

УДК 666.97

## САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНІ ЦЕМЕНТНО-ЗОЛЬНІ БЕТОНИ

## САМОУПЛОТНЯЮЩИЕСЯ ЦЕМЕНТНО-ЗОЛЬНЫЕ БЕТОНЫ

## SELF-COMPACTING CEMENT-ASH CONCRETES

Дворкін О.Л., д.т.н., проф. (Національний університет водного господарства та природокористування)

Дворкин О.Л., д.т.н., проф. (Национальный университет водного хозяйства и природопользования)

Dvorkin O.L., doctor of technical sciences, professor (National university of water management and nature resources use)

В статті досліджено можливість використання золи-виносу різної дисперсності при виготовленні бетонів з покращеними будівельно-технічними властивостями з литих самоущільнювальних пластифікованих бетонних сумішей. Отримано комплекс експериментально-статистичних моделей властивостей литих самоущільнювальних пластифікованих бетонних сумішей, бетонів на їх основі і проведено їх відповідний аналіз.

В статье исследована возможность использования золы-уноса различной дисперсности при изготовлении бетонов с улучшенными строительно-техническими свойствами из литых самоуплотняющихся пластифицированных бетонных смесей. Получен комплекс экспериментально-статистических моделей свойств литых самоуплотняющихся пластифицированных бетонных смесей, бетонов на их основе и проведен их соответствующий анализ.

In article the possibility of fly ash of various dispersion using at the manufacture of concrete with improved construction and technical properties from cast plasticized self-compacting concrete mixes is investigated. The complex of experimental - statistical models of self-compacting cast plasticized concrete mixes properties, concretes based on them is obtained and their corresponding analysis performed.

### Ключові слова:

Бетон, цемент, зола, проектування.

Бетон, цемент, зола, проектирование.

## Concrete, cement, fly-ash, design

Однією з найбільш ефективних ресурсозберігаючих технологій в будівництві є литвева технологія з використанням бетонних сумішей здатних до самоущільнення [1-3]. Її широке застосування при виготовленні бетонних та залізобетонних виробів і конструкцій стало можливим в останні десятиліття завдяки інтенсивному розвитку виробництва та масового застосування ефективних хімічних добавок – суперпластифікаторів.

Однак застосування литвевої технології стримується рядом факторів: литі бетони вимагають підвищеної витрати цементу (порівняно із середньопластичними), схильні до водовідділення і розшарування. Для усунення даних недоліків ефективне використання тонкодисперсних мінеральних добавок. Однією з найбільш перспективних добавок для застосування в литих бетонах є зола - виносу теплових електростанцій.

Метою виконаних досліджень було обґрунтування оптимальних технологічних параметрів використання золи-виносу різної дисперсності при виготовленні бетонів з покращеними будівельно-технічними властивостями з литих самоущільнювальних пластифікованих бетонних сумішей.

У дослідях [4, 5] застосовували портландцемент Кам'янець-Подільського цементного заводу М400, золу-виносу Ладженської ТЕС, кварцовий пісок середньої крупності з родовищ Славутського р-ну Хмельницької обл., гранітний щебінь крупністю 5-20 мм Вирівського кар'єру Рівненської області. У цементно-зольне тісто і бетонні суміші вводили добавку суперпластифікатора «Поліпласт СП-1» (С-3).

Умови планування експериментів при моделюванні властивостей цементно-зольних бетонних сумішей наведено в табл. 1, а експериментально-статистичні моделі в табл. 2.

