



Дворкін Л. Й.

Дворкін Л. Й., доктор технічних наук, професор, зав. кафедрою технології будівельних виробів і матеріалознавства, ✉ dvorkin.leonid@gmail.com, Національний університет водного господарства та природокористування, вул Соборна, 11, м. Рівне, 33028,

L. Dvorkin, doctor of technical Science, professor, Head of Department «Technology of Building Products and Material Science», ✉ dvorkin.leonid@gmail.com, National University of Water Management and Nature Resources Use, st. Soborna, 11, Rivne, 33028

ЕФЕКТИВНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ

ЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ

EFFICIENT TECHNOLOGY OF HIGH STRENGTH CONCRETE

Анотація. В статті наведені результати досліджень ефективності добавок суперпластифікаторів та їх композицій з мікрокремнеземом та метакаолином, а також прискорювачами твердіння при отриманні високоміцних бетонів. Розглянута можливість застосування у виробництві високоміцних бетонів, композиційних золотісних цементів і в якості заповнювача гранітних відсівів, що містять значну кількість фракції < 0,16 мм.

Наведені формули для розрахунку складів високоміцних бетонів з врахуванням тривалості та температури твердіння.

Ключові слова: високоміцний бетон, суперпластифікатор, прискорювач твердіння, метакаолин, композиційний цемент, гранітний відсів.

Аннотация. В статье приведены результаты исследований эффективности добавок супер-пластификаторов и их композиций с микрокремнеземом и метакаолином, а также ускорителями твердения при получении высокопрочных бетонов. Рассмотрена возможность применения в производстве высокопрочных бетонов, композиционных золосодержащих цементов и в качестве заполнителя гранитных отсеков, содержащих значительное количество фракции <0,16 мм.

Приведены формулы для расчета составов высокопрочных бетонов с учетом продолжительности и температуры твердения.

Ключевые слова: высокопрочный бетон, суперпластификатор, ускоритель твердения, метакаолин, композиционный цемент, гранитный отсев.

Annotation. The article presents the results of studies of the effectiveness of additives of superplasticizers and their compositions with silica fume and metakaolin, as well as a hardening accelerators in the producing of high-strength concrete. The possibility of use in the production of high-strength concrete, composite ash-containing cements and as a aggregate of granite screenings containing a significant amount of fraction <0.16 mm is considered.

The formulas for calculating the compositions of high-strength concretes, taking into account the duration and temperature of hardening are given.

Keywords: high-strength concrete, superplasticizer, hardening accelerator, metakaolin, composite cement, granite screenings.

Національним стандартом України на Правила проектування залізобетонних конструкцій з важкого бетону (ДСТУ БВ.2.6-156:2010) передбачено можливість застосування бетону з максимальним класом за міцністю C50/60, що відповідає найближчій марці 800.

Згідно Європейських норм EN206-1:2013 допускається застосовувати важкі бетони з максимальним класом C100/115, середня кубкова міцність яких досягає 150 МПа.

В останні роки у всіх індустріально розвинених країнах розширюється виробництво високоміцного бетону з міцністю на стиск вище 60 МПа, що дозволяє суттєво знизити матеріалоемність і підвищити довговічність споруд. З 1965 р. на даний час міцність бетону у Європейських країнах збільшилась в 2...2,5 рази. В Україні цей процес поки відбувається значно повільнішими темпами.

Класична технологія високоміцних бетонів, що була розроблена у другій половині ХХ-го століття передбачає виконання ряду умов, що впливають з теоретичних основ формування відповідної структури бетону. Головні з цих умов – застосування цементів з високою активністю і висококондиційних заповнювачів, а також забезпечення гранично низьких значень водоцементного відношення. Реалізація даних умов при традиційній технології бетону є однак достатньо складною [1-3].

Незважаючи на те, що виробництво високоміцних і надшвидкотверднучих цементів марок 600 і вище освоєно цементною промисловістю, воно не отримало значного поширення, головним чином внаслідок високої енергоемності, що обумовлено необхідністю використання високоякісного клінкеру і суттєвого підвищення тонкості помелу цементу. Забезпечення

достатньо низьких значень водоцементного відношення особливо при застосуванні рядових за активністю цементів вимагає надмірного збільшення витрат цементу, зменшення легкоукладальності бетонних сумішей, застосування спеціальних методів їх ущільнення та іш.

