

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та
природокористування

Л.Й. Дворкін,
доктор технічних наук, професор,
В.В. Житковський,
кандидат технічних наук, доцент,
Р.М. Макаренко
кандидат технічних наук, доцент

ВИСОКОМІЦНІ БЕТОНИ

Навчальний посібник

Рівне 2022

УДК 691.32

Д24

Рецензенти:

Саницький М.А., доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка»;

Кузло М.Т., доктор технічних наук, професор, Національний університет водного господарства та природокористування.

Рекомендовано вченою радою Національного університету водного господарства та природокористування.

(Протокол № __ від _____ р.)

Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Макаренко Р.М.

Д24 Високоміцні бетони: навчальний посібник. – 2022.
– 216 с.

ISBN

У посібнику розглядаються теоретичні передумови отримання високоміцних бетонів та основні параметри технології. Узагальнені результати досліджень з цієї проблеми, у т.ч. і виконані авторами посібника. Розглянуті основні різновиди високоміцних бетонів: із високою ранньою міцністю, з використанням техногенної сировини, самоущільнюваних, реакційно-порошкових та фібробетонів. Показана ефективність застосування математичного моделювання для прогнозування властивостей високоміцних бетонів і проектування їх складів.

Посібник призначений для здобувачів вищої освіти будівельних спеціальностей.

ISBN

© Дворкін Л.Й.,
Житковський В.В.,
Макаренко Р.М., 2022
© НУВГП, 2022

ЗМІСТ

	Стор.
ПЕРЕДМОВА	5
1. ПЕРЕДУМОВИ ОТРИМАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ	6
1.1 Теоретичні передумови забезпечення високої міцності бетонів.....	6
1.2 Технологічні шляхи отримання високоміцних швидкотверднучих бетонів.....	24
2. ЦЕМЕНТНИЙ БЕТОН З ВИСОКОЮ РАННЬОЮ МІЦНІСТЮ	48
3. ВИСОКОМІЦНІ БЕТОНИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОГЕННОЇ СИРОВИНИ	65
3.1 Бетони на основі золівмісних композиційних цементів.....	65
3.2 Бетони з добавкою метакаоліну.....	89
3.3 Бетони із застосуванням відходів каменеподрібнення..	98
4. САМОУЩІЛЬНЮВАНІ БЕТОНИ	107
4.1 Загальні відомості.....	107
4.2 Властивості самоущільнюваних бетонів.....	117
4.3 Самоущільнювані бетони з добавками полімерів.....	125
5. РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВІ БЕТОНИ	139
5.1 Загальні відомості.....	139
5.2 Вплив складу РПБ на його властивості.....	143
5.3 Проектування складів РПБ з нормованою рухомістю і міцністю.....	155
5.4 Вплив температурних режимів твердіння на міцність РПБ.....	159
5.5 Реакційно-порошковий бетон як напівфабрикат для виготовлення сухих будівельних сумішей.....	164
6. ВИСОКОМІЦНІ ФІБРОБЕТОНИ	168
6.1 Загальні відомості.....	168
6.2 Вплив сталевोї фібри на міцнісні властивості фібробетонів.....	175
6.3 Особливості структури, деформативність та морозостійкість фібробетонів.....	183

6.4	Вплив орієнтування сталеві фібри на міцність фібробетону.....	192
6.5	Реакційно-порошкові бетони із композиційним дисперсним армуванням.....	194
6.6	Реакційно-порошкові бетони з дисперсним армуванням сталевими сітками.....	201
6.7	Проектування складів високоміцних фібробетонів.....	207
	ЛІТЕРАТУРА	214

ПЕРЕДМОВА

Науково-технічний прогрес в будівництві відповідальних та унікальних споруд, необхідність підвищення їх надійності обумовлюють розвиток технології бетону, розробку технології бетонів нового покоління в т.ч. високоміцних. Цьому сприяють впровадження в практику ефективних добавок і перш за все суперпластифікаторів, застосування портландцементу з оптимальним хіміко-мінералогічним складом, заповнювачів з високими фізико-механічними властивостями.

У посібнику, що пропонується узагальнені результати багатьох досліджень, виконаних у різних країнах світу, в тому числі і досліджень, що виконані авторами щодо розробки складів і вивчення властивостей різних видів високоміцних бетонів. При викладенні навчального матеріалу автори ґрунтуються як на класичних дослідженнях, що стосуються формування структури і властивостей бетону, так і на сучасних роботах направлених на вдосконалення технології бетонів з високими фізико-механічними властивостями та впровадження її в практику. При цьому велика увага в посібнику відведена можливості використання при отриманні високоміцних бетонів вітчизняних сировинних матеріалів в т.ч. і техногенних продуктів, які є відходами різних галузей промисловості.

Для прогнозування властивостей бетонів і проектування їх складів на сучасному етапі актуальним є використання математичного моделювання. В посібнику показані можливості застосування з цією метою експериментально-статистичних моделей, що отримуються за допомогою математичного планування експериментів.

Посібник розрахований на здобувачів вищої освіти і аспірантів будівельних спеціальностей. Він може бути корисним і для практичних робітників будівельних організацій і підприємств будівельної індустрії. У підготовці посібника приймали участь к.т.н., доц. Бордюженко О.М. (розділ 6) та к.т.н. Марчук В.В. (п. 3.1 та п. 5.5),

Автори вдячні рецензентам посібника д.т.н., проф. Саницькому М.А., та д.т.н., проф. Кузлю М.Т. і сподіваються на відгуки та побажання.

1. ПЕРЕДУМОВИ ОТРИМАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ

1.1. Теоретичні передумови забезпечення високої міцності бетонів.

Вплив водо- та цементно-водного відношень.
Численними дослідженнями і технологічною практикою доведено, що основним напрямком підвищення міцності бетонів є зниження В/Ц. Цей висновок впливає з відомої фізичної залежності міцності твердих тіл від їх пористості. В загальному вигляді цю залежність можна виразити степеневою функцією:

$$f_{cm} = f_0(1 - P)^n, \quad (1.1)$$

де f_{cm} – міцність бетону на стиск;

P – пористість;

n – показник степеня, що враховує особливості структури матеріалів;

f_0 – міцність безпористого матеріалу.

При заміні пористості на величину відносної щільності $d = 1 - P$ формула (1.1) набуває виду:

$$f_{cm} = f_0 d^n. \quad (1.2)$$

При розрахунку міцності бетону залежно від відносної щільності цементного тіста в свіжевиготовленої суміші Р. Фере показник n прийняв рівним 2.

Запропоновано пізніше і інші значення показника n залежно від особливостей порової структури бетону.

Щільність цементного каменю $d_{ц.к}$ при постійному В/Ц залежить від ступеня гідратації цементу (α) і його густини ($\rho_ц$):

$$d_{ц.к} = \frac{1 + 0,23\alpha\rho_ц}{1 + \rho_ц В / Ц}, \quad (1.3)$$

$$B / Ц = \frac{1 + 0,23\alpha\rho_{ц} - d_{ц,к}}{d_{ц,к}\rho_{ц}}. \quad (1.4)$$

Виразимо об'єм пор бетону відомою залежністю:

$$V_n = B - 0,23\alpha Ц. \quad (1.5)$$

Залежність (1.4) передбачає, що використовуються щільні заповнювачі, об'ємом пор яких можна знехтувати. Не враховується також об'єм повітря в бетоні різного походження.

Об'єм гідратованого цементу ($V_{г.ц}$) за Пауерсом:

$$V_{г.ц} = 0,647\alpha Ц. \quad (1.6)$$

Тоді:

$$B = V_n^{ц.к} + 0,23\alpha Ц \quad \text{або} \quad B = V_n^{ц.к} + 0,35V_{г.ц}, \quad (1.7)$$

$$Ц = V_{г.ц} / 0,647\alpha, \quad (1.8)$$

$$B / Ц = 0,647\alpha \left(\frac{V_n^{ц.к}}{V_{г.ц}} + 0,35 \right), \quad (1.9)$$

де $V_n^{ц.к}$ – об'єм пор цементного каменю.

Таким чином, водоцементне відношення прямо пропорційне відношенню об'єму пор цементного каменю до об'єму гідратованого цементу при постійному значенні α , застосуванні щільних заповнювачів і практичній відсутності залученого або залишкового повітря в бетонній суміші.

Загальне $B/Ц$ бетону можна виразити сумою:

$$B / Ц = B_1 / Ц + B_2 / Ц, \quad (1.10)$$

де $B_1/Ц$ – водоцементне відношення цементного тіста в бетоні, обумовлене водою безпосереднє зв'язаною цементом (B_1);

$B_2/Ц$ – водоцементне відношення, обумовлене водою (B_2), іммобілізованою заповнювачами:

$$B_2 / \text{Ц} = \frac{B_n \Pi}{\text{Ц}} + \frac{B_{\text{щ}} \text{Щ}}{\text{Ц}}, \quad (1.11)$$

де B_n і $B_{\text{щ}}$ – водопотреба відповідно дрібного і крупного заповнювачів;

Π і Щ – витрати дрібного і крупного заповнювачів.

Складові в рівнянні (1.10) є взаємозалежними, оскільки з одного боку $B_1/\text{Ц}$ залежить від водопотреби заповнювачів, а з іншого – показник водопотреби залежить від співвідношення $B_1/\text{Ц}$ до нормальної густоти цементного тіста $K_{н.г}$.

В одній з наших робіт вивчали порівняльний вплив на міцність бетону при стиску в 28-добовому віці (f_{cm}) $B_1/\text{Ц}$ і $B_2/\text{Ц}$. Для виготовлення бетонної суміші застосовували портландцемент М500 з $K_{н.г}=0,25$, кварцові піски з модулем крупності $M_k=1,7$ та $M_k=2,4$, гранітний щебінь 5...20 мм ($B_{n_1}^0 = 0,081$; $B_{n_2}^0 = 0,065$; $B_{\text{щ}}^0 = 0,022$), де B_n^0 і $B_{\text{щ}}^0$ – відповідно водопотреба піску і щебеню при нормальній густоті цементу. Готували цементне тісто з різними значеннями $B_1/\text{Ц}$, потім його змішували з заповнювачами та додавали воду відповідно до умови (1.9).

При постійному $B_1/\text{Ц}$ збільшення $B_2/\text{Ц}$ за рахунок переходу на заповнювач з більшою водопотребою при постійній витраті цементу призводить до збільшення загального $B/\text{Ц}$ і зниження міцності. Результати дослідів наведені в табл. 1.1.

У найбільшій мірі збільшення $B_2/\text{Ц}$ позначається на міцності бетону при низьких значеннях $B_1/\text{Ц}$ характерних для високоміцних бетонів (ВМБ).

Таким чином, правило $B/\text{Ц}$ відображає вплив на міцність важкого бетону не тільки пористості цементного каменю, а й значною мірою якісної характеристики його контактної зони на межі із заповнювачами.

Перші розрахункові залежності для міцності високоміцних бетонів (ВМБ) були запропоновані Б.Г. Скрамтаєвим та Ю.М. Баженовим, які, ґрунтуючись на нелінійному характері залежності міцності бетону від $\text{Ц}/B$, після широких

експериментальних досліджень запропонували два види формул залежності міцності від Ц/В.

При Ц/В < 2,5:

$$f_{cm} = AR_{ц}(Ц/В - 0,5) \quad (1.12)$$

При Ц/В ≥ 2,5:

$$f_{cm} = A_1 R_{ц} (Ц / В + 0,5) . \quad (1.13)$$

Таблиця 1.1

Вплив $B_1/Ц$ і $B_2/Ц$ на міцність бетону
($R_{ц}=52$ МПа, $Ц=400$ кг/м³, $K_{н.з}=0,25$)

№ з/П	$B_1/Ц$	$П$, кг/м ³	$Щ$, кг/м ³	B_n	$B_{щ}$	$B_2/Ц$	$B/Ц$	f_{cm} , МПа
$B_{n_1}^0 = 0,081; B_{щ}^0 = 0,022$								
1	0,87 $K_{н.з}$	650	1150	0,027	0,007	0,064	0,283	94,6
2	$K_{н.з}$	700	1100	0,081	0,022	0,202	0,452	53,4
3	1,1 $K_{н.з}$	750	1100	0,095	0,028	0,255	0,530	43,3
4	1,2 $K_{н.з}$	800	1100	0,110	0,031	0,305	0,605	35,9
5	1,3 $K_{н.з}$	800	1100	0,121	0,033	0,333	0,658	31,8
$B_{n_2}^0 = 0,065; B_{щ}^0 = 0,016$								
6	0,88 $K_{н.з}$	650	1150	0,019	0,006	0,048	0,267	101,2
7	$K_{н.з}$	700	1100	0,065	0,016	0,158	0,408	60,9
8	1,1 $K_{н.з}$	750	1100	0,077	0,024	0,21	0,485	48,7
9	1,2 $K_{н.з}$	800	1100	0,081	0,029	0,242	0,552	41,0
10	1,3 $K_{н.з}$	800	1100	0,085	0,031	0,255	0,580	38,2

Примітка. B_n^0 і $B_{щ}^0$ – показники водопотреби.

Значення коефіцієнта A залежать від якості вихідних матеріалів:

Матеріали для бетону:	Коефіцієнт A у формулах:	
	(1.12)	(1.13)
високоякісні	0,65	0,43
рядові	0,60	0,40
пониженої якості	0,55	0,37

Шляхом узагальнення довідкових даних запропонована єдина формула міцності бетону (1.12) з усередненими коефіцієнтами ($A=0,56$).