Таблиця 1

Умови планування експериментів

Фактор, вид		Рівень варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний	Кодований	-1	0	+1	
Водоцементне відношення, В/Ц	X <sub>1</sub>	0,5	0,6	0,7	0,1
Витрата води, В кг/м <sup>3</sup>	X <sub>2</sub>	180	190	200	10
Доля піску в об'ємі піску і щебеню, r <sub>n</sub>	X <sub>3</sub>	0,34	0,41	0,48	0,07
Витрата золи D <sub>з</sub> , кг/м <sup>3</sup>	X <sub>4</sub>	50	150	250	100
Питома поверхня, золи S <sub>з</sub> , см <sup>2</sup> /г	X <sub>5</sub>	2900	3900	4900	1000

У результаті експериментально-статистичної обробки отримано ряд наведених в табл.2 поліноміальних моделей, які характеризують діаметр розпливу стандартного конуса, см ( $y_1$ ), витрату добавки суперпластифікатора (СП), кг/м<sup>3</sup> ( $y_2$ ) необхідну для отримання литої суміші, що здатна до самоущільнення з ОК = 20 ... 25 см, а також параметри, що визначають однорідність і стійкість бетонних сумішей до розшарування: водовідділення, г/л ( $y_3$ ), і розчиновідділення, % ( $y_4$ ). Крім цього отримані поліноміальні моделі об'єму втягнутого повітря, % ( $y_5$ ), міцності на стиск у віці 28 діб. нормального твердіння, МПа ( $y_6$ ) і коефіцієнта ефективності використання цементу ( $y_7$ )  $K_e = R_{ct}/D$  (де  $R_{ct}$  –міцність бетону на стиск в 28 діб, МПа)

Таблиця 2

Експериментально-статистичні моделі властивостей цементно-зольних бетонних сумішей

Показник	Модель
Розплив конуса, см	$y_1 = 45,05 + 3,39X_1 + 1,39X_2 - 2,84X_3 - 0,5X_4 + 2,78X_5 - 3,07X_1^2 - 3,08X_2^2 + 1,9X_3^2 - 1,07X_4^2 + 0,43X_5^2 + 2,25X_1X_4 + 1,13X_2X_5 + 1,12X_3X_4 - 2,25X_3X_5$ (1)
Витрата добавки СП, кг/м <sup>3</sup>	$y_2 = 3,28 - 0,07X_1 - 0,94X_2 - 1,06X_3 + 0,37X_4 + 0,7X_5^2 + 0,25X_3^2 + 0,14X_4^2 - 0,23X_5^2 - 0,24X_1X_2 - 0,25X_1X_4 - 0,32X_1X_5 - 0,17X_3X_5$ (2)
Водовідділення, г/л	$y_3 = 0,37 - 0,35X_1 + 0,51X_2 + 0,75X_3 - 0,56X_4 - 0,45X_5 - 0,15X_1^2 + 0,57X_3^2 - 0,15X_4^2 + 0,23X_5^2 - 0,09X_1X_2 - 0,09X_1X_3 - 0,22X_1X_5 + 0,41X_2X_3 - 0,33X_2X_4 - 0,28X_2X_5 - 0,32X_3X_4 - 0,32X_3X_5 + 0,2X_4X_5$ (3)
Розчиновідділення, %	$y_4 = 5,65 + 0,94X_1 - 2,48X_3 - 0,63X_4 + 1,28X_5 - 0,43X_1^2 - 0,43X_2^2 + 1,37X_3^2 - 1,23X_4^2 - 1,56X_5^2 - 0,48X_1X_2 + 0,46X_1X_4 + 0,7X_1X_5 + 0,56X_2X_3 - 0,56X_2X_4 + 0,81X_3X_5 - 0,53X_3X_5$ (4)
Об'єм втягнутого повітря, %	$y_5 = 0,86 - 0,24X_1 - X_2 + 1,03X_3 - 0,6X_4 + 1,4X_5 - 0,2X_1^2 + 0,91X_2^2 + 0,79X_4^2 + 0,05X_5^2 + 0,53X_1X_3 - 0,54X_1X_5 - 0,65X_2X_5 - 0,34X_3X_4 + 0,41X_3X_5 - 0,59X_4X_5$ (5)
Міцність на стиск в віці 28 діб ( $R_{ct}$ ), МПа	$y_6 = 26,1 - 4,57X_1 - 0,65X_3 + 2,52X_4 - 2,17X_5 + 1,78X_1^2 + 3,68X_2^2 + 2,43X_3^3 - 6,21X_4^2 - 4,71X_5^2 - 1,74X_1X_3 + 1,28X_2X_5 - 0,63X_3X_5$ (6)
Коефіцієнт ефективності використання цементу $K_e$	$y_7 = 0,82 - 0,003X_2 + 0,008X_4 - 0,007X_5 + 0,012X_2^2 + 0,007X_3^2 - 0,019X_4^2 - 0,015X_5^2 - 0,002X_1^2 - 0,005X_1X_2 - 0,0027X_1X_5 + 0,0046X_2X_5 - 0,002X_3X_5$ (7)