Подолання цих труднощів стало можливим завдяки роботі і широкому застосуванню в практиці виробництва бетону ефективних суперпластифікуючих добавок з водоредукуючим ефектом до 20...30% і високоактивних мінеральних добавок, зокрема мікрокремнезему. Це дає змогу випускати не тільки бетон з міцністю до 130...150 МПа в 28 добовому віці, а і суттєво підвищувати ранню міцність бетону, покращити легкоукладальність бетонної суміші. В Європейських країнах і США набувають поширення ефективні різновиди високоміцних бетонів т.зв. самоущільнювальний бетон, (Self-compacting concrete) і високофункціональний бетон (High Performance concrete) [2].

Наші дослідження були направлені на розробку технологічних параметрів виробництва високоміцних швидкотверднучих бетонів на характерних для України рядових цементях, природної та техногенної сировині і доступних хімічних добавках. В повній мірі вони відображені в монографії [4].

Для бетонів застосовувався типовий середньоалюмінатний цемент Здолбунівського заводу М500, кварцовий пісок з $M_{кр} = 1.8$ і гранітний щебінь 5...20 мм. Найбільший водоредукуючий ефект і відповідно ефект збільшення міцності характерний при введенні добавок полікарбоксилатного типу.

Порівняльний вплив добавок суперпластифікаторів різних видів на водоредукуючий ефект в бетонних сумішах з по-

чатковим В/Ц = 0,35 та ОК = 0,5...20 см і міцність при стиску у ранньому віці(12 год – 1 доба) приведений в табл.1.

Підвищення міцності цементного каменю і відповідно бетону, особливо ранньої міцності при низьких В/Ц сильно залежить від ступеня гідратації цементу.

Останній можна підвищувати збільшенням питомої поверхні цементу(табл.2). Менш енергоємним способом підвищення ступеню гідратації цементу і відповідно міцності вже через 12 год твердіння є введення добавок прискорювачів твердіння поряд з добавками суперпластифікаторів (табл. 3, рис 1-3).

При введенні полікарбоксилатного суперпластифікатора «Melflux» в комплексі з деякими добавками серії «Релаксол», що виготовляються в Україні, відзначена можливість вже через 12 год досягти міцності бетону при В/Ц = 0,25 до 58 МПа, що становить 50% 28 добової міцності. Через 1 добу міцність бетону на стиск зростає до 70%, а через 7 дів практично до 100% (рис.1-3). В подальшому до 180 дів суттєвого зростання міцності не відзначено, але не спостерігається і зменшення міцності. Характерно, що наведені дані отримані для бетонних сумішей з ОК = 20 см.

Таблиця 1.

Порівняльна ефективність добавок пластифікаторів

Добавка	Витрата пластифікатору, % від маси цементу (на суху речовину)	Водоредукуюча здатність, %		Усереднене збільшення ранньої міцності, %	
		цементне тісто	бетонна суміш	цементний камінь	бетон
ЛСТ	0,2	7...10	8...12	8...14	10...15
Sika Plastiment BV-60	0,3	9...11	10...12	9...18	10...20
С-3	0,35	10...13	12...15	10...22	10...20
	0,5	15...16	16...18	16...31	15...30
	0,7	18...21	18...20	32...48	29...49
Mapei Dynamon SP3	0,2	28...31	30...35	40...58	42...60
	0,35	39...42	40...45	55...85	60...90
Mapei Dynamon SR3	1	20...25	22...28	40...55	38...52
	1,5	26...32	30...35	40...58	38...55
Melflux	0,5	30...32	30...35	42...63	40...60
	1	38...42	40...45	60...90	57...89

Таблиця 2.

