,  $E_c = 13630$  МПа,  $\rho = 1570$  кг/м<sup>3</sup>. Контрольне руйнующе навантаження  $-q_p^k = 1310$  кг/м<sup>2</sup>, дослідне руйнующе навантаження на 9-тому етапі склало  $q_{\text{разр.}}^{\text{оп}} = 1616$  кг/м<sup>2</sup>, контрольний прогин при контрольному навантаженні  $q_f^k = 593$  кг/м<sup>2</sup> складає  $f_k = 14,8$  мм. Фактичний прогин при контрольному навантаженні  $q_f^k$  склав  $f_k^{\text{оп}} = 7,95$  мм. Перші тріщини з'явилися при навантаженні  $q^{\text{оп}} = 1422$  кг/м<sup>2</sup>.

### **Висновки:**

1. Облік впливу вказаних чинників з достатньою для практики точністю рекомендується здійснювати, використовуючи квадратичні рівняння регресії для сумішей і лінійних рівнянь для бетону.
2. Для оптимізації складів рекомендується використовувати методику комплексного підходу, що враховує технологічні і експлуатаційні вимоги до бетону. Використання золи-виносу і карбонатного піску в легких бетонах є найбільш перспективним способом економного споживання цементу та заповнювачів.
3. Легкі бетони півдня України можуть бути рекомендовані для виготовлення бетонних і залізобетонних конструкцій міцністю 5...30 МПа.

1. Бабич Е.М. Конструкции из легких бетонов на пористых заполнителях. - Киев: "Вища школа", 1988. - 207с. 2. Высоцкий С.А., Смирнов В.П. Экономия портландцемента при изготовлении бетонов с добавкой золы ТЭС.//Бетон и железобетон. - 1987. - №1. 3 Столевич А.С. Керамзитобетон на карбонатном песке в конструкциях жилых и общественных зданий / А.С. Столевич, А.И Костюк, Е.В. Светличная // Обзорная информация: Сер. конструкции жилых и общественных зданий. // Технология индустриального домостроения. - М.: ВНИИТАГ Госкомархитектуры, 1990. - Вып.1. - 56 с. 4. Рекомендации по учету комплекса технологических и эксплуатационных параметров, оптимизирующих свойства конструкционного керамзитобетона на карбонатном песке / НИЛЭП ОИСИ.- М.: Стройиздат, 1989.- 67с. 5. Мади К. Прочностные и деформативные свойства безавтоклавных бетонов на многокомпонентном вяжущем / [К. Мади, С.А. Кравченко, С.С. Макарова, А.С. Столевич.] // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. статей. - Рівне., 2006. - Вип. 14. - С. 90 - 95. 6. Столевич И.А. Костюк А.И. Конструктивные элементы из кералитобетона//Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. № 13 Одеса Зовнішпрекларсєрвіс. 2004. - С. 154-159. 7. Зинченко С.В. Прочностные и деформативные характеристики конструкционного керамзитобетона на цементно-зольном вяжущем / С.В. Зинченко, А.С. Столевич, Е.С. Луцкин // Будівельні конструкції: Міжвід. наук.-техн. зб. наук. праць: статті / НДІБК. - 2009. - №72. - С. 223-231.