Відомо, що гранулометричний склад золи-виносу, який дозволяє компенсувати в бетонних сумішах нестачу зерен, що мають проміжну

крупність між цементом і піском, а також гладка сферична поверхня частинок золи, обумовлюють підвищення легкоукладальності жорстких і пластичних бетонних сумішей. Отримані результати дозволили підтвердити це положення і для самоущільнювальних золовмісних бетонних сумішей. Причому, збільшення вмісту води при незмінних інших факторах призводить до підвищення оптимальної витрати золи. Разом з тим, як впливає з аналізу моделей, вплив витрати золи на легкоукладальність не може розглядатися без урахування її дисперсності.

Аналіз моделей показує, що вплив дисперсності золи на легкоукладальність литих сумішей не може бути оцінено однозначно. Крім витрати золи ( $D_3$ ) на вплив її питомої поверхні позначається В/Ц і частка піску в об'ємі заповнювачів ( $r_n$ ) бетонних сумішей.

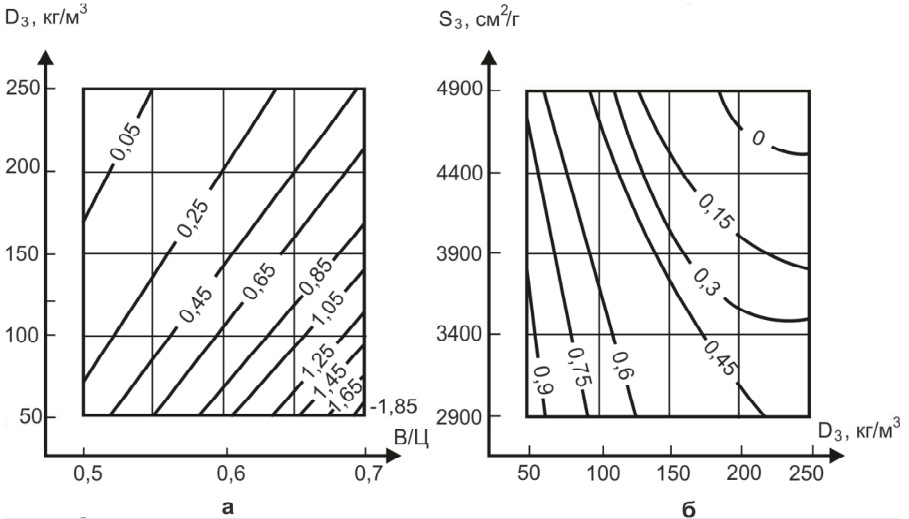
Аналіз математичних моделей дозволяє стверджувати, що збільшення питомої поверхні золи-виносу при її оптимальних витратах і високих значеннях В/Ц сприяє підвищенню легкоукладальності бетонної суміші. Із зменшенням В/Ц позитивний ефект дисперсності золи зменшується. Збільшення дисперсності золи, введеної в оптимальній кількості при максимальній частці піску (в досліджуваних інтервалах), сприяє підвищенню легкоукладальності литих сумішей, при мінімальній частці піску - легкоукладальність погіршується.