Вплив домену цементу та його типу на ступінь гідратації і міцність цементного каменю

№ з/п	В/Ц	Питома поверхня цементу, м ² /кг (S _{пшт})	Ступінь гідратації (α) / міцність цементного каменю, МПа, через				
			години	добы			
			12	1	2	7	28
Портландцемент ПЦ І							
1	0,2	350	0,19 / 29,3	0,28 / 64,7	0,33 / 88,2	0,36 / 103,2	0,41 / 129,4
2	0,2	450	0,31 / 78,5	0,39 / 118,8	0,41 / 129,4	0,45 / 151	0,47 / 162
3	0,25	350	0,22 / 24,8	0,3 / 47,7	0,35 / 64,7	0,4 / 83,3	0,46 / 107,3
4	0,25	450	0,35 / 64,7	0,41 / 87,2	0,46 / 107,3	0,51 / 128,3	0,55 / 145,5
5	0,3	350	0,23 / 18,3	0,34 / 42,4	0,41 / 61,7	0,49 / 86,6	0,58 / 117
6	0,3	450	0,37 / 50,4	0,45 / 73,8	0,55 / 106,6	0,61 / 127,6	0,65 / 141,9
Портландцемент ПЦ ІІ/А							
1	0,2	350	0,18 / 29,0	0,26 / 63,2	0,31 / 86,8	0,34 / 101,1	0,40 / 127,5
2	0,2	450	0,30 / 78,2	0,38 / 117,3	0,39 / 128,8	0,42 / 151,5	0,46 / 160,8
3	0,25	350	0,20 / 21,6	0,27 / 44,1	0,31 / 60,9	0,35 / 78,4	0,41 / 100,1
4	0,25	450	0,34 / 62,4	0,39 / 86,6	0,45 / 104,9	0,48 / 126,1	0,52 / 145,9
5	0,3	350	0,24 / 16,1	0,35 / 40,7	0,41 / 57,6	0,48 / 83,5	0,56 / 112,3
6	0,3	450	0,36 / 48,0	0,45 / 71,5	0,56 / 105,9	0,60 / 125,1	0,66 / 138,1

Таблиця 3.

Вплив водоцементного відношення і введення добавки-прискорювача твердіння на ступінь гідратації і міцність цементного каменю

№ з/п	В/Ц	Ступінь гідратації (α) / міцність цементного каменю, МПа, через				
		години	добы			
		12	1	2	7	28
без прискорювача						
1	0,25	0,22 / 24,8	0,3 / 47,7	0,35 / 64,7	0,4 / 83,3	0,46 / 107,3
2	0,3	0,23 / 18,3	0,34 / 42,4	0,41 / 61,7	0,49 / 86,6	0,58 / 117
Нітрат кальцію (1,5% маси цементу)						
3	0,25	0,30 / 64,5	0,34 / 73,5	0,40 / 81,4	0,45 / 89,8	0,52 / 115,5
4	0,3	0,35 / 57,1	0,41 / 60,1	0,46 / 67,8	0,52 / 79,9	0,61 / 104,5

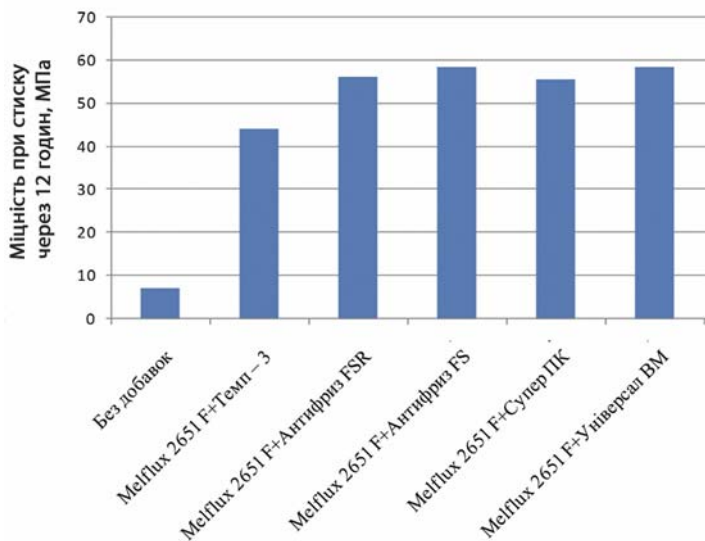


Рис. 1. Міцність бетону при стиску через 12 год залежно від впливу добавок-прискорювачів у поєднанні з суперпластифікатором Melflux