Середнє відхилення значень f_{cm}/R_{it} , визначене за формулами отриманими в різних лабораторіях, і формулою (1.13) складає 12...13%.

В.П. Сізов у всьому діапазоні значень міцності бетону для проектування складів бетону запропонував застосовувати формулу (1.12), при цьому приймати значення коефіцієнта A згідно табл. 1.2 і додатково уточнювати поправками ΔA_i .

Таблиця 1.2

Значення коефіцієнта A (за В.П. Сізовим)

Вид заповнювача	Вміст глини, пілу і мулу в щебені (гравій) і піску, %	Значення коефіцієнта A для бетону на		
		щебені	гравію гірському	гравію річковому і морському
Щебінь (гравій) пісок	0 0	0,64	0,6	0,57
Щебінь (гравій) пісок	0 3	0,61	0,56	0,53
Щебінь (гравій) пісок	1 3	0,58	0,53	0,5
Щебінь (гравій) пісок	2 3	0,55	0,5	0,47
Щебінь (гравій) пісок	2 5	0,52	0,47	0,44

Поправки враховують:

- ΔA_1 – показник рухомості бетонної суміші OK –

$$\Delta A_1 = -0,0033OK \quad (\text{при } OK \leq 2\text{см } \Delta A_1 = 0), \quad (1.14)$$

- показник жорсткості бетонної суміші $Ж$ –

$$\Delta A_1 = 0,0012Ж \quad (\text{при } Ж \leq 5 \text{ сек. } \Delta A_1 = 0), \quad (1.15)$$

- ΔA_2 нормальну густоту цементу $НГ$ –
при $НГ > 27\%$ $\Delta A_2 = -0,0075(НГ - 27), \quad (1.16)$

при $НГ < 27\%$ $\Delta A_2 = 0,01 (27 - НГ), \quad (1.17)$

- ΔA_3 модуль крупності піску $M_{кр}$ –

$$\Delta A_3 = 0,01(M_{кр} - 3), \quad (1.18)$$
- ΔA_4 найбільшу крупність крупного заповнювача $D_{ц}$ – при $D_{ц} = 10$ мм – $\Delta A_4 = -0,03$; $D_{ц} = 20$ мм – $\Delta A_4 = -0,02$; $D_{ц} = 40$ мм – $\Delta A_4 = -0,01$.

При застосуванні кондиційних заповнювачів Л.А. Кайсером та Р.С. Чеховою рекомендовано використовувати у всьому інтервалі Ц/В формулу:

$$f_{cm} = \frac{(2,3R_{ц} + 100) Ц/В - 80}{10}. \quad (1.19)$$

Дана формула має обмежене застосування і не враховує якості заповнювачів.

Останнім часом, враховуючи результати досліджень високоміцних бетонів для розрахунку їх міцності запропонована формула:

$$f_{cm} = KAR_{ц}(Ц / В - 0,5), \quad (1.20)$$

де K – коефіцієнт, що враховує особливості впливу хімічної добавки на міцність бетону в певному віці.

Приведені формули справедливі для бетонів з помірно жорстких і рухомих бетонних сумішей, вкладених вібрацією, при коефіцієнті ущільнення не нижче 0,98.

Для більш повного врахування факторів, що впливають на міцність бетону, коефіцієнт A можна виразити добутком $pA = A_1 A_2 \dots A_n$ – де $A_1 \dots A_n$ – додаткові коефіцієнти, що враховують вплив на міцність бетону температури, тривалості тверднення, добавок та ін.

Прогнозуюча здатність розрахункових формул міцності бетонів суттєво збільшується при використанні “приведеного” Ц/В:

$$(Ц / В)_{пр} = \frac{V_{ц} + K_{ц,e} V_n}{B + П_3 V_3 + V_{не}}, \quad (1.21)$$

де $K_{ц,e}$ – коефіцієнт “цементуючої ефективності” або “цементний еквівалент” мінеральної добавки (наповнювача), що вводиться в

бетонну суміш для економії цементу; $V_{ц}$, V_n , $V_{нв}$ – абсолютні об’єми відповідно цементу, мінерального наповнювача та повітря; P_3 – пористість заповнювача.

При використанні параметра $(Ц/В)_{np}$ відкривається можливість розробки досить простих універсальних методик розрахунку складів важких і легких бетонів, що базуються на однакових фізичних передумовах.

Формула міцності бетону залежно від $(Ц/В)_{np}$ має загальний вид:

$$f_{cm} = pAR_u((Ц/В)_{np} + \epsilon), \quad (1.22)$$

де pA_i – мультиплікативний коефіцієнт ($pA_i = A_1, A_2 \dots A_n$), який враховує ряд технологічних факторів, що впливають на міцність бетону при постійному $(Ц/В)_{np}$, вік бетону, температурно-вологісні умови тверднення та ін.

Застосування “приведеного” $Ц/В$ є раціональним, особливо, для розрахунку складів бетонів з обмеженою витратою цементу при введенні дисперсних мінеральних добавок. При врахуванні об’єму пор заповнювачів воно є також ефективним для розрахунку складів легких бетонів, а об’єму залученого повітря – бетонів з повітрявтягуючими добавками. При відсутності у бетоні мінеральних добавок формула (1.22) трансформується до формули звичайного виду.

Водопотреба та легкоукладальність бетонних сумішей.

Водопотреба і легкоукладальність – найважливіші взаємопов’язані між собою технологічні властивості бетонних сумішей, які визначають як здатність їх до ущільнення, так і, значною мірою, властивості затверділого бетону.

Не враховуючи кількість гідратної води, яка до затвердіння бетону є незначною, можна записати рівняння водного балансу бетонної суміші:

$$B = XK_{н.ц}Ц + K_{з.п}П + K_{з.щ}Щ + B_{пол} + B_{зв}, \quad (1.23)$$

де B – водовміст, обумовлений необхідною легкоукладальністю суміші, $кг/м^3$;

$Ц$, $П$ і $Щ$ – витрати відповідно цементу, піску і щебеню (гравію), $кг/м^3$;

$K_{н.з}$, $K_{з.п}$, $K_{з.щ}$ – нормальна густина (у долях одиниці) і коефіцієнти змочування дрібного і крупного заповнювачів;

$X=(B/C)_m/K_{н.з}$ – відносний показник зволоження цементного тіста в бетонній суміші, де $(B/C)_m$ – водоцементне відношення цементного тіста);

$B_{погл}$ – вода, поглинена порами заповнювачів, кг/м³;

$B_{зв}$ – вода, механічно утримувана в поровому просторі між зернами заповнювачів, покритими цементним тістом, кг/м³.

Мінімально необхідна для сумішей, що формуються, кількість води орієнтовно дорівнює:

$$B_{min} = X_{м.в} K_{н.з} C + K_{з.п} П + K_{з.щ} Щ + B_{погл}, \quad (1.24)$$

де $X_{м.в}$ – відносний вологовміст цементного тіста, що відповідає максимальній вологоємності цементу, при якій він практично не містить в комірках між обводненими зернами капілярну вологу ($X_{м.в} \leq 0,876$).

Коефіцієнти змочування $K_{з.п}$ і $K_{з.щ}$ характеризують питому кількість води, утримуваної відповідно дрібним і крупним заповнювачами в плівковому стані на своїй поверхні. Вони залежать від величини поверхневої енергії, крупності і рельєфу поверхні зерен заповнювачів. Запропоновані різні методики визначення коефіцієнтів змочування – випробуванням безпосередньо зволжених піску і щебеню (гравію) або цементного розчину (бетону) з визначеною консистенцією цементного тіста. При деякій вологості піску стрибкоподібно змінюється електричний опір, що може свідчити про зменшення енергії зв'язку води з піском після його повного змочування.

За даними М.Г. Елбакідзе та Й.М. Ахвердова коефіцієнт змочування кварцового піску з врахуванням водопоглинання залежно від крупності фракції коливається від 0,72 (5...2,5 мм) до 5,04% (0,3...0,15 мм), гранітного щебеню від 1,21 (5...10 мм) до 0,75% (40...60 мм). Змочування завершується рівновагою, при якому бетонна суміш набуває пухко-землистого стану. При цьому розрахункове B/C такої суміші (при $B_{погл}=0$) дорівнює:

$$(B/C)_0 = 0,876 K_{н.з} + \frac{K_{з.п} П + K_{з.щ} Щ}{C}, \quad (1.25)$$

де $K_{н.г}$ – нормальна густина цементу.

Неважко підрахувати, що значення $(B/C)_{0}^0 = 0,25 \dots 0,35$.

При інтенсивних механічних впливах, наприклад, пресуванні або вібропресуванні, частина води змочування відтискається і $(B/C)_{0}^0$ зменшується. Величина $X_{м.в}$ при тиску 50 МПа знижується майже до 0,1. В гарячепресованих зразках цементного каменю Рой і Гоуда досягли $B/C=0,093$. За даними Й.М. Ахвердова об'єм води змочування на поверхні заповнювача в міру підвищення тиску пресування може наближатися до адсорбційного. Істотне зменшення $X_{м.в}$ можна досягти і за рахунок застосування ефективних ПАР – суперпластифікаторів. Це доводить практика застосування в бетонах та розчинах в'язучих низької водопотреби, отриманих при спільному помелі клінкера і мінеральних добавок із введенням добавок суперпластифікаторів.

Низькі значення B/C , необхідні для ВМБ раціонально забезпечувати при низьких значеннях водопотреби бетонної суміші.

Спробу розрахунку загальної кількості води, що утримується бетонною сумішшю ($B_{ум}$) без істотного водовідділення, зробив І.М. Грушко. Ним запропоноване рівняння:

$$B_{ум} = 1,35K_{н.г}Ц + B_n\Pi + 0,07S_{щ}, \quad (1.26)$$

де $S_{щ}$ – питома поверхня крупного заповнювача, m^2/kg .

Максимально можливу кількість утримуваної бетонною сумішшю води можна представити також у вигляді виразу:

$$B_{ум} = 1,35 \dots 1,65 K_{н.г}Ц + B_n\Pi + B_{щ}Щ, \quad (1.27)$$

де B_n і $B_{щ}$ – значення водопотреби дрібного і крупного заповнювачів бетону при $X=1,35 \dots 1,65$ і використанні цементу з визначеним значенням $K_{н.г}$.

З огляду на вирішальний вплив водовмісту на показники легкоукладальності, запропонований ряд відповідних рівнянь. Так В.В. Михайлов запропонував лінійне рівняння, що зв'язує

водовміст бетонної суміші (B) і легкоукладальність, оцінювану показником жорсткості (\mathcal{J}):

$$B = 0,5(60 - \mathcal{J}) + B_0, \quad (1.28)$$

де B_0 – водовміст суміші при легкоукладальності 60с (по технічному віскозиметру).

Лінійна залежність запропонована також (І.Д. Запорожець) для зв'язку осадки конуса (OK) і вмісту “вільної” або “мобільної” води в бетонній суміші (B_e):

$$OK = nB_e. \quad (1.29)$$

де n – емпіричний коефіцієнт.

Лінійні залежності, однак, справедливі лише у вузьких межах зміни показників легкоукладальності. Вони не враховують правило сталості водопотреби у визначеному діапазоні C/B і постійному показнику легкоукладальності.

І.М. Грушко отримані рівняння водопотреби бетонних сумішей для рухомих (B_0) і жорстких (B_0^I) бетонних сумішей з урахуванням питомої поверхні щебеню ($S_{щ}$, m^2/m^3), водопотреби піску (B_n^0) за методикою Ю.М. Баженова і нормальної густоти цементу (НГ, %):

$$B_0 = 60 + 4 OK + 0,07S_{щ} + 5B_n^0 + 1,5НГ; \quad (1.30)$$

$$B_0^I = (60 + 0,07S_{щ} + 5B_n^0) \frac{1,38}{\sqrt[3]{\mathcal{J}}}. \quad (1.31)$$

Питому поверхню в m^2 1 m^3 крупного заповнювача, ущільненого протягом хвилини на стандартному вібростолі ($S_{щ}$), пропонується обчислювати за формулою:

$$S_{щ} = K \frac{\rho_{н.щ}}{\rho_{щ}} (a_{40} + 2a_{20} + 4a_{10} + 8a_5), \quad (1.32)$$

де K – коефіцієнт, який характеризує вплив форми зерен щебеню або гравію. При вмісті зерен лещадної форми в щебені менше 15% $K=1,5$, менше 30% $K=1,6$, більше 30% $K=1,7$. Для гравію $K=1,0 \dots 1,25$;

$\rho_{н.ц}$ і $\rho_{ц}$ – відповідно насипна і істинна густина крупного заповнювача;

$a_{40}, a_{20}, a_{10}, a_5$ – часткові залишки при просіюванні щебеню або гравію на ситах 40, 20, 10 і 5 мм.

Навряд чи можна вважати виправданим вибір у залежностях (1.30 і 1.31) різних параметрів якості піску і щебеню, які характеризують їх водопотребу. Залежності (1.30 і 1.31) не прогнозують водопотребу бетонних сумішей за межами правила сталості водопотреби.

У практиці проектування складів важких бетонів широко використовується методика В.П. Сизова, яка відрізняється, в основному, використанням більш розвиненої системи поправок (табл. 1.4) до базової витрати води, яка також знаходиться в залежності від осадки конуса або жорсткості і найбільшої крупності заповнювача. Базові значення витрати води наведені в табл. 1.3).