До самоущільнювальних бетонних сумішей відносять не всі литі суміші (марки П5), а тільки ті з них розплив конуса яких перевищує 55 см. Як впливає з аналізу моделі (1), досягнення таке значення розпливу конуса при прийнятих вихідних умовах можливе при оптимальному поєднанні технологічних факторів. При цьому поряд зі значеннями вмісту води і водоцементного відношення важливу роль відіграє вибір необхідної витрати і питомої поверхні золи як активного наповнювача бетонної суміші.

Для самоущільнювальних бетонних сумішей найважливішими властивостями, що характеризують їх якість, є водовідділення і розшаровуваність. Аналіз математичної моделі (3) показує, що ефективність добавки золи-виносу зростає із збільшенням її кількості та зі зменшенням В/Ц. При цьому останнє є провідним чинником, що визначає водовідділення (рис.1). Так, при витраті золи 90кг і В/Ц = 0,5 величина водовідділення становить 0,25 г/л, а зі збільшенням В/Ц до 0,7 водовідділення зростає до 1,45 г/л. При В/Ц = 0,7 збільшення  $D_3$  від 50 до 150 кг/м<sup>3</sup> призводить до зменшення водовідділення від 1,85 г/л до 1,05 г/л. Подальше збільшення  $D_3$  до 250 кг/м<sup>3</sup> дозволяє зменшити величину водовідділення до 0,45 г/л.

Позитивний вплив на величину водовідділення литих золовмісних бетонів має, поряд із збільшенням витрати золи, і підвищення її дисперсності (рис. 1). Наприклад, при витраті золи 250 кг з питомою поверхнею 2900 см<sup>2</sup>/г величина водовідділення становить 0,45 г/л, а при збільшенні питомої поверхні до 3900см<sup>2</sup>/г величина водовідділення знижується до 0,15 г/л. Таким чином, чутливість водовідділення до витрати золи істотно зростає в міру

збільшення її питомої поверхні, що обумовлює можливість при підвищеному В/Ц використовувати золю при раціональному дозуванні 150...200 кг/м<sup>3</sup> в якості водоутримуючої добавки в литих бетонних сумішах після її додаткового подрібнення. З аналізу моделі (3) можна також зробити висновок, що на величину водовідділення позитивний вплив від збільшення витрати золи позначається більшою мірою при одночасному збільшенні



**Рис. 1.** Ізолінії водовідділення (г/л) самоущільнювальних бетонних сумішей: **а** -  $V = 190$  кг/м<sup>3</sup>;  $\Gamma_n = 0,41$ ;  $S_3 = 4900$  см<sup>2</sup>/г; **б** -  $V/C = 0,6$ ;  $V = 190$  кг/м<sup>3</sup>;  $\Gamma_n = 0,41$

частки піску в суміші заповнювачів.

Особливістю всіх литих в т.ч. і самоущільнювальних сумішей є можливість внутрішнього і зовнішнього розшарування. Перше обумовлено дією сили тяжіння і зменшується по мірі збільшення в'язкості розчинової частини та зменшення крупності зерен заповнювача [6]. Друге виникає в результаті недостатнього зчеплення щебеню і розчинової складової, що може бути обумовлено надмірно високою в'язкістю останньої або підвищеним вмістом щебеню. На підставі аналізу математичних моделей можна зробити висновок, що добавка золи-виносу чинить позитивний вплив на зниження величини розшаровуваності литої бетонної суміші. При цьому слід зазначити екстремальний характер цього впливу, який можна пояснити тим, що оптимальній витраті золи відповідає деяка оптимальна гранулометрія суміші.

Оптимальні значення витрати золи і її дисперсності різні для мінімізації водовідділення і розшарування литого самоущільнювального золонмісного бетону. Тому вибір оптимальних параметрів витрати золи і її дисперсності,

необхідно здійснювати в деякій компромісній зоні таким чином, щоб вони дозволяли отримати бетонні суміші, що задовольняють всім вимогам.

