УДК 666.97

Дворкін Л. Й.

Дворкін О. Л.

Дворкін Л. Й., доктор техн. наук, професор,
Дворкін О. Л., доктор техн. наук, професор,
Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

ЦЕМЕНТНО-ЗОЛЬНІ БЕТОНИ З САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ СУМІШЕЙ

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.

Однією з найбільш ефективних ресурсозберігаючих технологій в будівництві є литтєва технологія з використанням бетонних сумішей здатних до самоущільнення [1-5]. 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 литтєвої технології стримується рядом факторів: литі бетони вимагають підвищеної витрати цементу (порівняно із середньопластичними), вони 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 дослідах застосовували портландцемент Кам'янець-Подільського цементного заводу М400, золу-виносу Ладиженської 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.

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^3 (y_2) необхідну для отримання литої суміші, що здатна до самоущільнення, 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 втягненого повітря, % (y_5), міцності на стиск у віці 28 діб. нормального твердіння, МПа (y_6) і коефіцієнта ефективності використання цементу (y_7) $K_e = R_{ст}/Ц$ (де $R_{ст}$ –міцність бетону на стиск в 28 діб, МПа, Ц – витрата цементу, кг/м^3)

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 випливає 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.

Таблиця 1.

Умови планування експериментів

Фактор, вид		Рівень варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний	Кодований	-1	0	+1	
Водоцементне відношення, В/Ц	X_1	0,5	0,6	0,7	0,1
Витрата води, В кг/м^3	X_2	180	190	200	10
Доля піску в об'ємі піску і щебеню, r_n	X_3	0,34	0,41	0,48	0,07
Витрата золи D_3, кг/м^3	X_4	50	150	250	100
Питома поверхня, золи S_3, см^2/г	X_5	2900	3900	4900	1000

Таблиця 2.

Експериментально-статистичні моделі для самоущільнюваних бетонів

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/м³	$y_2 = 3,28-0,07X_1-0,94X_2-1,06X_3+0,37X_4+0,7X_2^2+0,25X_3^2+0,14X_4^2-0,23X_5^2-0,24X_1X_2-0,25X_1X_4-0,32X_1X_5-0,17X_3X_5$	(2)
Водовідділення, г/л	$y_3 = 0,37-0,35X_1+0,51X_2+0,75X_3-0,56X_4-0,45X_5-0,15X_1^2+0,57X_3^2-0,15X_4^2+0,23X_5^2-0,22X_1X_5+0,41X_2X_3-0,33X_2X_4-0,28X_2X_5-0,32X_3X_4-0,32X_3X_5+0,2X_4X_5$	(3)
Розчиновідділення, %	$y_4 = 5,65+0,94X_1-2,48X_3-0,63X_4+1,28X_5-0,43X_1^2-0,43X_2^2+1,37X_3^2-1,23X_4^2-1,56X_5^2-0,48X_1X_2+0,46X_1X_4+0,7X_1X_5+0,56X_2X_3-0,56X_2X_4+0,81X_3X-0,53X_3X_5$	(4)
Об'єм втягненого 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 ($R_{ст}$), 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)

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 випливає з аналізу моделі (1), досягнення такого 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 на водовідділення зростає з 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/м³ призводить до зменшення водовідділення від 1,85 г/л до