Таблиця 1.3

Водопотреба бетонної суміші

Легкоукладальність		Витрата води, л/м ³ , при максимальній крупності заповнювачів, мм					
Осадка конуса, см	Жорсткість, с по стандартному віскозиметру	гравій			щебінь		
		10	20	40	10	20	40
		0	31	150	135	125	160
0	30...20	160	145	130	170	155	145
0	20...11	165	150	135	175	160	150
0	10...5	175	160	145	185	170	155
1...2	-	185	170	155	195	180	165
3...4	-	195	180	165	205	190	175
5...6	-	200	185	170	210	195	180
7...8	-	205	190	175	215	200	185
9...10	-	215	200	185	225	210	195

Примітки: 1. Таблиця складена для пісків з водопотребою $V_{п}=7\%$. При збільшенні $V_{п}$ на кожен відсоток витрата води підвищується на 5 л, а при зменшенні $V_{п}$ скорочується відповідно на 5 л. 2. Якщо використовують дрібний пісок, то витрата води підвищується на 10 л, крупний – скорочується на 10 л.

Таблиця 1.4

Поправки для коригування водопотреби бетонної суміші

№	Фактори, які враховуються	Поправки ΔB , л/м ³
I. Порода і вид крупного заповнювача		
1	Щебінь із метаморфічних і осадових порід із границею міцності 40...80 МПа	$\Delta B_1 = B_0 + (4...13)$
2	Гірський гравій	$\Delta B_2 = B_0 - (5...10)$
3	Морський і річковий гравій	$\Delta B_3 = B_0 - (9...15)$
4	Щебінь із порід каменю з гладкою поверхнею зламу (діабаз, базальт і ін.)	$\Delta B_4 = B_0 - 3$
5	Промитий щебінь	$\Delta B_5 = B_0 - 6$
6	Вміст у щебені мулу і пилу в % понад 1% (X_1) і часток менше 5 мм (X_2) понад 5%	$\Delta B_6' = B_0 + X_1$ $\Delta B_6'' = B_0 + 2X_2$
II. Крупність і забрудненість піску		
7	Зміна модуля крупності піску на кожні 0,5 менше 3(X_3) більше 3(X_4)	$\Delta B_7 = B_0 + (3...5)X_3$ $\Delta B_7' = B_0 - (3...5)X_4$
8	Пісок із гладкою добре окатаною поверхнею	$\Delta B_8 = B_0 - 4$
9	Пісок промитий	$\Delta B_9 = B_0 - 7$
10	Збільшення вмісту в піску мулу і пилу на кожний % понад 3% (X_5)	$\Delta B_{10} = B_0 + 2X_5$
11	Зміна нормальної густоти цементного тіста у % більше 28% (X_6) менше 28%	$\Delta B_{11} = B_0 + 4X_6$ $\Delta B_{11}' = B_0 - 4X_6$
12	Зміна витрати цементу на кожні 10 кг понад 350 кг/м ³ (X_7)	$\Delta B_{12} = B_0 + X_7$
III. Температура бетонної суміші, ° C		
	5	$\Delta B_{13} = B_0 - 5$
	10	$\Delta B_{13} = B_0 - 4$
	15	$\Delta B_{13} = B_0 - 2$
	25	$\Delta B_{13} = B_0 + 3$
	30	$\Delta B_{13} = B_0 + 7$
	35	$\Delta B_{13} = B_0 + 11$

Примітка. B_0 – розрахункова витрата води без поправок.

Аналіз численних експериментальних даних показує, що водопотреба бетонної суміші (B_0) пов'язана з показниками легкоукладальності (осадкою конуса або жорсткістю) і розміром крупного заповнювача квадратичною поліноміальною функцією.

При зміні осадки конуса в межах $OK=0...20$ см, жорсткості (Ж) від 4 до 30 с (стандартним способом) і максимальної крупності заповнювача від 5 до 80 мм водопотреба може бути обчислена за рівняннями:

$$B_0=176-0,8D_{ц}+6,1OK+0,0029D_{ц}^2-0,14OK^2; \quad (1.33)$$

$$B_0=197-0,91D_{ц}-1,12Ж+0,0026D_{ц}^2-0,0047Ж^2, \quad (1.34)$$

де $D_{ц}$ – найбільша крупність щебеню, мм.

Для врахування особливостей вихідних матеріалів, витрати цементу і температури бетонної суміші розрахункові значення B_0 можна коригувати за відомими рекомендаціями (табл. 1.4).

У розрахунок водопотреби при наявності відповідного експериментального матеріалу можна ввести й інші поправки, однак прагнення врахувати вплив усіх факторів на водопотребу непродуктивне. Остаточна корекція дійсно необхідної витрати води для досягнення заданого показника легкоукладальності повинна виконуватись в процесі виробничої адаптації складів. Задача розрахунку витрати води включає врахування ефекту впливу пластифікуючих добавок, якщо такі вводяться. У табл.1.5 наведені значення поправочних коефіцієнтів до розрахункового водовмісту бетонних сумішей, отриманих на рядових матеріалах, при введенні двох характерних пластифікуючих добавок.

Для визначення зміни водопотреби ΔB бетонних сумішей за межами *правила сталості водопотреби*, яке діє до критичного В/Ц, що в середньому становить 1,68 $K_{н.с}$ можна користуватись емпіричною формулою:

$$\Delta B = \left(Ц / B - \frac{1}{1,68 K_{н.с}} \right) \left(\frac{B_0}{100} \right)^{55}. \quad (1.35)$$

де B_0 – водопотреба бетонної суміші, що визначається необхідною легкоукладальністю в межах правила сталості водопотреби.

Таблиця 1.5
Поправочні коефіцієнти при використанні
пластифікуючих добавок

Рухомість, см	Жорст- кість, с	Цементно-водне відношення				
		1,4	1,8	2,2	2,6	3,0
-	30...50	$\frac{0,96}{0,88}$	$\frac{0,95}{0,85}$	$\frac{0,94}{0,83}$	$\frac{0,93}{0,81}$	$\frac{0,92}{0,80}$
1...4	-	$\frac{0,93}{0,86}$	$\frac{0,92}{0,84}$	$\frac{0,92}{0,82}$	$\frac{0,92}{0,80}$	$\frac{0,91}{0,79}$
5...9	-	$\frac{0,91}{0,82}$	$\frac{0,91}{0,80}$	$\frac{0,90}{0,79}$	$\frac{0,90}{0,78}$	$\frac{0,89}{0,77}$
10...16		$\frac{0,90}{0,80}$	$\frac{0,89}{0,78}$	$\frac{0,88}{0,77}$	$\frac{0,87}{0,76}$	$\frac{0,87}{0,75}$

Примітка. У чисельнику наведені значення при застосуванні добавок типу ЛСТ в кількості 0,25% від маси цементу, у знаменнику – С-3 в кількості 0,7% від маси цементу.

Вплив співвідношення заповнювачів бетону. Один з важливих якісних показників заповнювачів є їх зерновий (гранулометричний) склад. Перші роботи з проектування зернового складу заповнювачів бетонів були спрямовані на забезпечення мінімальної пористості сумішей зерен різної форми і крупності.

При відомих значеннях насипної густини заповнювача (ρ_n) і густини його зерен (ρ_z) розрахункове значення пористості (Π^0):

$$\Pi^0 = \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_z} \right). \quad (1.36)$$

При змішуванні заповнювачів розрахункове значення пористості можна визначити за формулою:

$$\Pi^0 = 1 - \frac{\rho_n^{cm}}{m^{cm}} \left[V_1(1 - \Pi_1^0) + V_2(1 - \Pi_2^0) + \dots + V_n(1 - \Pi_n^0) \right], \quad (1.37)$$

де m^{cm} і ρ_n^{cm} – маса суміші заповнювачів та її насипна густина;

$V_1, V_2 \dots V_n$ – насипні об'єми фракцій, що змішуються;
 $P_1^0, P_2^0 \dots P_n^0$, – пустотність фракцій заповнювачів, що змішуються.

На практиці найбільш і найменш щільні укладки зерен малоймовірні. Значення пустотності зростають із збільшенням лещадності зерен, особливо при застосуванні зерен подовженої форми.

Сформувався два підходи для забезпечення щільних сумішей зерен заповнювачів: вибір переривчастого або безперервного їх складу.

Прибичники переривчастої гранулометрії суміші заповнювачів виходять із геометричних закономірностей укладки зернистих матеріалів. Хоча переривчастий зерновий склад і забезпечує меншу пустотність суміші зерен, більшість дослідників віддає перевагу безперервному зерновому складу заповнювачів бетонних сумішей. Це пояснюється необхідністю при однаковій рухомості бетонних сумішей в останньому випадку меншого об'єму дрібних фракцій і відповідно витрати цементу на обмазку зерен. Крім того, суміші з безперервним зерновим складом менше схильні до розшарування.

Для вибору безперервного зернового складу заповнювачів запропоновані різні *“ідеальні” криві просіювання*, з яких найбільшу популярність одержали криві Фулера, Болоея і Гуммеля, які виражаються досить близькими формулами.

Для реальних заповнювачів зерновий склад завжди відхиляється від ідеальної кривої, тому в стандартах, що визначають вимоги до крупного і дрібного заповнювачів, вказують рекомендовану область зернових складів, вихід за межі яких приводить до істотної перевитрати цементу.

Для пластичних бетонних сумішей істотний вплив на оптимальне співвідношення фракцій заповнювача чинять товщина і консистенція прошарку цементного тіста, які змінюються залежно від заданих значень властивостей бетонної суміші і бетону. З позицій мінімізації витрати цементу важливо, щоб при цьому склад заповнювача забезпечував мінімально можливу пустотність при найменшій сумарній поверхні.

Необхідний об'єм цементного тіста при одержанні щільного бетону:

$$V_{ц.т} = \Pi_a^0 V_3 + \delta U_3 V_3 + V_{пв}, \quad (1.38)$$

де Π_a^0 і U_3 – пустотність (за абсолютним об'ємом) і питома поверхня заповнювача;

V_3 – абсолютний об'єм заповнювача;

$V_{пв}$ – об'єм повітря;

δ – товщина шару цементного тіста.

Задача вибору оптимального співвідношення заповнювачів в бетонній суміші перетерпіла згодом певну еволюцію. Багатьма дослідниками було доведено, що зі зміною об'ємного співвідношення дрібного і крупного заповнювачів при постійному об'ємі цементного тіста можна досягати найкращої легкоукладальності або при постійній рухомості (жорсткості) бетонної суміші найбільшої міцності бетону і при цьому оптимальне значення об'ємного співвідношення заповнювачів, як правило, не збігається зі співвідношенням, що забезпечує мінімальну пустотність їх суміші.

На даний час існують достатньо апробовані рекомендації з призначення частки піску в суміші дрібного і крупного заповнювача, встановлені емпірично зазвичай з умови досягнення найкращої легкоукладальності бетонної суміші при заданому об'ємі цементного тіста і V/C .

В.Н. Шмигальським було встановлено “правило сталості консистенції”, відповідно до якого при заданих V/C і якості компонентів легкоукладальність (консистенція) суміші зі зміною частки дрібного заповнювача в сумарному об'ємі заповнювачів (величини r) практично не змінюється, якщо умовна товщина оболонки цементного тіста на зернах заповнювача δ зберігається постійної. Ґрунтуючись на даному правилі, він одержав розрахункову залежність для визначення оптимального значення $r(r_0)$:

$$r_0 = (1 - \delta U_m) r_m, \quad (1.39)$$

де U_m – поверхня суміші заповнювачів при їх співвідношенні r_m , що забезпечує мінімальну пустотність.

Очевидно при $\delta \rightarrow 0$ $r_o \rightarrow r_m$, у всіх інших випадках $r_o \neq r_m$.

Як наслідок правила сталості консистенції бетонних сумішей можна розглядати *правило оптимального вмісту піску*. Для більшості складів бетонних сумішей оптимальний вміст піску в суміші заповнювачів (r_o) знаходиться з умови: $r \rightarrow r_o$ при $V_{ц.м} = \text{const}$, якщо в'язкість бетонної суміші $\eta_{\sigma.c} \rightarrow \text{min}$. При цьому відповідно мінімізується водовміст.

Вплив ступеня гідратації цементу. Вже перші залежності для міцності цементного каменю і бетону враховували вплив ступеня гідратації цементу. Зокрема, вперше Пауерс запропонував параметр X , з яким однозначно пов'язана міцність цементного каменю:

$$X = \frac{K_c V_{н.ц} \alpha}{V_{н.ц} \alpha + B / Ц} \approx \frac{0,47 \alpha}{0,319 \alpha + B / Ц}, \quad (1.40)$$

де $K_c = 2,09 \dots 2,2$ – коефіцієнт збільшення об'єму продуктів гідратації (гелю);

$V_{н.ц}$ – питомий об'єм цементу ($V_{н.ц} = 1/\rho_{ц} = 0,319$ см³/г – величина зворотна густині цементу ($\rho_{ц}$);

α – частина цементу, що пройшла гідратацію (ступінь гідратації).

Висновок Пауерса підтверджений багатьма дослідниками. Як показали наші дослідження, проведені раніше, ступінь гідратації цементу можна знайти за емпіричною формулою:

$$\alpha = \sqrt{R_{ц} / 165}. \quad (1.41)$$

У табл. 1.6 наведені дані С.Д. Окоркова і О.В. Волженського зміни ступеня гідратації портландцементу в часі зі зміною $R_{ц}$ і проведено їх зіставлення за формулою (1.41).

Як видно з табл. 1.6, похибка при використанні формули (1.42) невелика, тим більше, якщо врахувати, що експериментально $R_{ц}$ і α визначали на різних цементах, загальним у яких було лише підвищений вміст фази аліту.