Повітровтягнення в литих бетонних сумішах є одним з основних факторів, що визначають міцність, однорідність і довговічність бетону. Введення до складу таких сумішей добавок суперпластифікаторів (СП) дозволяє збільшити повітровтягнення до 3%. Однак для цих сумішей характерна швидка втрата втягнутого повітря в наслідок їх низької в'язкості. Використання золи-виносу підвищує в'язкість цементних систем [7], що в свою чергу має сприяти утриманню в литих сумішах з СП втягнутого повітря. Збільшення витрати золи, як слідує з аналізу моделі (5), в досліджуваних інтервалах призводить до зменшення величини повітровтягнення в литих бетонних сумішах. Збільшення дисперсності золи, навпаки, сприяє збільшенню кількості втягнутого повітря. Наприклад, при  $V/\Omega = 0,5$ ;  $V = 180 \text{ кг/м}^3$ ;  $r_n = 0,41$ ;  $S_3 = 3900 \text{ см}^2/\text{г}$  і витраті золи  $50 \text{ кг/м}^3$  об'єм втягнутого повітря становить 3,8 %, при витраті золи  $150 \text{ кг}$  - 2,6 %, а при витраті золи  $250 \text{ кг}$  - 2,15 %, при тих же значеннях  $V/\Omega$  і  $V$ ,  $r_n = 0,48$  і  $D_3=250 \text{ кг/м}^3$  підвищення  $S_3$  з 2900 до  $4900 \text{ см}^2/\text{г}$  призводить до збільшення об'єму втягнутого повітря від 0,9 % до 5,6 %, тобто до такого об'єму, який повинен забезпечувати досить високу морозостійкість бетону. Отже, для досягнення певного повітровтягнення зі збільшенням витрати золи її дисперсність повинна бути відповідно підвищена. Наприклад, при  $D_3=50\text{кг/м}^3$  для забезпечення повітровтягнення 1,05% мінімальна дисперсність золи повинна скласти  $S_3=3500 \text{ см}^2/\text{г}$ , при  $D_3 = 150 \text{ кг/м}^3$  -  $S_3=4050 \text{ см}^2/\text{г}$ , а при  $D_3=250\text{кг/м}^3$  мінімальна дисперсність повинна бути  $4400 \text{ см}^2/\text{г}$ .

Вибір витрати золи для забезпечення необхідного повітровтягнення слід здійснювати з урахуванням не тільки  $S_3$ , а й  $r_n$ . Позитивний вплив на повітровтягнення від підвищення  $S_3$  позначається більшою мірою із збільшенням  $r_n$ . Так, підвищення  $S_3$  з 2900 до  $4900 \text{ см}^2/\text{г}$  при  $r_n = 0,34$  дозволяє досягти повітровтягнення 1,77 %, а при  $r_n = 0,48$  повітровтягнення зростає від 0,71 до 4,42 %. Таким чином, забезпечення необхідного повітровтягнення як і інших властивостей литих бетонних сумішей з добавкою суперпластифікатора при введенні золи-виносу може бути досягнуто шляхом регулювання витрати золи та її дисперсності.

Для аналізу моделей міцності були побудовані діаграми ізорівнів (рис.2). Значення ізорівнів міцності золовмісних само ущільнювальних бетонів наведені в табл. 3. У відповідності з цими діаграмами інтервал можливих значень витрати золи ( $D_3$ ) при підвищенні як міцності бетону, так і його водоцементного відношення при незмінній міцності звужується. Так, для отримання золовмісного бетону з міцністю в 28 - добовому віці 25,6 МПа при  $V/\Omega = 0,5$  кількість введеної золи може коливатися від 78 до 250 кг, а для бетону з міцністю 29,2 МПа, при тому ж водоцементному відношенні, можливі значення витрати золи знаходяться в інтервалі 118-222 кг. Для