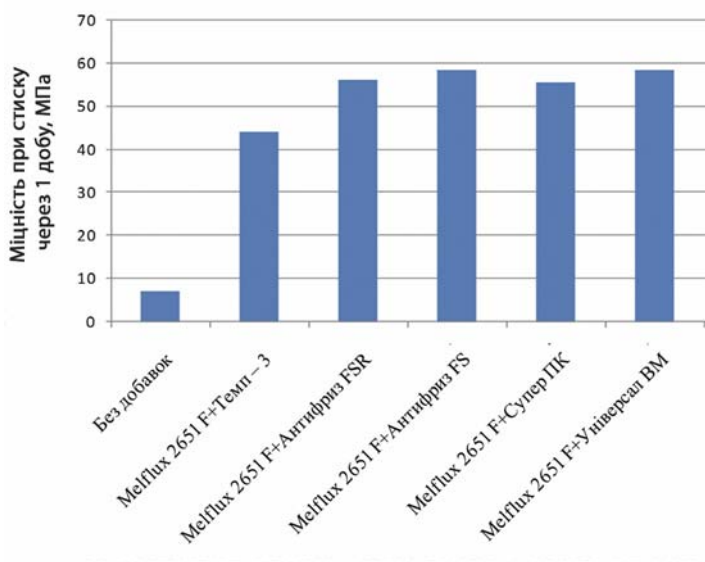


Рис. 2. Міцність бетону при стиску через 1 добу залежно від впливу добавок-прискорювачів у поєднанні з суперпластифікатором Melflux

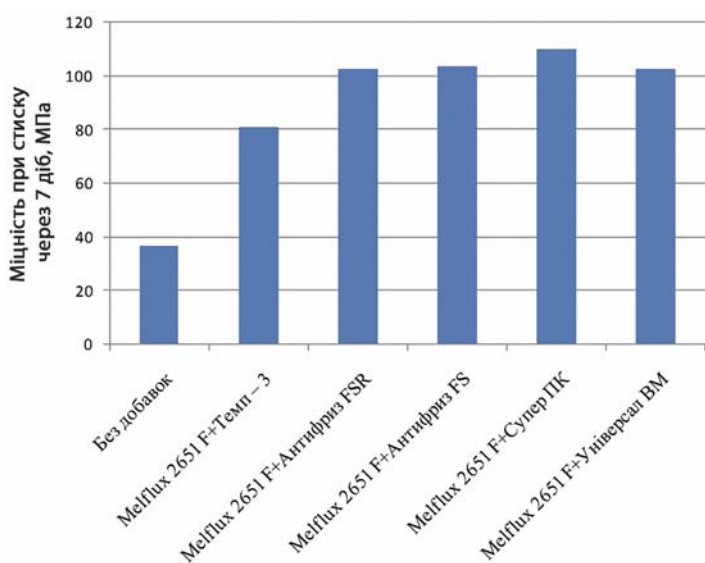


Рис. 3. Міцність бетону при стиску через 7 днів залежно від впливу добавок-прискорювачів у поєднанні з суперпластифікатором Melflux

Суперпластифікатори останнього покоління на основі полікарбоксилатних ефірів, які найбільш ефективні для високоміцних швидкотверднучих бетонів є поки достатньо дорогими. Їх вартість в бетоні співставима з вартістю цементу. Тому практичне значення має зменшення добавки за рахунок поєднання полікарбоксилатного суперпластифікатора з іншими більш дешевими пластифікуючими ПАР. В результаті експериментів, алгоритмізованих у відповідності до плану «склад-технологія-властивості»[5], отримані математичні моделі осадки конусу, пластифікуючого та водоредукуючого ефектів, а також міцності бетону в 1 та 28 добовому віці, які дозволяють проектувати комплексні добавки в системах, що включають поряд з «Melflux» більш дешеві пластифікатори ЛСТ і С-3, забезпечуючи необхідний рівень модифікування бетонних сумішей та бетону.

Таблиця 4.