Таблиця 1.6

Порівняння розрахункових і експериментальних значень
ступеня гідратації портландцементу

Технічні характеристики	Строки тверднення τ , доба			
	3	7	28	90
Границя міцності на стиск, R_u , МПа	13,8	23,8	34,6	38,3
Експериментальні значення α_e	0,31	0,35	0,43	0,51
Розрахункове значення α_p	0,28 9	0,380	0,457	0,482
Відносна похибка $\frac{\alpha_e - \alpha_p}{\alpha_e} \cdot 100\%$	6,7	-8,9	6,3	-5,5

Ступінь гідратації цементу рядового хіміко-мінералогічного складу пропонується також розраховувати за допомогою емпіричного рівняння:

$$a = k \lg \tau - B, \quad (1.42)$$

де k – константа швидкості реакції;

τ – тривалість твердіння, дів;

B – константа, яка відображає тривалість індукційного періоду гідратації.

Таким чином, сучасний стан бетонознавства пропонує певну систему розрахункових залежностей, що дозволяють врахувати вплив основних структуроутворюючих факторів на основні параметри складу бетонних сумішей, водопотребу та водоцементне відношення, але при застосуванні полікомпонентних бетонних сумішей і необхідності врахування конкретних особливостей вихідних компонентів і технологічних параметрів ці розрахункові залежності необхідно корегувати.

Ефективним представляється застосування експериментально-статистичних моделей для створення розрахункових залежностей, що враховують вплив технологічних факторів в певних умовах з урахуванням особливостей поставлених задач.

1.2. Технологічні шляхи отримання високоміцних швидкотверднучих бетонів

Номенклатура бетонів, що використовуються в сучасному будівництві, надзвичайно широка і постійно, розширюється. Цьому значною мірою сприяє науково-технічний прогрес в технології в'язучих матеріалів, заповнювачів і різноманітних добавок до бетону.

За останні десятиліття в технології як конструкційних, так і спеціальних бетонів все ширше застосовують високоміцні бетони нового покоління (High Performance Concrete – HPC). Ці бетони отримують на основі бетонних сумішей високої рухомості, що забезпечують високу міцність, як в проектному, так і в ранньому віці, та характеризується стабільністю об'єму, низькою стисливістю, високою непроникністю, хімічною стійкістю, морозостійкістю, бактерицидністю, фунгіцидністю і іншими характеристиками, які відповідають національним і міжнародним стандартам. В даний час активно впроваджується технологія різних різновидів HPC – самоущільнюючих бетонів (Self Compacted Concrete – SCC), реакційно-порошкових бетонів (Reactive Powder Concrete - RPC), високоміцних фібробетонів (High Performance Fiber Reinforced Concrete) і ін. Створення таких бетонів з комплексом унікальних властивостей стало можливим завдяки прогресивним технологічним рішенням і, в першу чергу, використанню сучасних органічних та мінеральних добавок, до складу яких входять суперпластифікатори, високоактивні мінеральні та інші добавки.

Умовна межа між бетонами рядової і високої міцності змінюється в міру розвитку технології бетону. У 50-х роках минулого сторіччя до високоміцних відносили бетони класів C25...C40 (M300...M500), у 60-х вище C50...C60. В даний час до високоміцних бетонів (High Strength Concrete) відносять бетони з

міцністю при стиску в 28-добовому віці 70...150 МПа. Євростандарт EN206 передбачає можливість виготовлення і застосування бетонів включаючи клас C115. Завдяки, в першу чергу, застосуванню ефективних суперпластифікаторів і мікрокремнеземистих добавок, освоєна промислова технологія виробництва бетонів з міцністю, що знаходиться в зазначеному діапазоні, розроблені відповідні норми. Такі бетони все ширше застосовують для несучих конструкцій монолітних каркасів висотних будинків, мостів, морських платформ, віброгідропресованих труб. В лабораторних умовах отримані бетони міцністю до 200 МПа і вище.

Досягнення високої міцності важкого бетону можливе шляхом підвищення щільності і міцності цементного каменю (когезійний фактор) і міцності контактної зони (адгезійний фактор).

Розвиток бетонознавства наприкінці ХХ на початку ХХІ ст. дозволив визначити основні шляхи отримання високоміцних швидкотверднучих бетонів. Їх можна розташувати в наступному порядку:

1. Застосування високоміцних швидкотверднучих цементів (ВШТЦ) та високоякісних заповнювачів;
2. Зниження V/C перш за все за рахунок введення в бетон суміш ефективних пластифікуючих добавок;
3. Регулювання процесів гідратації і структуроутворення бетону за рахунок комплексу ефективних технологічних рішень і в першу чергу високоактивних мінеральних добавок.

Високоміцні цементи. Розроблено чотири основних напрямки отримання ВШТЦ:

- послідовна оптимізація всіх етапів виробництва цементу при суворій регламентації технологічних параметрів;
- зміна складу клінкерних мінералів, їх легування шляхом введення в сировинну суміш спеціальних добавок;
- введення в цемент спеціальних кристалізаційних добавок (затравок);
- синтез змішаних цементів, кожен з компонентів яких позитивно впливає гідратаційне твердіння інших компонентів.

Для отримання ВШТЦ велике значення має тонкий помел і висока гомогенність сировинної суміші, сильний і рівномірний випал клінкеру, правильний підбір виду і зольності палива, різке охолодження клінкеру. Великий вплив на активність клінкеру має також його мікрористалічна структура. Цемент покращеної якості отримують переважно при чіткій правильній кристалізації аліту, що характерно для так званої монодоластичної структури, яка утворюється при оптимальних умовах випалювання. Рання міцність портландцементу визначається вмістом зерен менше 10 мкм, а більш пізня – до 30 мкм. Для ВШТЦ вміст фракцій цементу розміром менше 30 мкм повинен складати не менше 65...75%, залежно від марки портландцементу він може досягати 80%.

Вперше в Україні на Здолбунівському цементному заводі отримано високоміцні *особливо швидкотверднучі цементи* (ОШТЦ) за рахунок суттєвого підвищення у клінкерній складовій вмісту трикальцієвого силікату та оптимізації зернового складу цементу.

Рекомендований зерновий склад високоміцних цементів і ОШТЦ, згідно даних НДІ цементу, наведений в табл. 1.7.

Таблиця 1.7
Зерновий склад особливо швидкотверднучих (ОШТЦ) і високоміцних (ВМЦ) цементів

Цемент марки	Питома поверхня, м ² /кг	Вміст частинок, % (розмір частинок в мкм)			
		<5	5-30	30	>60
М600	близько 300	5-12	30-50	30-45	5
ОШТЦ	370-400	20-28	45-70	11-25	6
ВМЦ М700	320-400	15-25	45-70	20-35	10
ВМЦ М800	близько 600	15-30	55-75	3-25	1

Дослідження показали, що при підвищенні питомої поверхні цементу з 200 до 600 м²/кг при оптимальному вмісті гіпсу для кожного рівня дисперсності ступінь гідратації та

міцність в 1...3 добовому віці суттєво зростають, в 28-добовому віці міцність збільшується лише до певної границі, а потім знижується.

Забезпечення необхідного зернового складу ВШТЦ можливе при помелі в млинах, що працюють в замкнутому циклі. При цьому, однак, має місце суттєве (до 40...50%) зниження продуктивності мелючих агрегатів.

У ряді країн розроблені *надшвидкотвердіючі цементи*, що дають можливість вже через 2...6 год після змішування досягти міцність при стиску 5...20 МПа, а в 28 діб 70...80 МПа і більше. До таких цементів можна віднести фтормісткий надшвидкотвердіючий портландцемент. В якості сировинних матеріалів для нього використовуються вапняк, шлаки вторинної переплавки алюмінію, фторид кальцію і спеціальна добавка для утримання фтору в клінкері. Цемент, модифікований фтором, досягає через 6 год нормального тверднення міцності на стиск 5...8 МПа. Застосування фтормісткого цементу дає можливість забезпечити при виробництві залізобетонних виробів необхідну розпалубочну міцність вже через 1 год теплової обробки.

Перспективним способом отримання надшвидкотвердіючих цементів є введення у склад сировинних сумішей сульфатів кальцію в кількості близько 10%. Утворені при випалюванні сульфоалюмінати кальцію надають цементу здатність до швидкого тверднення, високу гідравлічну активність. Сировинним компонентом для виробництва клінкеру такого цементу можуть бути фосфогіпс та інші промислові відходи.

До перспективних видів в'язучих для високоміцних бетонів можна віднести *в'язучі низької водопотреби (ВНВ)* і *тонкомелені багатоконпонентні цементи (ТБЦ)*. Розвиток теоретичних уявлень про цементи з мінеральними добавками і добавками ПАР, розробка ефективних суперпластифікаторів цементних систем дали можливість запропонувати змішані в'язучі нового покоління, які характеризуються низькою водопотребою і високою міцністю при порівняно низькому масовому співвідношенні клінкерної складової і мінеральних добавок.

В'яжучі низької водопотреби (ВНВ) отримують сумісним тонким помелом клінкеру або готового портландцементу і активних мінеральних добавок у присутності порошкоподібного суперпластифікатора. Відмінними особливостями ВНВ є висока дисперсність ($S_{num}=400...500 \text{ м}^2/\text{кг}$), низька водопотреба (нормальна густина до 18%), висока активність (до 100 МПа і вище).

При тонкому помелі в'яжучого має місце механо-хімічна активація, внаслідок якої збільшується число активних центрів і нових вільних валентностей в одиниці об'єму клінкеру і зернах мінерального наповнювача, стає можливим утворення органо-мінеральних комплексів між тонкодисперсними мінералами і молекулами суперпластифікатора. В результаті різко збільшується пластифікуючий ефект добавок, міцність в'яжучого зростає на 2...3 марки. Виробництво ВНВ в Україні освоєно поки що в дослідному порядку.

Тонкомелені багатокомпонентні цементи (ТБЦ) – гідравлічні в'яжучі речовини, отримані сумісним тонким помелом портландцементного клінкеру чи портландцементу й активних або інертних мінеральних добавок. Сумарний масовий вміст добавок у цементах даного виду може складати 20...50% і більше. Оптимальна дисперсність ТБЦ складає в середньому 450 $\text{м}^2/\text{кг}$. Подальше збільшення тонкості помелу з урахуванням різко зростаючих енергозатрат і незначного підвищення міцності в'яжучого є недоцільним.

Виробництво тонкомелених багатокомпонентних цементів може бути організоване як на цементних заводах, так і на підприємствах будіндустрії із застосуванням кульових, струменевих млинів або вібромлинів.

ТБЦ застосовують у бетонних сумішах і розчинах при введенні з водою замішування суперпластифікуючих добавок. При цьому, враховуючи значну кількість мінеральних добавок, вміст суперпластифікаторів відповідно зростає у порівнянні з необхідним для чистоклінкерних портландцементів.

Поряд зі спеціальними високоміцними швидкотверднучими цементами технологія яких апробована на цементних заводах, для отримання високоміцного бетону,

можуть використовуватися цементи загальнобудівельного призначення, що виготовляє цементна промисловість.

Міцність бетону може бути нижчою або вищою марки цементу. В останньому випадку слід мати на увазі, що при достатньо високих механічних характеристиках заповнювачів та їх адгезійних властивостях міцність бетону визначається міцністю цементного каменю, котра значно вище міцності цементно-піщаного розчину, що характеризує марку цементу і визначається при певному хіміко-мінералогічному складі водоцементним відношенням і ступенем гідратації.

Основними якісними показниками заповнювачів є їх механічні властивості, зерновий склад та наявність шкідливих домішок.

Заповнювачі для високоміцних бетонів. Для найбільш відповідальних видів бетонів, в тому числі високоміцних при виборі заповнювачів крім міцності враховується їх густина, пористість та водопоглинання. Для таких бетонів застосовують щебінь або гравій з середньою густиною зерен не нижче $2,5 \text{ г/см}^3$ і водопоглинанням не більше 0,5% для заповнювача з вивержених і метаморфічних порід і 1% – осадових порід. Для менш відповідальних бетонів густина зерен крупного заповнювача повинна бути не нижче $2,3 \text{ г/см}^3$, а водопоглинання не більше 0,8% для заповнювача з вивержених і метаморфічних порід і 2% – осадових порід. Істинна густина порід, які використовуються для заповнювачів важких бетонів, що характеризує їх масу в одиниці об'єму в абсолютно щільному стані, змінюється у вузьких межах (табл. 1.8) і враховується при розрахунках їх пористості і складів бетонних сумішей.

Середня густина гірських порід залежить від їх пористості і змінюється в широких межах. Цей показник для гірських порід певного мінерального складу і структури може служити непрямую характеристикою їх міцності і довговічності. Пористість вивержених порід зазвичай не перевищує 1,5%, осадових особливо карбонатних порід досягає 40%. Для виробництва щебеню, який застосовується у важкому бетоні, використовують карбонатні породи, пористість яких знаходиться зазвичай в діапазоні 5...15%. Відкриту пористість гірських порід

характеризує їх водопоглинання. Водопоглинання вивержених порід, що не зазнали процесів вивітрювання, зазвичай не перевищує 0,7%, а у осадових воно досягає 10% і більше.