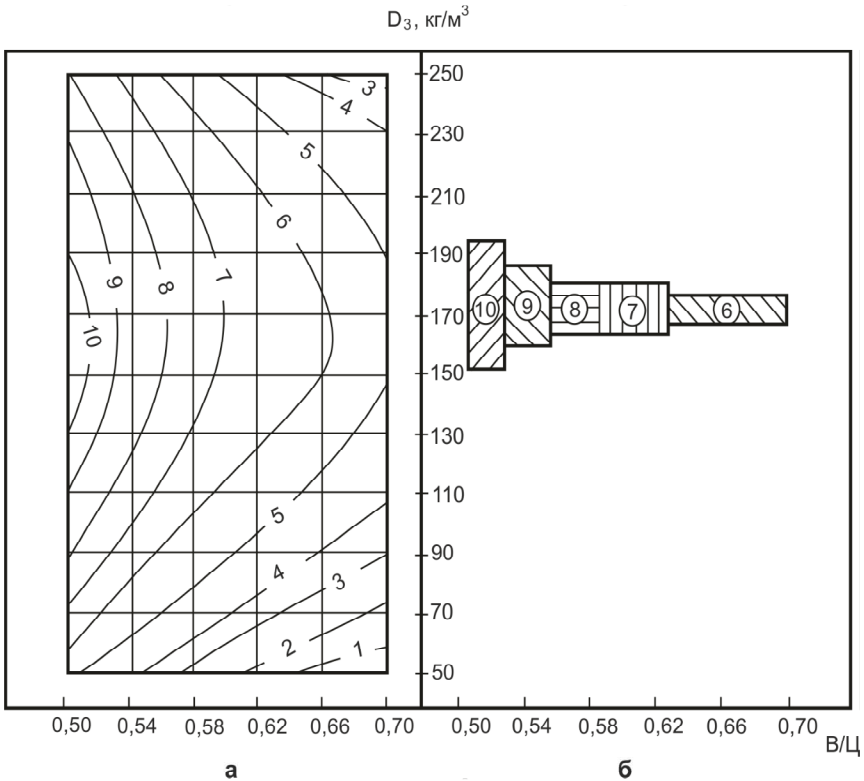


Рис. 2. Діаграма ізорівнів міцності самоущільнювальних золовмісних бетонів: **а** - при  $V = 190 \text{ кг/м}^3$ ,  $r_n = 0,41$ ; **б** - оптимальних значення витрати золи (значення міцності в МПа для кожного ізорівня наведено в табл.3.)

досягнення однакової рухомості бетонної суміші при зміні витрати золи потрібно коригувати витрату СП.

Таблиця 3

Ізорівні міцності золовмісних самоущільнювальних бетонів.

Номер ізорівня (рис.2)	Міцність бетону, МПа при $S_3, \text{ см}^2/\text{г}$			Номер ізорівня (рис.2)	Міцність бетону, МПа при $S_3, \text{ см}^2/\text{г}$		
	2900	3900	4900		2900	3900	4900
1	12,8	15,4	8,5	6	21,9	24,5	17,6
2	14,7	17,2	10,3	7	23,7	26,3	19,4
3	16,5	19,0	12,1	8	25,6	28,1	21,2
4	18,3	20,8	13,9	9	26,9	29,9	23,0
5	20,1	22,6	15,7	10	29,2	31,7	24,8

На практиці, оптимальну витрату золи можливо призначати сталою в усьому діапазоні міцності бетону. Її можна знайти аналітично з моделі (6), визначивши частинну похідну по  $X_4$ :  $dy_6/dx_4 = 2,52 - 12,4 X_4$ . Для прийнятих умов  $X_{4\text{ опт}} = 0,2$  тобто  $D_3 = 170 \text{ кг/м}^3$