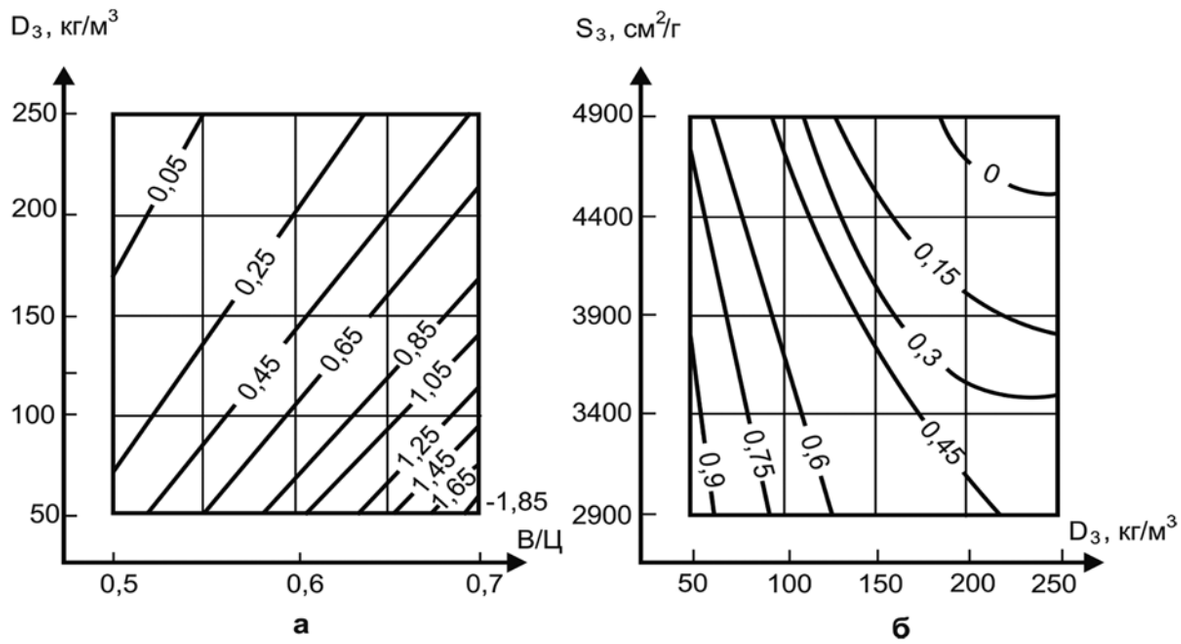

Рис. 1. Ізолінії водовідділення (г/л) самоущільнювальних бетонних сумішей:
а – В = 190 кг/м³; $r_п$ = 0,41; S_3 = 4900 см²/г; б – В/Ц = 0,6; В = 190 кг/м³; $r_п$ = 0,41

1,05 г/л. Подальше збільшення D_3 до 250 кг/м³ 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 см²/г величина водовідділення становить 0,45 г/л, а при збільшенні питомої поверхні до 3900 см²/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 золу при раціональному дозуванні 150...200 кг/м³ в якості водоутримуючої добавки в литих бетонних сумішах при її достатньо високій питомій поверхні. З аналізу моделі (3) можна також зробити висновок, що на величину водовідділення позитивний вплив від збільшення витрати золи позначається більшою мірою при одночасному збільшенні 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 золовмісного 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 втягненого 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 втягненого 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 втягненого повітря.

Наприклад , при В/Ц = 0,5 ; В = 180 кг/м³; r_n = 0,41 ; S_3 = 3900 см²/г і витраті золи 50 кг/м³ об'єм втягненого повітря становить 3,8 % , при витраті золи 150 кг – 2,6 % , а при витраті золи 250 кг – 2,15 % , при тих же значеннях В/Ц і В ,r_n = 0,48 і D_3 = 250 кг/м³ підвищення S_3 з 2900 до 4900 см²/г призводить до збільшення об'єму втягненого 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 кг/м³ для забезпечення повітровтягнення 1,05% мінімальна дисперсність золи повинна скласти S_3 = 3500 см²/г, при D_3 = 150 кг/м³ – S_3 = 4050 см²/г, а при D_3 = 250 кг/м³ мінімальна дисперсність повинна бути 4400 см²/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 см²/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 самоущільнювальних 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 В/Ц = 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 досягнення однакової рухомості бетонної суміші при зміні витрати золи потрібно коригувати витрату СП.

Для прийнятих умов оптимальну витрату золи можна знайти аналітично з моделі (6), визначивши похідну по X_4: $dy_6/dX_4 = 2,52 – 12,4 X_4$. $X_{4\,опт} = 0,2$ тобто D_3 =170 кг/м³

Характер впливу дисперсності золи на міцність бетонів та розчинів залежить від сукупності факторів: вихідної рухомості, водов'яжучого 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 втягненого 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 розущільнення литого бетону [8].