Таблиця 1.8

Базові властивості будівельних гірських порід

Породи	Істинна густина, г/см ³	Границя міцності при стиску, МПа	Модуль пружності, 10 ⁴ МПа	Моро-зостійкість, цикли
Вивержені інтрузивні:				
граніти	2,53...2,7	100...260	5...8	100...300
габро	2,85...3,05	100...350	9...11	100...300
еффузивні:				
порфіри	2,54...2,66	60...150	6...8	50...200
базальти	2,22...3,07	110...500	8...8,3	50...200
метаморфічні:				
гнейси	2,0...2,5	10...200	6...7	25...200
кварцити	2,55...2,7	100...250	7...9	100...300
осадові:				
карбонатні	1,7...2,7	5...200	0,2...9	до 300
пісковики	2,0...2,5	10...250	1,4...5	15...300

При приготуванні бетонної суміші крупний заповнювач доцільно застосовувати у вигляді окремо дозованих фракцій: 5...10 (3...10); 10...20; 20...40; 40...80; 80...120 мм. Допускається також застосування крупних заповнювачів у вигляді суміші суміжних фракцій. Фракція 3...10 мм застосовується в разі використання як дрібного заповнювача пісків з модулем крупності не більше 2,5. При будівництві масивних гідротехнічних споруд допускається застосування щебеню і гравію розміром від 120 до 150 мм і понад 150 мм, що вводяться безпосередньо в блок при укладанні бетонної суміші. Вміст окремих фракцій у крупному заповнювачі в складі бетону встановлюється з умови досягнення його найбільшої щільності і знаходиться в межах, вказаних в табл. 1.9. На якість заповнювачів істотно впливає вміст пилоподібних, глинистих і мулистих

домішок. До пилоподібних відносять частинки розміром понад 0,005 до 0,05 мм, до глинистих і мулистих – до 0,005 мм. Обмеження вмісту відмулюваних домішок в заповнювачах обумовлено негативним впливом утворених ними плівок на зчеплення цементного каменю з заповнювачами, і, як наслідок, на міцність, морозостійкість та інші властивості бетону, водопотребу бетонних сумішей.

Таблиця 1.9

Рекомендований склад суміші фракцій
крупного заповнювача

Найбільша крупність заповню- вача, мм	Вміст фракцій у крупному заповнювачі, %				
	від 5 (3) до 10мм	>10 до 20 мм	>20 до 40 мм	>40 до 80 мм	>80 до 120 мм
10	100	-	-	-	-
20	25...40	40...75	-	-	-
40	15...25	20...35	40...65	-	-
80	10...20	15...25	20...35	35...55	-
120	5...10	10...20	15...25	20...30	30...40

Для важкого бетону при встановленні допустимої кількості пилоподібних і глинистих домішок у крупному заповнювачі враховується вид гірської породи: для вивержених і метаморфічних порід в бетонах всіх класів – не більше 1%, осадових порід для бетонів класів С22,5 і вище – 2%, С20 і нижче – 3% за масою.

Морозостійкість крупних заповнювачів для всіх видів важких бетонів не може бути нижче нормованої марки бетону за морозостійкістю. Необхідна морозостійкість щебеню та гравію нормується з урахуванням середньомісячної температури найбільш холодного місяця в році. Якщо остання коливається від

0 до -10°C марка по морозостійкості щебеню і гравію повинна бути не нижче F100, від -10 до -20°C – F200, нижче -20°C – F300.

Для піску, що виконує роль дрібного заповнювача бетону, визначальними якісними ознаками є зерновий склад, вміст пилюватих і глинистих (відмулюваних) частинок і петрографічна характеристика. У разі невідповідності зернового складу природного піску рекомендованим вимогам застосовують коригувальні добавки. Для дрібних і дуже дрібних пісків це може бути укрупнююча добавка – більш крупний пісок в т.ч. пісок з відсіву дроблення природного каменю. Для крупних пісків при необхідності коригування зернового складу застосовують, навпаки, піски з меншим модулем крупності.

До шкідливих домішок в заповнювачах бетону, що викликають його корозію і погіршення якості поверхні, відносяться: аморфні різновиди діоксиду кремнію, (халцедон, опал, кремій та ін.); сірка, сульфіді, сульфати; магнезит, гідроксиди заліза. Міцність і довговічність бетону зменшують такі домішки в заповнювачах як вугілля, графіт, горючі сланці, апатит, нефелін, фосфорит. Деякі домішки, які містять водорозчинні хлориди, сірку, сульфіді і сульфати, можуть викликати корозію арматури в бетоні.

Шляхи зниження В/Ц. Основною закономірністю що визначає міцність бетону є закон (правило) водоцементного відношення.

За даними НДІ Залізобетону для бетонів високих і середніх марок приблизно 40% загальної міцності формується за рахунок адгезійного зчеплення розчинного каменю зі щебенем; 20% – за рахунок механічного зчеплення, викликаного мікрорельєфом поверхні щебеню. Для бетонів низьких класів (міцність розчинової частини менше 20 МПа) більше половини загальної міцності дає зчеплення. Ріст зчеплення досягається в першу чергу зближенням цементних зерен із заповнювачами, чому сприяють зниження В/Ц, ступеня водовідділення і нерівномірного осідання бетонної суміші.

Величина міцності зчеплення істотно зменшується зі збільшенням розмірів заповнювача, що можна пояснити

збільшенням впливу усадки, а також процесами водовідділення і контракції в бетонній суміші.

Міцність бетону знижується зі збільшенням у щебені вмісту зерен лещадної форми, що пояснюється негативним впливом останніх на легкоукладальність бетонної суміші і, як наслідок, на її ущільнення.

Адгезія твердих тіл залежить від величини їхньої поверхневої енергії, яка визначається міцністю кристалічних ґраток, а також властивостями середовища, яке оточує тіло. Встановлено можливість підвищення активності щебеню і піску за допомогою різних технологічних способів. Збільшення поверхневої енергії досягається при механохімічній обробці матеріалів, розриві міжатомних зв'язків. Нові свіжоутворені поверхні заповнювача при його подрібненні й інших способах механічної обробки мають більш високі значення поверхневої енергії, що обумовлює їхню підвищену адгезійну активність. Застосування свіжеподрібненого щебеню підвищує міцність бетону на стиск до 20%, на розтяг і згин – до 30%. Для одержання високоміцного бетону можливе повторне дроблення щебеню безпосередньо перед виготовленням бетонних сумішей. При цьому руйнується пилювато-глиниста плівка на зернах, розкриваються нові поверхні, що сприяє підвищенню міцності бетону.

Адсорбція подрібненими заповнювачами парів вологи і вуглекислого газу з повітря і насичення некомпенсованих молекулярних сил призводить до "старіння" їхньої поверхні і служить певною перешкодою утворенню надійних адгезійних контактів. У зв'язку з цим ефективно створення на зернах заповнювача первинного контактного шару структурованого зв'язуючого. З цією метою кварцовий пісок можна обробляти вапном у бігунах. Це підвищує міцність бетону на згин до 25%. Спільний помел цементу і піску також сприяє інтенсифікації процесів структуроутворення в контактних зонах.

Одним зі шляхів активізації заповнювачів є створення оптимального рельєфу їхньої поверхні. Збільшення шорсткості заповнювача не тільки сприяє механічному заклинюванню зв'язуючого, але і підвищує площу поверхні контакту.

Зчеплення цементного каменю з заповнювачами істотно послаблюється присутністю в останніх плівок глинистих мінералів і гідроксидів заліза. Присутність зазначених домішок у тонких фракціях призводить до збільшення водопотреби бетонних сумішей, що також негативно позначається на міцності бетону. Травлення заповнювачів кислотними або лужними розчинами сприяє як створенню розвинутого мікрорельєфу заповнювачів, так і одночасно очищенню їхньої поверхні. Крім того, обробка заповнювачів певними розчинами призводить до зміни їхнього поверхневого заряду, що також впливає на їх реакційну здатність.

Активацію адгезійної здатності заповнювачів за рахунок збільшення їхньої вільної поверхневої енергії можна досягти впливом електричних і магнітних полів, ультразвуковою обробкою. Під дією зовнішнього електричного поля молекули й іони, які складають тверді тіла, поляризуються, що сприяє збільшенню адгезійної міцності. Адгезії часток сприяє також зміна кута змочування під впливом електричного заряду. Отримані позитивні результати впливу електроіскрового розряду при подрібненні щебеню на хімічну активність його поверхні. Міцність на згин зразків на кварцитовому і вапняковому щебені при електрогідравлічному подрібненні гірських порід зросла більш ніж на 20%.

У сучасної технології бетону найбільше поширення для зниження В/Ц одержали добавки пластифікатори. Зменшення витрати води і відповідно В/Ц без погіршення легкоукладальності бетонних сумішей дозволяє поліпшити ряд властивостей бетонів – міцність, стійкість, непроникність і ін. Відповідно до ефективності пластифікуючої дії, тобто збільшення рухомості бетонної суміші без зниження міцності бетону, пластифікатори поділяють на 4 категорії (табл. 1.10).

На відміну від звичайних пластифікаторів, що знижують витрату води до 10...15%, суперпластифікатори (СП) дозволяють скорочувати витрати води на 20...30% і більш і відповідно збільшувати міцність бетонів.

Таблиця 1.10

Класифікація пластифікаторів бетонних сумішей

Категорія	Найменування	Збільшення <i>OK</i> із 2...4 см	Зменшення кількості води, %
I	Суперпластифікатори	До 20 і більше см	не менше 20
II	Пластифікатори	14...19 см	не менше 10
III	Пластифікатори	9...13 см	не менше 5
IV	Пластифікатори	8 см і менше	менше 5

Суперпластифікатори (СП) почали застосовувати у виробництві бетону на початку 1970-х років. Завдяки їм виявилось можливим істотно покращити властивості бетону без збільшення витрати цементу, одержувати бетони з литих та самоущільнювальних сумішей при помірному водовмісті, високоміцні бетони на звичайних портландцементях і заповнювачах з низькою проникністю, високою корозійною стійкістю і т.д.

Введення СП є в даний час обов'язковою умовою виробництва високоякісних, високотехнологічних бетонів НРС.

Прийнята в даний час класифікація суперпластифікаторів (табл. 1.11) розділяє їх за складом і механізмом дії.

Механізм дії СП обумовлений комплексом фізико-хімічних процесів у системі цементне тісто-добавка. Механізм дії СП визначається головним чином:

1. Адсорбцією моно- або полімолекулярних ПАР на поверхні в основному гідратних новоутворень;
2. Колоїдно-хімічними явищами на межі поділу фаз.

Таблиця 1.11

Класифікація суперпластифікаторів

Позначення	Склад СП	Механізм Дії
НФ	На основі сульфованих нафталінформальдегідних поліконденсатів	Електростатичний
МФ	На основі сульфованих мелаїноформальдегідних поліконденсатів	Електростатичний
ЛСТ	На основі очищених від цукрів лігносульфонатів	Електростатичний
П	На основі полікарбосилатів і поліакрилатів	Стеричний

В механізмі дії СП типів НФ, МФ, ЛСТ (табл.1.11) переважає ефект електростатичного відштовхування часток цементу, обумовлений тим, що адсорбційні шари з молекул СП підвищують величину дзета-потенціалу на поверхні цементних часток. Величина дзета-потенціалу, що має негативний знак, залежить від адсорбційної спроможності СП. Збільшенню адсорбційної спроможності СП сприяє збільшення довжини вуглеводневого ланцюга і молекулярної маси. Адсорбція СП пропорційна концентрації їх у водному розчині. З мінералів цементу найбільшою адсорбційною здатністю володіє C_3A , найменшої – $\beta-C_2S$.

Електрокінетичний потенціал поверхні часток цементу при введенні СП змінюється від +11 до -(25...35) мВ, що викликає взаємне відштовхування однозначно заряджених часток.

У механізмі дії СП типу П роль дзета-потенціалу менше, а взаємне відштовхування часток цементу забезпечується за рахунок т.зв. стеричного ефекту. Цей ефект обумовлений формами ланцюгів і характером зарядів на поверхні зерен цементу і гідратів.

Широко поширений СП "Розріджувач С-3" належить до групи СП нафталінформальдегідного типу (НФ). Його

виготовляють як у виді 20...40%-них розчинів, так і порошку. При дозуванні добавки 0,5...1% маси цементу він дозволяє збільшити рухомість бетонної суміші від 2...4 см до 20...22 см. В умовах рівної рухомості сумішей бетони із СП С-3 в результаті зменшення V/C мають міцність у віці 28 діб на 30...50% вище, ніж бетони без добавки. При цьому істотно зростають щільність і водонепроникність, покращується ряд інших властивостей бетону.

Добавки СП нового покоління типу П на основі полікарбоксилатів забезпечують збільшення осадки конуса бетонної суміші від 2...4 см до 21...25 см і вище при відносно невисоких дозуваннях. Якщо бетонні суміші з добавками традиційних СП швидко втрачають рухомість, то суміші з добавками полікарбоксилатів знаходяться в пластичному стані 1,5...2 год. Висока здатність до зберігання бетонних сумішей із СП типу П робить їх особливо привабливими для монолітного будівництва і при тривалому транспортуванні. Висока водоредукуюча здатність цих добавок дозволяє їх застосовувати для отримання високоміцних бетонів. Як і інші СП, вони з успіхом застосовуються і при тепловологісній обробці бетону в індустрії збірного залізобетону.

Поряд із ефективними пластифікаторами нового покоління представляють інтерес і комплексні добавки, які поряд із суперпластифікаторами містять відомі і значно більш дешеві добавки з меншим пластифікуючим ефектом (наприклад технічні лігносульфонати (ЛСТ)).