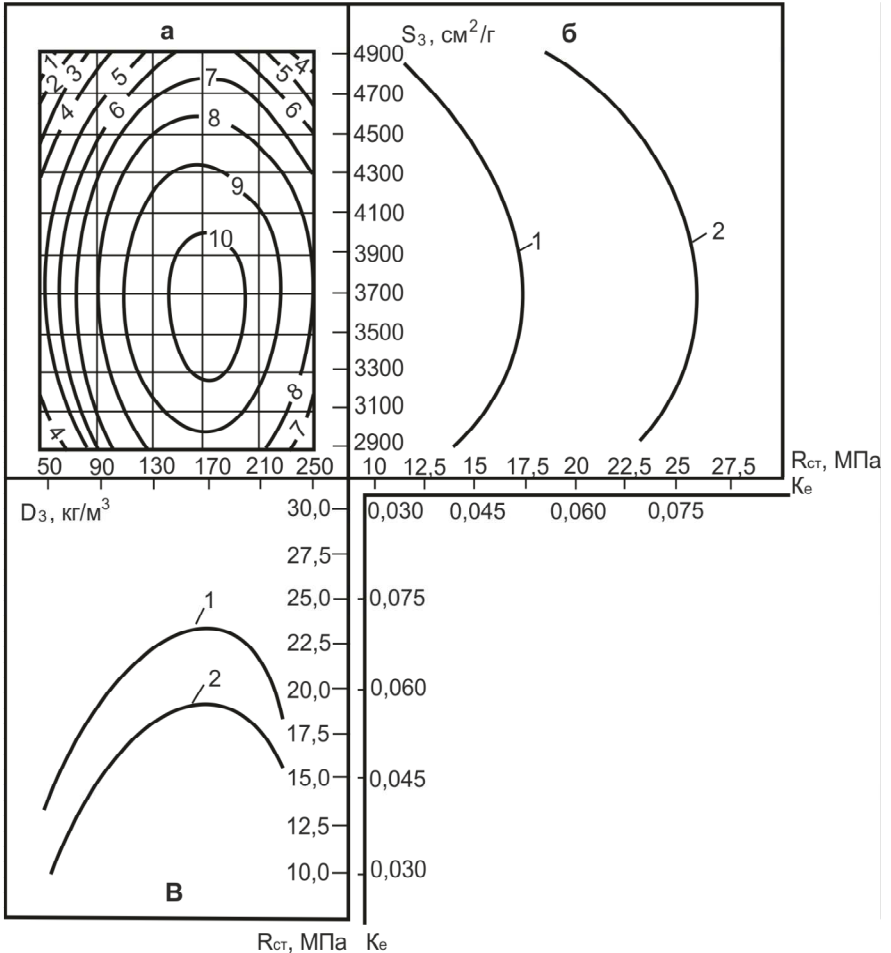


Рис. 3. Поєднана діаграма міцності ( $R_{ct}$ ) і коефіцієнта ефективності ( $K_e$ ) використання цементу для самоущільнювальних золовмісних бетонів:

**а** - при В/Ц = 0,6; **в** -  $D_3 = 190 \text{ кг/м}^3$ ,  $r_{II} = 0,41$ ; **б** - при: 1 -  $D_3 = 50 \text{ кг/м}^3$ ; 2 -  $D_3 = 150 \text{ кг/м}^3$ , **в** - 1 -  $S_3 = 290 \text{ м}^2/\text{кг}$ ; 2 -  $S_3 = 490 \text{ м}^2/\text{кг}$



Характер впливу дисперсності золи на міцність бетонів та розчинів залежить від сукупності факторів: вихідної рухомості, водов'язучого відношення, пустотності заповнювачів, виду застосовуваної золи, умов тверднення бетону та ін. З одного боку, збільшення дисперсності золи повинно призводити до збільшення її хімічної активності, що чинить позитивний вплив на зростання міцності бетону. З іншого боку, збільшення дисперсності золи викликає збільшення кількості втягнутого повітря бетонної суміші й в'язкості розчинової складової. Остання при досягненні значень вище допустимих призводить до зовнішнього розшарування. Слід врахувати, що на міцність бетону впливає гранулометричний склад вихідних компонентів. Надмірне збільшення вмісту дрібних фракцій золи може призвести до розуцільнення литого бетону [8].