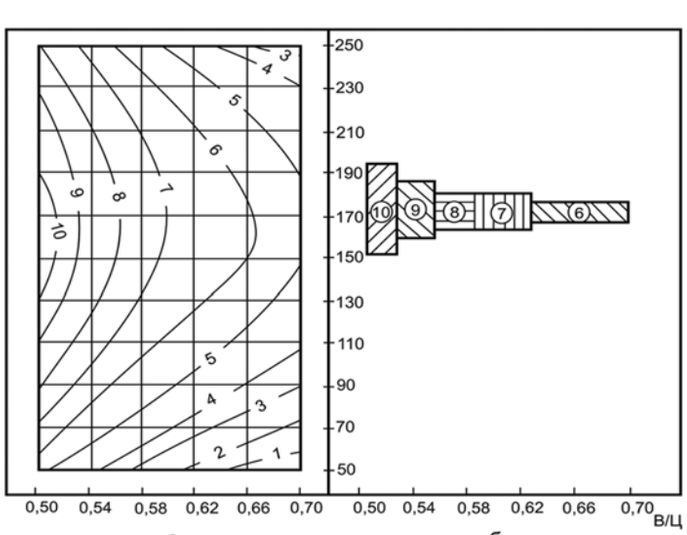

Рис. 2. Діаграма ізорівнів міцності самоущілюнювальних золовмісних бетонів: а – при В = 190 кг/м³, r_n = 0,41; б – оптимальних значеннях витрати золи (значення міцності в МПа для кожного ізорівня наведено в табл. 3)

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 опти-

Таблиця 3.

Ізорівні міцності золовмісних самоущілюнювальних бетонів

Номер ізорівня (рис.2)	Міцність бетону, МПа при $S_з$, см²/г			Номер ізорівня (рис.2)	Міцність бетону, МПа при $S_з$, см²/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

мальної питомої поверхні при прийнятих умовах моделювання виявилося рівним:

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

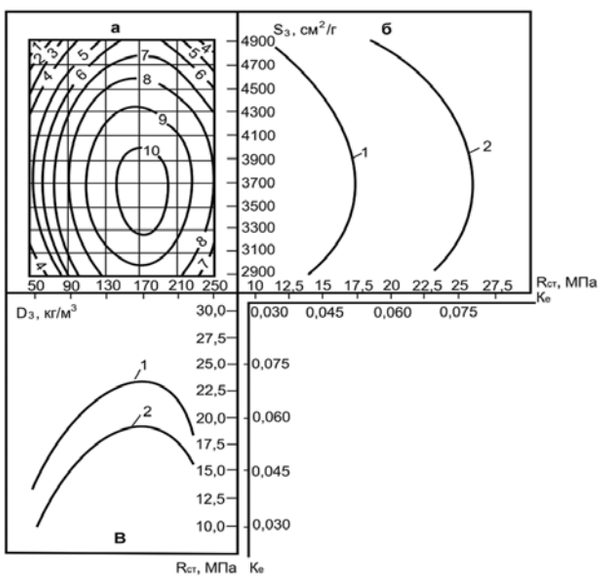

Рис. 3. Поєднана діаграма міцності ($R_{ст}$) і коефіцієнта ефективності (K_e) використання цементу для самоущільнювальних золовмісних бетонів:
а – при В/Ц = 0,6; В = 190 кг/м³, $r_п$ = 0,41;
б – при: 1 – $D_з$ = 50 кг/м³; 2 – D3 = 150 кг/м³,
в – 1 – $S_з$ = 290 м²/кг; 2 – $S_з$ = 490 м²/кг

Витрата цементу в литих золовмісних бетонах, що здатні до самоущільнення 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 $R_{ст}$ = 31 МПа при В = 180 кг/м³; В/Ц = 0,5 і $r_п$ = 0,43, витрата цементу складає 360 кг/м³. Цю ж міцність бетон досягає при витраті цементу 300 кг/м³ і золи 150 кг/м³ з питомою поверхнею 2900 см²/г. Отже, економія цементу складає 60 кг на 1 м³ литого бетону.

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

Для оптимізації складів золовмісних 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 $D_з$ і $S_з$, дозволяє відзначити, що вплив як витрати, так і дисперсності золи на цей критерій носить екстремальний характер. Відомо, що для бетонів з помірно рухомих сумішей у віці 28 діб K_e складає 0,065 ... 0,085. Введення золи до складу таких бетонів сприяє зростанню K_e до 0,067 ... 0,12. Отримані результати вказують на можливість досягнення K_e самоущільнювальних золовмісних бетонів з добавкою СП таких же максимальних значень, як і для золовмісних бетонів з помірно рухомих сумішей.

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.

Література:

1. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л. Основи бетонознавства. Основа, Київ, 2007, 613 с.

2. Баженов Ю.М. Технология 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