За певних умов і перш за все застосуванні інтенсивних способів ущільнення, зниження V/C і отримання високоміцних бетонів можливо також з використанням жорстких та наджорстких бетонних сумішей. Найбільший ефект при застосуванні жорстких сумішей має місце при поєднанні в процесі ущільнення динамічного і статичного тиску – вібропресуванні.

Регулювання процесів гідратації та структуроутворення може досягатись комплексом заходів, що включають регулювання тонкості помелу цементу, введення добавок-прискорювачів і високодисперсних мінеральних

добавок, що прискорюють структуроутворення та вплив температури твердіння бетону.

Найбільш універсальним і ефективним способом модифікування структури і регулювання властивостей бетону є введення в бетонну суміш додаткових компонентів – добавок. В даний час в економічно розвинених країнах майже весь бетон, який випускається, виготовляється із застосуванням різноманітних добавок. Номенклатура відомих добавок надзвичайно різноманітна. Добавки, як правило, виконують поліфункціональний вплив на бетонні суміші і затверділий бетон.

Є різні класифікації добавок за основним ефектом їхньої дії. Поширена в СНД класифікація пропонує виділяти 4 класи добавок-модифікаторів: 1-ий – регулятори реологічних властивостей бетонних сумішей, їхньої здатності до збереження у часі; 2-ий – регулятори тужавлення і твердіння бетонних сумішей, кінетики їхнього тепловиділення; 3-ій – регулятори пористості бетону, що забезпечують його корозійну стійкість, морозостійкість, водонепроникність; 4-ий – добавки, що додають бетону спеціальні властивості, (гідрофобні, електропровідні, біоцидні і т.д.).

Інша класифікація добавок за основним технологічним ефектом запропонована Асоціацією стандартизації й випробувань матеріалів (ASTM) (табл. 1.12).

В групу *прискорювачів твердіння* входять, як правило, солі-електроліти, основним ефектом яких є прискорення твердіння (у ряді випадків і тужавлення) бетонних сумішей. З прискорювачів твердіння бетону в найбільшій мірі досліджений хлорид кальцію, котрий був запропонований У. Міллером і С. Ніколсом ще в 1885 р. . Дія хлориду кальцію пояснюється підвищенням розчинності клінкерних мінералів цементу, утворенням комплексних малорозчинних речовин, каталітичним і модифікуючим впливом при гідратації цементу. Застосування його в бетоні, однак, обмежено через прискорення корозії сталеві арматури і зниження стійкості цементного каменю в сульфатному середовищі. В деяких країнах застосування цієї добавки заборонено.

Таблиця 1.12

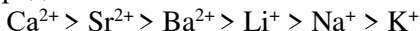
Класифікація хімічних добавок за ASTM

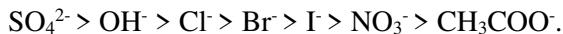
Тип	Технологічний ефект	Номер стандартів
A	Водозниження	C494
B	Уповільнення твердіння	C494
C	Прискорення твердіння	C494
D	Водозниження / уповільнення твердіння	C494
E	Водозниження / прискорення твердіння	C494
F	Значне водозниження / уповільнення твердіння	C494
	Пластифікування для литого бетону	C1017
	Пластифікування / уповільнення твердіння литого бетону	C1017
	Повітрявтягування	C260
	Добавки для торкрет-бетону	C1141

В якості прискорювачів тужавлення і твердіння застосовують також сульфати натрію і калію, нітрати натрію і кальцію, хлорне залізо, хлорид і сульфат алюмінію й інші солі-електроліти.

Встановлена прискорююча дія на твердіння цементу тіосульфату і роданіду натрію ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ і NaSCH), що подібна з дією CaCl_2 . Міцність бетону в ранні терміни твердіння зростає пропорційно концентрації цих добавок. Добавки тіосульфату і роданіду натрію не викликають корозії арматури в залізобетоні. Як тіосульфат, так і роданід натрію є порівняно дорогими добавками, тому практичний інтерес представляють суміші цих солей на базі промислових відходів, зокрема переробки коксового газу.

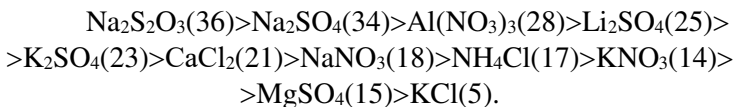
Прискорення твердіння портландцементу при введенні солей-електролітів обумовлена, в основному, прискоренням гідратації алітової фази. За даними В.С. Рамачандрана, за прискорюючим впливом на гідратацію C_3S катіони й аніони розташовуються в ряди:





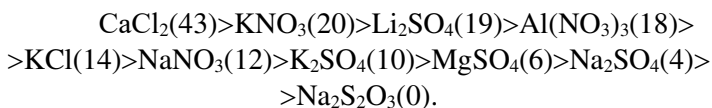
Хімічні добавки - прискорювачі вводять для підвищення ранньої міцності бетону, зменшення витрати цементу, скорочення часу теплової обробки виробів, зниження температури прогрівання і часу попереднього витримання. Ефективність введення прискорювачів твердіння тим вища, чим коротший цикл тепловологісної обробки, нижче марка цементу і клас бетону, температура ізотермічного прогріву.

За ефективністю впливу на міцність цементного каменю відразу після пропарювання добавки рекомендовано розташувати наступним рядом:



В дужках наведене збільшення міцності цементного каменю у відсотках в порівнянні з еталоном.

У віці 28 діб після пропарювання ефективність дії добавок подана так:



Прагнення до універсалізації дії добавок і підсилення їхнього технічного ефекту зумовили широке поширення комплексних (композиційних) добавок. Комплексні добавки можна розділити на дві категорії. Перші представлені сумішами добавок, що належать до одного класу, а другі – до різних класів.

Всі комплексні поліфункціональні модифікатори (ПФМ) можна розділити на чотири групи: I – суміші електролітів; II – суміші ПАР; III – суміші електролітів і ПАР; IV – суміші хімічних і мінеральних добавок.

Вплив дисперсних мінеральних наповнювачів. Ідея введення в цементні системи дисперсних мінеральних наповнювачів (мікронаповнювачів) пов'язана з класичними роботами присвяченими процесам гідрататії і

структурування цементного каменю. У відповідності з цими роботами наповнювачі – це дисперсні частинки, розмір яких не створює в навколишньому матричному матеріалі власні поля деформацій і напружень, що дозволяє їм брати участь в організації структури в'язучого.

Доцільність введення наповнювачів в цементні композити значною мірою випливає з відомих уявлень, про цементний камінь як "мікробетон", в якому роль матриці виконує гідратна фаза, отримана при хімічній взаємодії з водою зерен цементу менше 30 мкм, а роль наповнювача – більш крупні зерна цементу, які гідратуються лише з поверхні. При забезпеченні досить високої тонкості помелу клінкерної складової, виходячи з цієї концепції, частину зерен цементу можна замінити дисперсними матеріалами, в т.ч., які не вступають в хімічну взаємодію з водою. Вже в 1930 р був запропонований цемент з карбонатними наповнювачами. Було встановлено, що зазначені наповнювачі в певній кількості не викликають різкого падіння міцності. Позитивний ефект наповнювачів дослідники пов'язували з т.зв. "ефектом дрібних порошків", що розширюють вільний простір, в якому осідають продукти гідратації цементу, що прискорюють процеси твердіння.

Доцільність введення наповнювачів до складу бетонів і розчинів випливає також з необхідності забезпечити їх достатню щільність без перевитрати цементу. Для заповнення пустот між зернами заповнювача може витратитися більше 60% в'язучого, при цьому активно бере участь у формуванні клейового прошарку лише менша його частина. Отримання суміші заповнювачів з мінімальною пустотністю є складним техніко-економічним завданням, воно вимагає застосування великого числа фракцій. Більш перспективним є збільшення загальної витрати порошкоподібної частини цементних композитів за рахунок розбавлення цементу мінеральними наповнювачами, введення яких можливе як в процесі отримання цементу, так і одержанні розчинових або бетонних сумішей у стані готовому до вживання або в сухому вигляді.

Мінеральні наповнювачі в цементних системах умовно поділяють на активні та інертні. До активних відносять дисперсні

мінеральні речовини, які здатні взаємодіяти з гідроксидом кальцію, що виділяється при гідролізі клінкерних мінералів (т.зв. активні мінеральні добавки). До активних наповнювачів відносять також карбонатні порошки, які взаємодіють з алюмінатною фазою цементу, з утворенням комплексних сполук типу гідрокарбоалюмінатів. У світі сучасних теоретичних уявлень про структурутворення цементних систем другу групу мінеральних наповнювачів, які не вступають безпосередньо в хімічну взаємодію з продуктами гідратації цементу неточно називати інертними. Вони також активно впливають на фізико-хімічні процеси структурутворення та синтезу властивостей розчинів і бетонів.

Більш прийнятною є класифікація мінеральних наповнювачів, залежно від ступеня їх активності по відношенню до продуктів гідратації цементу. Відповідно до цієї класифікації наповнювачі ділять на 4 групи:

I група – повільно твердіючі дисперсні матеріали (основні шлаки, золи та ін.);

II група – мінеральні порошки, які хімічно взаємодіють з продуктами гідратації цементу (кислі золи і шлаки, мікрокремнезем, метакаолін та ін.);

III група – дисперсні матеріали, які характеризуються низькою реакційною здатністю при питомій поверхні 400...500 м²/кг (андезити, сиєніти, діабазити, граніти);

IV група – реакційно неактивні наповнювачі (піролюзит, деякі оксиди металів та ін.).

Ця класифікація також є умовною і справедливою при дисперсності порід, що не перевищує 600 м²/кг. Вона також як і попередня враховує лише хімічну активність не беручи до уваги такий найважливіший показник активності наповнювача як величину його поверхневої енергії, яка визначає міцність адгезійних контактів у системі цемент-наповнювач. Відповідно до термодинамічної концепції адгезії для створення міцних адгезійних контактів поверхнева енергія наповнювача повинна бути більшою ніж поверхнева енергія цементу.

Вплив наповнювачів у цементних системах проявляється на мікро-, мезо - і макрорівні.

На мікрорівні проявляється молекулярна взаємодія продуктів гідратації цементу з наповнювачем. Хімічно активні кремнеземисті наповнювачі в результаті реакції з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – продуктом гідролізу клінкерних мінералів утворюють додаткові кількості низькоосновних гідросилікатів кальцію. Карбонатні наповнювачі утворюють комплексні сполуки з гідроалюмінатами і вступають в обмінні реакції з гідросилікатами кальцію. Сутність фізико-хімічної взаємодії наповнювачів з гідратованим цементом полягає у формуванні епітаксціальних контактів, а також центрів кристалізації. Останні згідно з вченням Гіббса-Фольмера значно зменшують необхідну енергію утворення зародків кристалів гідратних новоутворень у твердіючому цементному тісті. Цей ефект зростає в умовах тепловологісної обробки, а також при зменшенні радіуса зерен наповнювачів, введенні добавок прискорювачів тверднення.

При оптимальній концентрації і дисперсності наповнювача утворюється дрібнозерниста структура цементного каменю, що позитивно позначається на його властивостях.

За певних умов можливий і деструктивний вплив наповнювача. Він може мати місце, якщо параметри наповнення виходять за межі оптимуму і в усьому об'ємі цементного каменю або в окремих його ділянках виникають розтягувальні напруження.

На мезорівні частинки наповнювача взаємодіють як з частинками гідратуючого цементу, так і між собою. В результаті збільшення об'ємної концентрації твердої фази частина води замішування переходить в плівковий стан і створюються т.зв. “стиснені умови”, що позитивно позначається на формуванні структури цементного каменю.

При досить тонкому прошарку дисперсійного середовища частинки наповнювача взаємодіють один з одним. Сили зчеплення частинок можна знайти за формулою:

$$F_c = \frac{2}{3} \pi B r / H^3, \quad (1.43)$$

де r – радіус частинок, B – константа молекулярної взаємодії, H – відстань між частинками.

Середня відстань між частинками наповнювача визначається відношенням середнього об'єму матриці V_m до сумарної площі поверхні частинок наповнювача:

$$H_{cp} = V_m / (V_n S_{n,n}), \quad (1.44)$$

де V_n – об'єм наповнювача; $S_{n,n}$ – питома поверхня наповнювача.

Поряд з поверхневими силами в цементно-водній системі, яка містить наповнювачі, при наявності на їх поверхні некомпенсованого електричного заряду діють кулонівські сили. При різній природі в'язучого і наповнювача виникає додаткова сила електростатичного притягіння (F_e), значення якої може бути обчислено за формулою:

$$F_e = q^2 / (12rH), \quad (1.45)$$

де q – заряд; r – радіус частинок наповнювача; H – відстань між ними.

Максимальна міцність контактів між частинками наповнювача в цементній матриці досягається при інтенсивних методах ущільнення наповнених систем або застосуванні пластифікуючих поверхнево-активних речовин (ПАР).

Сили зчеплення між окремими частинками наповнювача збільшуються в міру зменшення на них товщини прошарку зв'язуючого.

На макрорівні наповнювач суттєво впливає на адгезійну міцність між цементним тістом і заповнювачем, а також когезійну міцність матричної складової цементних композитів і їх щільність. Зменшуючи міжзернові відстані в бетонах і розчинах, наповнювачі можуть істотно збільшувати міцність контактної зони, що позитивно впливає на міцність матеріалів в цілому. Встановлено, що при зменшенні міжзернових відстаней в розчинах на кварцовому піску з 210 до 30 мкм твердість цементного каменю зросла в 1,5...2 рази. Мінімумально необхідна товщина прошарку цементного тіста на зернах заповнювача становить приблизно $13 \cdot 10^{-6}$ м. Досягти такого тонкого прошарку цементного тіста можливо введенням до його складу достатньої кількості наповнювача.