Аналіз моделі міцності (6) показує, що при постійних В/Ц і витраті золи вплив її дисперсності на міцність литого бетону носить екстремальний характер (рис. 3). На відміну від оптимального значення витрати золи її оптимальна дисперсність залежить від витрати води і частки піску в суміші заповнювачів. Аналітичне вираження для оптимальної питомої поверхні при прийнятих умовах моделювання виявилось рівним:

$$X_{5 \text{ опт.}} = (1,28 X_2 - 0,63 X_3 - 2,17) / 9,42 \quad (8)$$

Витрата цементу в литих золівмісних бетонах, що здатні до самоуцільнення при оптимальних значеннях витрати золи і її дисперсності суттєво знижується. Наприклад, для досягнення литим бетоном з добавкою СП без золи міцності в віці 28 діб  $R_{ct} = 31$  МПа при  $V = 180 \text{ кг/м}^3$ ;  $V/C = 0,5$  і  $r_n = 0,43$ , витрата цементу складає  $360 \text{ кг/м}^3$ . Цю ж міцність бетон досягає при витраті цементу  $300 \text{ кг/м}^3$  і золи  $150 \text{ кг/м}^3$  з питомою поверхнею  $2900 \text{ см}^2/\text{г}$ . Отже, економія цементу складає  $60 \text{ кг}$  на  $1 \text{ м}^3$  литого бетону.

Отримані експериментальні та розрахункові дані свідчать про можливість за рахунок введення оптимальної кількості золи-виносу до складу литих бетонів скоротити витрату цементу на 17...20% при одночасному забезпеченні заданої міцності. Подрібнення золи-виносу до оптимальної питомої поверхні дозволяє досягти додаткової економії цементу в кількості 5...8 %.

Для оптимізації складів золівмісних бетонів запропонована методика, в основу якої покладено критерій ефективності ( $K_e$ ) використання цементу (питома міцність на одиницю витрати цементу). Аналіз математичної моделі (7) і побудованої діаграми (рис. 3), що є графічним виразом математичної моделі залежно від змінних  $D_3$  і  $S_3$ , дозволяє відзначити, що вплив як витрати, так і дисперсності золи на цей критерій носить екстремальний характер. Відомо, що для помірно рухливих бетонів у віці 28 діб  $K_e$  складає

0,065 ... 0,085. Введення золи до складу таких бетонів сприяє зростанню  $K_c$  до 0,067 ... 0,12. Отримані результати вказують на можливість досягнення  $K_c$  самоущільнювальних золовмісних бетонів з добавкою СП таких же максимальних значень, як і для помірно рухломих золовмісних бетонів.

Таким чином, експериментально обґрунтована можливість отримання цементно-зольних бетонів з покращеними експлуатаційними властивостями на основі литих сумішей, що здатні до самоущільнення при введенні добавки суперпластифікатора, забезпеченні необхідної дисперсності золи-виносу і оптимальних параметрах їх складу.

1. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л. Основи бетонознавства. Основа, Київ, 2007, 613 с.
2. Баженов Ю.М. Технологія бетона. – М.: Высшая школа, 1987. – 449 с.
3. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. – М.: Изд-во АСВ, 2006. – 368 с.
4. Дворкин Л.И., Соломатов В.И., Выровой В.Н., Чудновский С.М. Цементные бетоны с минеральными наполнителями. К.: Будівельник, 1991, 136 с.
5. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л. Эффективные цементно-зольные бетоны. Евен, Рівне, 1998, 196 с.
6. Дворкин Л.И., Кизима В.П. Эффективные литые бетоны. Львов, Вища школа, 1986, 144 с.
7. Кокубу И.М., Ямада Д. Цементы с добавкой золы // Шестой международный конгресс по химии цемента. - М.: Стройиздат, 1976. - Т.3. - С83-94.
8. Люр Х.П., Эфас Я. Влияние гранулометрического состава зол с низкими потерями при прокаливании на рост прочности бетона // Шестой международный конгресс по химии цемента. - М.: Стройиздат, 1976. - Т.3. - С. 103-112