Значення приросту міцності бетонної суміші з врахуванням водоредукуючого ефекту (ВРЕ) пластифікуючих добавок

Добавки суперпластифікаторів (СП)	Співвідношення за масою	Водоредукуючий ефект ВРЕ, %	Збільшення міцності бетону на стиск	
			Δf_{c^1} , %	$\Delta f_{c^{28}}$, %
С-3	-	15,22	52,49	24,55
Melflux	-	31,30	51,72	43,18
ЛСТМ+С-3	1:1	19,57	30,78	15,60
ЛСТМ+Melflux	1:1	32,61	50,44	28,57
С-3+Melflux	1:1	28,26	53,87	46,08
ЛСТМ+С-3+Melflux	1:1:1	30,43	47,50	40,86

Примітки:

- Загальний вміст добавки 0,5% від маси цементу.
- Δf_{c^1} і $\Delta f_{c^{28}}$ – відповідно збільшення одно- та 28 добової міцності бетону на стиск ($V/C=0,3$).

Збільшення ефекту суперпластифікаторів з одночасним покращенням властивостей бетонних сумішей і зокрема збільшення їх т.зв. життєздатності та стійкості до розшарування досягаються застосуванням високодисперсних кремнеземистих і алюмокремнеземистих добавок. В Європейських країнах з цією метою все ширше застосовуються добавки мікрокремнезему.

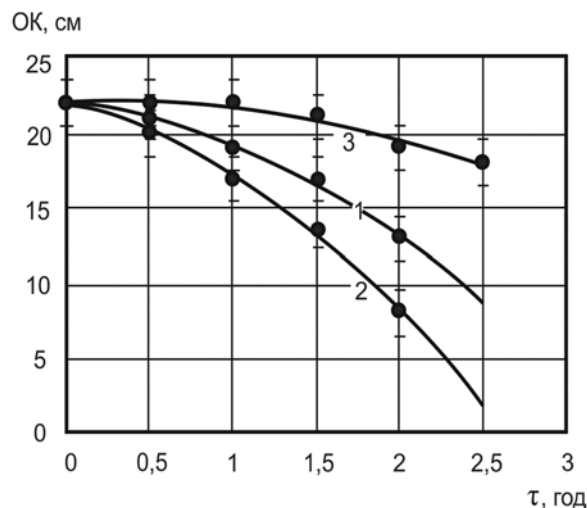


Рис. 4. Кінетика зміни рухомості бетонних сумішей за осадкою конуса: 1 – без добавок; 2 – СП-0,25%; 3 – СП-0,75%, МТК-10%

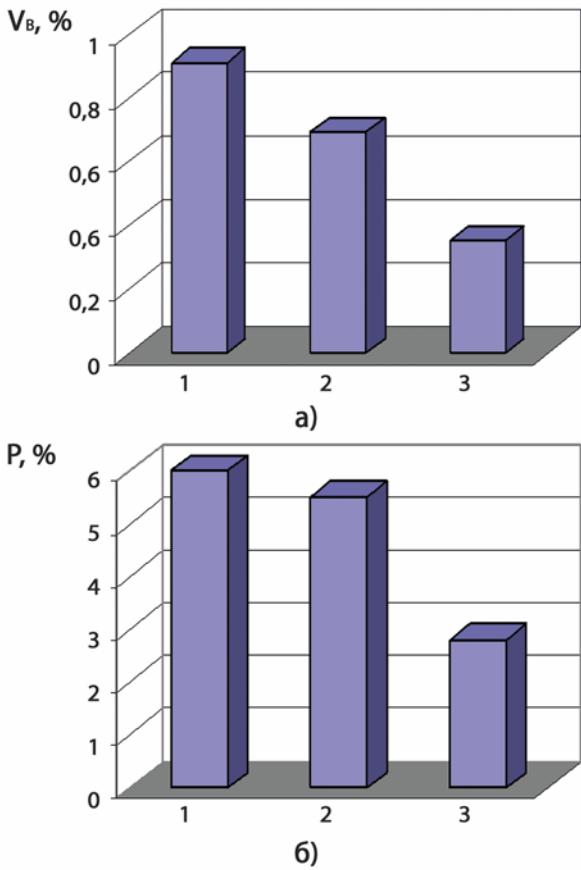


Рис. 5. Результати визначення (а) водо- та (б) розчиновідділення сумішей: 1 – без добавок; 2 – СП=0,25%; 3 – СП=0,75%, МТК=10%

Для України перспективною добавкою даного виду є метаксаолін. Було проведено дослідження впливу добавки метаксаоліну, виготовленого ТОВ «Західна каолінова компанія» за розробленими нами Технічними умовами, на комплекс властивостей литих бетонних сумішей та бетонів. Метаксаолін застосовували в комплексі з добавкою суперпластифікатора С-3.