В основу класифікації активних мінеральних добавок,

прийнятої в європейських країнах і США, покладені їхня активність і хіміко-мінералогічний склад (табл. 1.13).

У групу активних добавок або пуцолан, входять матеріали, здатні вступати при нормальній температурі в хімічну реакцію з гідроксидом кальцію з утворенням речовин, що володіють в'язучими властивостями. При твердінні бетонів джерелом гідроксиду кальцію є основні мінерали, що входять у портландцементний клінкер і зазнають гідролізу при впливі води.

До високоактивних мінеральних добавок у бетон, все ширше застосовуваним в останні десятиріччя, відносяться ультрадисперсні відходи виробництва феросплавів, т.зв. *мікрокремнезем* (МК). Мікрокремнезем являє собою конденсований аерозоль, що вловлюється фільтрами систем газоочистки плавильних металургійних печей. Він містить частки сферичної форми із середнім діаметром 0,1 мкм і питомою поверхнею 15...25 м²/г і вище. Його насипна густина – 150...250 кг/м³. За хімічним складом МК представлений в основному некристалічним кремнеземом, вміст якого звичайно перевищує 85 і досягає 98%. Мікрокремнезем як добавка в бетони був уперше запропонований на початку 50-х, а почав масово використовуватися з початку 70-х років минулого сторіччя в Норвегії, а потім і інших країнах. Відповідно до норвезьких норм, кількість діоксиду кремнію в МК повинна бути не менше 85%, а дозування добавки в бетон - не вище 10% маси цементу. Унікальна питома поверхня у сполученні з аморфізованою структурою часток, наявністю таких домішок як карбід кремнію, що мають високу поверхневу енергію, обумовлюють високу структуруючу і реакційну здатність цього матеріалу в порівнянні з іншими активними мінеральними добавками.

Таблиця 1.13

Класифікація і характеристики мінеральних добавок

№	Класифікація		Хімічний і мінеральний склад	Характеристика
	Ознака	Матеріал		
1	В'язучі властивості	Швидкоохолоджені металургійні шлаки	Силікатне скло, що містить CaO, MgO, Al ₂ O ₃ . Кристалічні компоненти – в невеликій кількості	Гранули з 5...15% вологи. Після висушування подрібнюються до розміру <45 мкм. $S_{num}=350...500\text{ м}^2/\text{кг}$ (за Блейном)
2	В'язучі і пуцоланові властивості	Висококальцева зола-виносу (CaO>10%)	Аморфний кремнезем, що містить CaO, MgO, Al ₂ O ₃ . Кристалічні компоненти можуть бути присутні в виді SiO ₂ , C ₃ A. Штучні гідравлічні добавки	10...15% часток розміром >45 мкм. Більша частина – сферичної форми. $S_{num}=400\text{ м}^2/\text{кг}$ (за Блейном)
3	Висока пуцоланова активність	Мікрокремнезем	Мікрокремнезем аморфної модифікації	Порошок з часток сферичної форми d=0,1 мкм. $S_{num}\approx 20\text{ м}^2/\text{г}$ (по БЕТ)
		Зола рисової лузги	Те саме	Частки <45 мкм з розвинутою комірчастою структурою. $S_{num}\approx 60\text{ м}^2/\text{г}$ (по БЕТ)

продовження табл. 1.13

№	Класифікація		Хімічний і мінеральний склад	Характеристика
	Ознака	Матеріал		
4	Нормальна пуцоланова активність	Низькокальцева зола-виносу (СаО<10%)	Силікатне скло, що містить Al_2O_3 , Fe_2O_3 , луги. Кристалічна речовина із SiO_2 , муліту, гематиту, магнетиту	Порошок із сферичних часток > 45 мкм. Більшість часток > 20 мкм. $S_{num} \approx 250 \dots 350$ м ² /кг (за Блейном)
		Природні матеріали, опока	Крім алюмосилікатного скла, містить кварц, польовий шпат, слюду	Більшість часток розмелена до розміру < 45 мкм. Структура – гострокутна
5	Слабка пуцоланова активність	Повільно охолоджені шлаки, золи гідровидалення, золощлаки	Кристалічні силікатні матеріали. Мало некристалічних компонентів	Подрібнюються додатково для надання пуцоланових властивостей

Мікрокремнезем через надзвичайно високу дисперсність й аморфну структуру часток викликає істотне збільшення водопотреби бетонних сумішей, тому його застосовують у комбінації із суперпластифікаторами.

Поряд із МК в якості ефективних модифікаторів бетону за певних умов (висока дисперсність, комбінація із суперпластифікаторами й ін.) можуть служити й інші мінеральні матеріали – метакаолин, цеоліти й ін.

2. ЦЕМЕНТНИЙ БЕТОН З ВИСОКОЮ РАННЬОЮ МІЦНІСТЮ

Для зведення споруд в найкоротші терміни при застосуванні цементів загально-будівельного призначення, актуальною є проблема забезпечення поряд з високою міцністю в марочному віці і достатньо високої ранньої міцності бетону (у віці до 1 доби). Для бетонів типу High Performance Concrete міцність у віці 2 доби коливається в межах 30...50 МПа.

Відповідно до розглянутих вище теоретичних уявлень забезпечення ранньої міцності бетону можливе при зниженні V/C до гранично можливих значень з одночасним підвищенням ступеня гідратації цементу. Міцність бетону на кондиційних заповнювачах пропорційна міцності цементного каменю. При однаковій міцності цементного каменю міцність бетону тим більша, чим більший модуль пружності крупного заповнювача і краще його зчеплення з цементним каменем. У тих випадках, коли міцність заповнювачів не менша міцності цементного каменю при достатньому зчепленні їх з цементним каменем, вона не здійснює суттєвого впливу на міцність бетону.

За Т. Пауерсом міцність зразків цементного каменю при стиску $f_{ц,к}$, що тверділи в нормальних умовах, відповідає рівнянню:

$$f_{ц,к} = AX^n, \quad (2.1)$$

де A – константа, що характеризує міцність цементного гелю ($A \approx 240$ МПа);

n – коефіцієнт, обумовлений особливостями цементу ($n=2,6...3$);

X – структурний критерій, що розраховується за ф-лою (1.40).

Структурний критерій X , обґрунтований Пауерсом, на відміну від критерію Р. Фере, що був вперше запропонований для прогнозування міцності бетону в 1892 р, є параметром, пропорційним відноській густині цементного каменю, а не цементного тіста. За умови відомого ступеня гідратації цементу

(α) він дозволяє при заданому значенні V/C прогнозувати міцність цементного каменю в певному віці. Залежності, близькі до формули Пауерса, що враховують зв'язок міцності цементного каменю з його відносною густиною запропоновані пізніше і іншими дослідниками.

Розрахункові значення міцності цементного каменю, обчислені за формулою Пауерса при різних значеннях V/C і α , наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Вплив V/C і α на міцність цементного каменю

V/C	α	Міцність цементного каменю за формулою (2.1)	V/C	α	Міцність цементного каменю за формулою (2.1)
0,2	0,2	32,7	0,3	0,2	13,3
	0,3	73,8		0,3	32,7
	0,5	178,6		0,5	89,8
				0,7	160,1
0,25	0,2	20,1	0,35	0,2	9,3
	0,3	47,7		0,3	23,4
	0,5	124,0		0,5	67,3
				0,7	124,0

З них випливає, що при гранично низьких значеннях V/C великі можливості для збільшення міцності цементного каменю відкриваються вже при порівняно невеликому збільшенні ступеня гідратації цементу α . Наприклад, перехід від $\alpha=0,2$ до $\alpha=0,3$ при $V/C=0,2$ дозволяє довести міцність цементного каменю $f_{ц.к}$ до 73,8 МПа, в той час як при $V/C=0,3$ розрахункові значення $f_{ц.к}$ при $\alpha = 0,3$ складають лише 32,7 МПа, тобто більш ніж в 2 рази нижчі.

Про більш високий приріст міцності цементного каменю з низькими значеннями V/C при порівняно невеликому збільшенні ступеня гідратації свідчать відомі експериментальні дані. Наприклад, відповідно до даних Ф. Лохера при $V/C=0,2$ зі збільшенням α від 0,1 до 0,2 міцність цементного каменю при стиску зростає з 30 до 55 МПа, а вже при $V/C=0,3$ – лише з 15 до

25 МПа. Цей висновок має принципове значення для розробки технології високоміцних швидкотверднучих бетонів. При цьому слід мати на увазі, що розрахункова залежність виду (2.1), яка пов'язує міцність цементного каменю зі ступенем його гідратації при використанні цементів низької водопотреби, може давати суттєві відхилення від експериментальних даних. Відомо, зокрема, про невідповідність між порівняно низьким ступенем гідратації цементів низької водопотреби і їх високою міцністю, яка зумовлена складом і будовою гідратних новоутворень на основі цих в'язучих.

Збільшення ступеня гідратації цементу в ранні терміни твердіння при певному хіміко-мінералогічному складі досягається комплексом відомих технологічних прийомів і, перш за все, збільшенням його питомої поверхні за рахунок збільшення під час помелу вмісту найбільш тонких частинок (менше 5...10 мкм), а також введенням добавок прискорювачів твердіння. Збільшення тонкості помелу з 300 до 500 м²/кг, а також введення ряду добавок прискорювачів найбільш значно збільшує ступінь гідратації портландцементу в ранні терміни твердіння через 1...3 доби. Цей висновок пояснюється утворенням, приблизно через 24 год з моменту замішування, на зернах цементу щільних екрануючих оболонок з новоутворень, що гальмують подальший процес гідратації цементів. При цьому в цементному камені виникають, внаслідок кристалізаційного тиску, напруження, що сповільнюють ріст його міцності в наступні, за початковим періодом, терміни твердіння. При підвищенні тонкості помелу цементу і оптимальному вмісті гіпсу для кожного рівня дисперсності поряд зі ступенем гідратації безперервно зростає і міцність цементу в 1...3 добовому віці, а до 28-добового віку вона збільшуються лише до певних меж за питомою поверхнею 410...520 м²/кг.

Вплив добавок-прискорювачів також є найбільш суттєвим в перші терміни твердіння цементного каменю до певного оптимального дозування. Важливими умовами позитивного впливу підвищеної тонкості помелу цементу і добавок прискорювачів твердіння на міцність поряд з досягненням більш високого ступеня гідратації і, як наслідок більш низької

капілярної і загальної пористості є зменшення розміру пор і поліпшення структури цементного каменю, що твердіє. Максимальний ступінь гідратації, що практично наближається до одиниці при твердінні у воді можливий при значенні V/C цементного тіста не меншому 0,42. При $V/C < 0,42$ максимальне значення $\alpha = 2,38V/C$.

Формули виду (2.1) дозволяють не тільки прогнозувати міцність цементного каменю залежно від V/C і α , але вирішувати і зворотні завдання знаходження зазначених параметрів при заданому значенні $f_{u,k}$. Вид формул і значення коефіцієнтів, що в них враховуються, можуть змінюватися залежно від особливостей складу цементу, його гранулометрії, умов твердіння, виду та вмісту добавок.

У табл. 2.2 за даними О.В. Волженського наведені значення границі міцності при стиску алітового портландцементу при його твердінні у воді при нормальній температурі, отримані випробуванням зразків-кубів з довжиною ребра 3,16 см, виготовлених з цементного тіста при $V/C = 0,25$, а також експериментальні і розрахункові значення α за формулами 1.40 та 2.1. Розрахункові значення α_p в табл.2.2 обчислені за рівнянням (2.2):

$$\alpha_p = \frac{f_{u,k} + K_1}{K_2}, \quad (2.2)$$

де $f_{u,k}$ – міцність цементного каменю в n -добовому віці;

K_1 і K_2 – коефіцієнти, які для наведених в табл. 2.3 експериментальних значень відповідно дорівнюють $K_1 = 27,5$; $K_2 = 210$. При використанні рівняння (2.2) досягається висока відповідність експериментальних і розрахункових значень α_p що, очевидно, можна пояснити тим, що воно “прив’язане” до конкретного цементу і умов його твердіння.

У табл. 2.3 наведені експериментальні дані щодо впливу на ранню міцність цементного каменю при низьких значеннях V/C зміни тонкості помелу та типу цементу. Застосовували портландцементи ПЦ І-500Н та ПЦ ІІ/А-Ш-500 (ПАТ “Волинь-Цемент”) з розрахунковим мінералогічним складом клінкеру: C_3S

– 68,4%, C₂S – 13,05%, C₃A – 7,05%, C₄AF – 11,5%. Вихідна питома поверхня цементу $S_{num}=350$ м²/кг. Міцність цементу при стиску в умовах нормального твердіння через 2 доби – 38,7 МПа, 7 діб – 41,1 МПа, 28 діб – 53,1 МПа. Для визначення показників міцності виготовляли зразки-кубики з цементного тіста, що тверділи в нормальних умовах 12 год, 1 добу, 7 і 28 діб.