Склади бетонних сумішей, кінетика зміни їх рухомості, водо- та розчиновідділення бетонних сумішей приведені на рис. 4 і 5. Вони свідчать про суттєве збільшення

«життєздатності», тобто збережуваності бетонних сумішей в часі при введенні добавки метаксаоліну, що дозволяє вносити корективи при призначенні початкової легкоукладальності та допустимої тривалості транспортування суміші. В цьому відношенні добавка метаксаоліну нівелює негативний вплив суперпластифікатора на кінетику зміни рухомості бетонних сумішей в часі.

Згідно діючих норм для литих бетонних сумішей, тобто сумішей марок Р4 і Р5 водовідділення не повинно перевищувати 0,8%, розчиновідділення – 4%. Сумісне введення метаксаоліну і суперпластифікатора дозволяє знизити водовідділення бетонних сумішей майже в 3 рази. Суттєво зменшується також розчиновідділення, що позитивно відбивається не тільки на зовнішньому, але і на внутрішньому розшаруванні бетонних сумішей. Внаслідок активного зв'язування метаксаоліном $\text{Ca}(\text{OH})_2$, що виділяється при гідратації цементу та утворення дрібнокристалічної щільної структури спостерігається зростання міцності бетону. При високих концентраціях метаксаоліну (>10%) його частинки, які не вступають у реакцію, блокують ріст гідратних новоутворень, що призводить до певного зменшення міцності.

Поряд з бездобавочним портландцементом І і цементом ІІ типу, які містять до 20% доменного гранульованого шлаку для виробництва бетонів з міцністю на стиск в 1 добовому віці до 40 МПа і в 28 дів 80...90 МПа можуть бути застосовані композиційні цементы з вмістом до 50% композиції доменного шлаку і золи виносу. Для отримання високоміцних бетонів з підвищеною ранньою міцністю на таких цементах необхідно забезпечити їх питому поверхню в межах 350...500 $\text{м}^2/\text{кг}$ і ввести в бетонну суміш добавку полікарбоксилатного суперпластифікатора. Як показали наші дослідження при застосуванні гранітного щебеню фракції 5...20 мм і середньозернистого кварцового піску введення в бетонну суміш добавки суперпластифікатора Sica VC 225 в кількості 0,7% від маси цементу дозволяє довести рухомість бетонної суміші до ОК = 20 см і більше, знизити при витратах цементу 400...500 $\text{кг}/\text{м}^3$ В/Ц до 0,25...0,3 і довести міцність бетону в 28 дів до 80...90 МПа.

Експерименти, що були виконані за допомогою математичного планування дозволили отримати математичні моделі водопотреби бетонної суміші і міцності бетону в 1 і 28 дів побудувати відповідні номограми (рис. 6, 7) і на

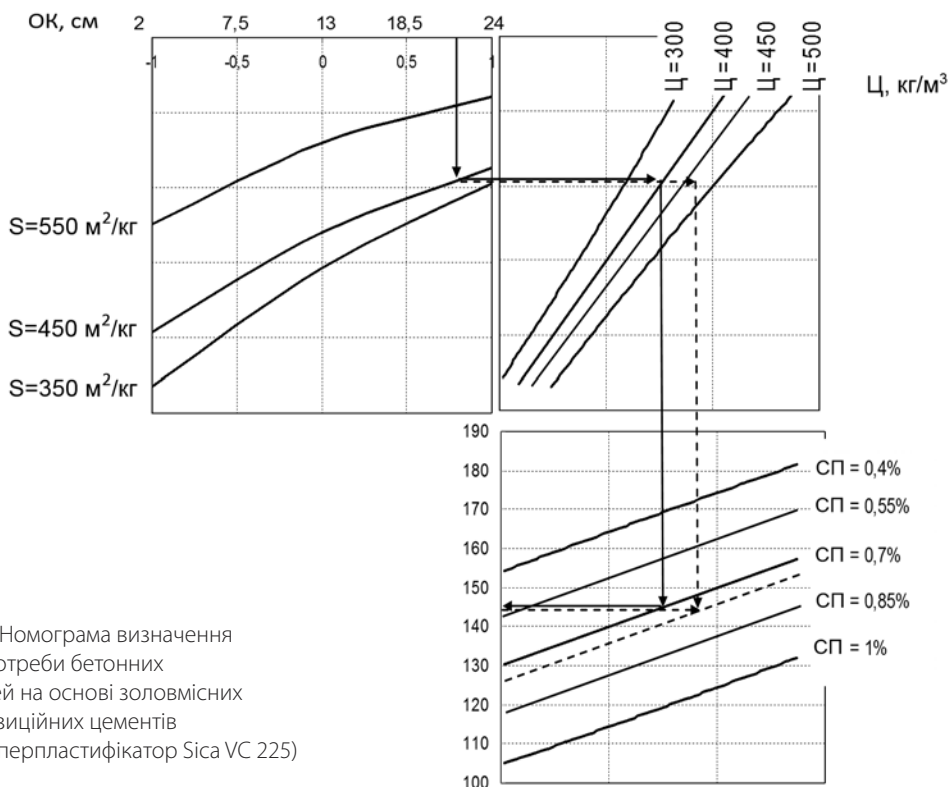


Рис. 6. Номограма визначення водопотреби бетонних сумішей на основі золівмісних композиційних цементів (СП-суперпластифікатор Sica VC 225)

їх основі запропонувати методику прогнозування відповідних властивостей бетону на композиційних цементах при забезпеченні необхідних складів бетонних сумішей.

Застосування композиційних цементів ефективно для бетонів особливо при тепловологісній обробці. Як слідує з отриманих експериментально-статистичних моделей при В/Ц = 0,3, тривалості ізотермічної витримки 6 год і температурі пропарювання 75°C міцність бетону на стиск через 4 год після ТВО досягає до 90% від 28 добової міцності.

Застосування для отримання високоміцних бетонів суперпластифікаторів дозволяє переглянути вимоги не лише для цементів, а і для заповнювачів. При традиційній технології для забезпечення низьких В/Ц бетонної суміші важливо мінімізувати вміст дисперсних частинок в заповнювачах, що підвищують їх водопотребу [1]. Введення добавок суперпластифікаторів дозволяє певною мірою нівелювати вплив дисперсних частинок, що містяться в заповнювачах, а при низьких В/Ц забезпечувати їх позитивний вплив як активних наповнювачів. Цей висновок, обґрунтований нами для активних дисперсних наповнювачів з позицій закономірностей структуроутворень [6] підтверджений при дослідженні можливості застосування гранітних відсівів як заповнювача дрібнозернистих бетонів. Попереднє виконували оптимізацію зернового складу відсівів додаванням до нефракційованих відсівів з $M_{кр} = 3,23$ та вмістом частинок <0.16 мм 17% піску фракції 2,5...5 мм в кількості 20%. Виготовляли бетони з однаковим співвідношенням заповнювача до цементу. Рухомість бетонної суміші підтримували в межах марки РЗ (9...15 см). Результати дослідів наведені в табл. 5.

При застосуванні полікарбоксилатних суперпластифікаторів при введенні додатково добавок мікрокремнезему або метакаоліну виявилася можливість отримати бетони на відсівах з міцністю на стиск у віці 3 доби до 60 МПа, 28 дів – 85...90 МПа.

В результаті комплексу виконаних досліджень розроблені основи методології проектуванні складів високоміцних швидкотверднучих бетонів з заданими значеннями рухомості бетонної суміші і міцності бетону в певному в т.ч. ранньому віці з урахуванням основних впливаючих на ці властивості чинників. Методологія основана на використанні експериментально-статистичних моделей адекватних в реальному діапазоні складів бетонних сумішей. На основі моделей отримані формули загального виду, що приведені в табл. 6, що дають можливість розрахувати Ц/В для бетонів з заданою міцністю в 12 год, 1, 7 і 28 дів, а також формули, які дають можливість врахувати тривалість і температуру твердіння в діапазоні 5...40°C.

Розроблена методологія отримала практичне підтвердження в промислових випробуваннях на Рівненських заводах конструкцій з надміцних бетонів, Євробетон та Інтербетон.

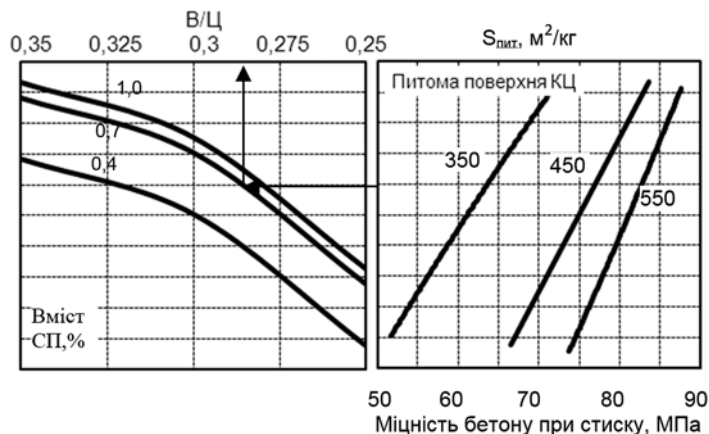


Рис. 7. Номограма визначення міцності бетонів на основі золовмісних композиційних цементів (КЦ) у віці 28 дів (СП-суперпластифікатор Sica VC 225)

Таблиця 5.

Вплив добавок на отримання високоміцних дрібнозернистих бетонів на гранітних відсівах

№ д.т	Суперпластифікатор, %	Мінеральна добавка, %	В/Ц	ОК, см	Міцність при стиску (МПа), у віці (дів)		
					3	7	28
1	Melflux, 0,5%	-	0,32	12	63,4	71,2	78,32
2	Sika 225, 0,5%	-	0,34	14	45,4	69,4	76,34
3	Melflux, 0,5%	метакаолін, 5%	0,37	12	43,6	58,4	63,24
4	Melflux, 0,5%	мікрокремнезем, 5%	0,35	13	40,2	56,8	62,48
5	Melflux, 1%	метакаолін, 5%	0,35	13	60,1	75,8	85,6
6	Melflux, 1%	мікрокремнезем, 5%	0,33	14	58,7	80,2	90,4

Таблиця 6.

Розрахункові формули для проектування складів високоміцних бетонів

Показник	Формула
Міцність бетону на стиск у віці 12 год	$F_{cm}^{12год} = 0,24R_u(\text{Ц} / \text{В} - 0,29)$
Міцність бетону на стиск у віці 1 добу	$F_{cm}^{1доба} = 0,27R_u(\text{Ц} / \text{В} - 0,33)$
Міцність бетону на стиск у віці 7 дів	$F_{cm}^{7дів} = 0,56R_u(\text{Ц} / \text{В} - 0,3)$
Міцність бетону на стиск у віці 28 дів	$F_{cm}^{28дів} = 0,73R_u(\text{Ц} / \text{В} - 0,33)$
Міцність бетону на стиск з урахуванням тривалості (n, дів) і температури (t°C) твердіння	$F_{cm} = (a \cdot \ln(n) + b_t \cdot t + c) \cdot [A \cdot R_u(\text{Ц} / \text{В} - b)]$

Література:

1. Дворкін Л. Й. Основи бетонознавства / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін // -К.: Основа, 2007, 616 с.
2. Дворкін Л. Й. Бетони спеціального призначення / Л. Й. Дворкін. – Київ: Кондор, 2017, 352 с.
3. Дворкин Л.И. Строительные минеральные вяжущие материалы./ Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин// М.: Инфра-Инженерия, 2011, 544 с.
4. Дворкін Л. Й. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони / Л. Й. Дворкін, Є. М. Бабиш, В. В. Житковський та ін. – Рівне: НУВГП, 2017, 331 с.
5. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Mathematical Experiments Planning in Concrete Technology. Nova Science Publishers, New York, USA, 2012, 172.
6. Дворкин Л. И. Цементные бетоны с минеральными наполнителями / Дворкин Л. И. Соломатов В. И., Выровой В. Н., Чудновский С.М. // -К. : «Будівельник», 1991, 136 с.