Таблиця 2.2

Вплив тривалості твердіння цементного каменю нормального твердіння на міцність і ступінь гідратації

Показники	Терміни твердіння зразків, діб					
	1	3	7	28	90	180
Границя міцності цементного каменю при стиску, МПа ($f_{ц,к}$)	17,2	28,4	45,7	70,2	86,7	92,4
Експериментальні значення ступеня гідратації (α_e)	0,2	0,31	0,35	0,43	0,51	0,60
Розрахункові значення ступеня гідратації (α_p) за (1.41)	$\frac{0,21}{5}$	$\frac{0,27}{12,9}$	$\frac{0,35}{0}$	$\frac{0,46}{7}$	$\frac{0,54}{5,9}$	$\frac{0,57}{5}$
	$\frac{0,18}{10}$	$\frac{0,22}{29}$	$\frac{0,28}{20}$	$\frac{0,36}{16}$	$\frac{0,4}{22}$	$\frac{0,42}{30}$

Примітки: 1. При розрахунку за (2.1) значення А прийняте 240; n=2,7.
2. Під рискою відносно відхилення у % розрахункових значень α від експериментальних.

Аналіз даних табл. 2.3, підтверджуючи розглянуті вище закономірності, показує можливість досягнення при $B/C=0,2...0,25$ і питомої поверхні цементу ($S_{num}=450$ м²/кг) досить високих значень міцності цементного каменю не тільки через 1 добу і більшому віці, але й при тривалості нормального твердіння вже 12 год. При низьких B/C заміна портландцементу I типу на II практично не впливає на отримані значення ступеня гідратації та міцності цементного каменю.

Таблиця 2.3

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

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

У табл. 2.4 і на рис. 2.1 приведені отримані значення міцності бетонів із сумішей однакової рухомості на портландцементі I і II-го типів без добавки і з добавкою суперпластифікатора С-3 в кількості 0,7% від маси цементу. Застосування добавки при постійній витраті цементу дозволило збільшити марочну міцність приблизно на один клас, а міцність у віці 1 доба виросла на 27...51%.

Таблиця 2.4

Підвищення ранньої міцності бетону при введенні суперпластифікатора С-3

Тип цементу, виробник	$B/C=0,57$				$B/C=0,47$			
	ОК, см	Міцність, МПа, у віці			ОК, см	Міцність, МПа, у віці		
		1 доба	7 діб	28 діб		1 доба	7 діб	28 діб
ПЦ I Здолбунів	10,5	8,8	15,8	28,2	12	12,4	22,7	35,7
ПЦ II/Б, Кривий Ріг	10	6,55	13,8	23,85	12	9,0	17,5	29,9
ПЦ II /А, Здолбунів	15	7,5	13,95	26,0	16	11,3	20,2	33,5

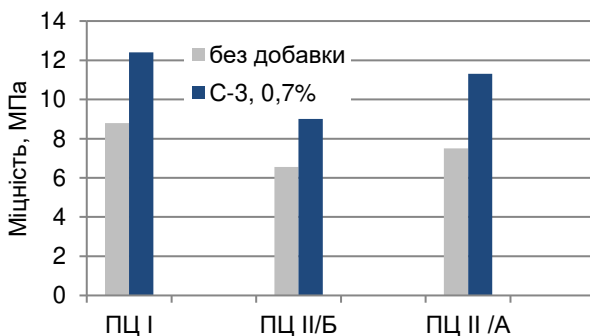


Рис. 2.1. Збільшення міцності бетону з $B/C=0,47$ через 24 год твердіння при зниженні водовмісту бетонної суміші за рахунок введення суперпластифікатора

У табл. 2.5 наведено порівняльну ефективність досліджених пластифікуючих добавок у разі застосування їх для зниження витрати води при збереженні рухомості бетонної суміші (ОК=12...15 см) і підвищення однодобової міцності.

Таблиця 2.5

Порівняльна ефективність добавок пластифікаторів

Добавка	Витрата, % від маси цементу (на суху речовину)	Водоредукуюча здатність, %		Усереднене збільшення однодобової міцності, %	
		цемен- тне тісто	бетонна суміш	цемен- тний 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 2651F	0,5	30...32	30...35	42...63	40...60
	1	38...42	40...45	60...90	57...89

Примітка. Водоредукуючий ефект визначався за формулою:

$$ВРЕ = \frac{B_0 - B}{B_0} \cdot 100\%$$
, де B_0 – вміст води без добавки пластифікатора,
 B – з добавкою.

Найбільшу водоредукуючу здатність мають добавки полікарбоксилатного типу (Mapei Dynamon SR3, Melflux 2651F BASF), які дозволяють забезпечити і максимальне підвищення ранньої міцності.

Як альтернативу підвищення питомої поверхні цементу можна розглядати введення добавок прискорювачів твердіння. У табл. 2.6 наведені результати впливу добавки нітрату кальцію (НК) на ступінь гідратації та міцність цементного каменю при зниженому B/C . Звертає увагу, що кінетика росту міцності цементного каменю на тонкомеленому алітовому цементі і цементі з добавкою прискорювача твердіння при $B/C=0,2...0,3$ істотно відрізняється від традиційної і характеризується набором міцності на стиск через 12 год – до 50% і через 1добу – до 70% від 28 добової.

Таблиця 2.6

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

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

З метою вивчення впливу підвищення ступеня гідратації цементу за рахунок добавок-прискорювачів у високоміцних бетонах з низькими значеннями B/C на кінетику наростання міцності бетону було досліджено комплексний вплив

суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу (Melflux) з добавками-прискорювачами різних типів.

Таблиця 2.7

Результати дослідження комплексного впливу суперпластифікатора полікарбоксилатного типу з добавками прискорювачами різних типів

Вид додаткової добавки, вміст	В/Ц	ОК, см	Міцність при стиску (МПа) у віці (діб)							
			12 год	1	2	7	28	90	180	
Без добавок	0,48	15	7,2	16,6	23,2	35,5	50,2	57,2	58	
Основна добавка Melflux 2651F (0,5%)										
-			20	43,6	52,6	76,8	96	102	109,5	110,8
Релаксол-Темп – 3, 1,5%			6	44,2	54,4	75,2	81,2	100,2	109,2	112
Релаксол-Антифриз FS, 1,5%			22	56,2	72,4	82,8	102,8	106,8	108,9	109,6
Релаксол-Антифриз FSR, 1,5%		0,25	22	58,4	74	87,2	103,6	107,4	111,4	113
Релаксол-Супер ПК, 1%			16	55,6	73,2	92,2	110	111,4	113	114,6
Релаксол-Універсал ВМ, 7%			13	58,4	72	89,2	102,8	115,2	115,2	115,2
Нітрат Кальцію, 1,5%			21	48,4	70	83	94,2	114,2	120,5	121,5

Введення в якості основної добавки суперпластифікатора полікарбоксилатного типу Melflux дозволило отримати бетонну суміш з рухомістю 16...22 см при $V/C=0,25$. На 28-му добу міцність при стиску без використання додаткових добавок становила 102 МПа. На 12 годину твердіння бетон набрав 26...30 МПа, а на 1-шу добу – 52,6, що становить 30 і 50% від марочної, відповідно (табл. 2.7).

Для розрахунків міцності високоміцних також як і рядових бетонів можуть бути застосовані формули загального виду.

При застосуванні портландцементу, середнього кварцового піску і щебеню зі щільних вивержених порід для розрахунків складів високоміцних швидкотверднучих бетонів рекомендовані наступні рівняння:

$$f_{cm}^{12zod} = 0,24R_y (Ц / B - 0,29), \quad (2.3)$$

$$f_{cm}^{1doba} = 0,27R_y (Ц / B - 0,33), \quad (2.4)$$

$$f_{cm}^{7di6} = 0,56R_y (Ц / B - 0,3), \quad (2.5)$$

$$f_{cm}^{28di6} = 0,73R_y (Ц / B - 0,33). \quad (2.6)$$

Дані формули можуть бути використані для проектування складів високоміцних бетонів, що твердіють в нормальних умовах.

Статистична обробка експериментальних даних показує, що величина відношення f_{cm}^n / f_{cm}^{28} при постійній температурі може бути задовільно описана рівнянням (2.7), а з урахуванням можливого впливу температури в діапазоні 5...40 – (2.8).

$$f_{cm}^n / f_{cm}^{28} = a \cdot \ln(n) + b, \quad (2.7)$$

$$f_{cm}^n / f_{cm}^{28} = a_1 \cdot \ln(n) + b_1 \cdot t + c, \quad (2.8)$$

де n – тривалість тверднення, діб;

t – температура тверднення, °С.

Розрахункові значення коефіцієнтів у рівняннях (2.7) і (2.8) приведені в табл. 2.8.

Таблиця 2.8

Значення коефіцієнтів у рівняннях (2.7) і (2.8)

Проектування міцності бетону, МПа	Рівняння (2.7) $t=20^\circ\text{C}$		Рівняння (2.8) $t=5...40^\circ\text{C}$		
	a	b	a_1	b_1	c
20...30	0,242	0,24	0,242	0,0115	0,008
35...50	0,218	0,33	0,218	0,0134	0,063
≥ 60	0,166	0,4473	0,166	0,0133	0,1806

Збільшення прогнозуоючої здатності рівнянь (2.3...2.6) при проектуванні складів бетону досягається введенням

мультиплікативного коефіцієнта $\rho A = A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n$, що враховує комплекс впливаючих на міцність бетону факторів, в тому числі тривалості і температури твердіння.

При необхідності прогнозування міцності при відомому складі бетону або знаходженні необхідного Ц/В для забезпечення заданої міцності при певній температурі і тривалості твердіння розрахункове рівняння набуває загальний вигляд:

$$f_{cm} = (a \cdot \ln(n) + b_t \cdot t + c) \cdot [A \cdot R_y (C/B - b)] \quad (2.9)$$

Рівняння (2.9), конкретизоване для певних вихідних матеріалів і діапазону класів бетону по міцності, а також температурного інтервалу, може бути використано також для розрахунку необхідних значень тривалості твердіння і температури для досягнення заданої міцності. Рівняння (2.8) і (2.9) з коефіцієнтами, наведеними в табл. 2.6 справедливі при $n=1 \dots 28$ діб і $t=5 \dots 40^\circ \text{C}$.

Уточнення емпіричних коефіцієнтів у рівняннях міцності може бути виконано за допомогою аналізу відповідних експериментально-статистичних моделей. У табл. 2.9 приведені значення коефіцієнтів $A_{\tau,t}$ для високоміцних бетонів при можливих змінах температури ($x_1=40 \dots 80^\circ \text{C}$) та тривалості ($x_2=4 \dots 8$ год) ізотермічної витримки при тепловологісній обробці (ТВО).

Аналіз формул (2.10...2.13), наведених в табл. 2.9 підтверджує високу енергоефективність високоміцних бетонів. Вже через 2 години після ТВО при тривалості ізотермічної витримки 4 години і температурі 80°C їх міцність наближається до 70% марочної. При температурі 40°C і тривалості ізотермічного прогріву 8 год. міцність після пропарювання перевищує 50% марочної. Через 1 добу після ТВО при 60°C і 4 години ізотермічної витримки міцність бетону досягає 85% марочної.

Таблиця 2.9

Рівняння для розрахунку коефіцієнтів $A_{\tau,t}$

Міцність пропарених бетонів на стиск, МПа	Розрахункові рівняння
2 год	$A_{\tau,t}^{2год} = 0,62 + 0,16x_1 + 0,12x_2 - 0,05x_1^2 - 0,04x_2^2 - 0,09x_1x_2$ (2.10)
1 доба	$A_{\tau,t}^{1доба} = 0,84 + 0,08x_1 + 0,04x_2 - 0,05x_1^2 - 0,01x_2^2 - 0,005x_1x_2$ (2.11)
7 діб	$A_{\tau,t}^{7діб} = 0,86 + 0,09x_1 + 0,04x_2 + 0,04x_1^2 - 0,004x_2^2 - 0,04x_1x_2$ (2.12)
28 діб	$A_{\tau,t}^{28діб} = 0,94 + 0,04x_1 + 0,02x_2 + 0,02x_1^2 + 0,003x_2^2 - 0,01x_1x_2$ (2.13)

Примітка. В рівняннях (2.10)...(2.13) $x_1=(t_{пр}-60)/20$, $x_2=(\tau_{із}-6)/2$, де $t_{пр}$ і $\tau_{із}$ – відповідно температура та тривалість ізотермічного прогріву бетону при пропарюванні.

Спільне використання рівнянь (2.3...2.6) і (2.10...2.13) дозволяє вирішувати ряд завдань проектування як складів бетонних сумішей, так і технологічних параметрів виготовлення бетону із заданою, у тому числі ранньою, міцністю і зокрема:

- визначати необхідні значення Ц/В і $R_{ц}$ при заданих параметрах теплової обробки;
- визначати необхідні значення температури та тривалості теплової обробки, що забезпечують прийнятні або мінімально можливі значення Ц/В;
- визначати необхідну тривалість тверднення бетону після ТВО, що дозволяє при заданих параметрах складу і теплової обробки досягати необхідну відпускну міцність або коректувати ці параметри, враховуючи можливу тривалість витримки виробів до їх відвантаження.

Приклади

2.1. *Визначити необхідне значення Ц/В для отримання бетону з міцністю при стиску у віці 28 діб $f_{cm}^{28} \geq 80$ МПа з досягненням через 2 доби твердіння міцності 50% від проектної. Активність цементу $R_c = 52,5$ МПа. Розрахувати мінімальне значення температури при якому може досягатися заданий показник міцності у віці 2 діб. Розрахувати наскільки можна скоротити тривалість твердіння бетону з досягненням міцності 80 МПа при підвищенні температури твердіння до 40° С.*

Попередньо за допомогою формули (2.6) знаходимо значення Ц/В, яке буде забезпечувати досягнення необхідної міцності бетону у віці 28 діб.

$$\frac{Ц}{В} = \frac{f_{cm}^{28}}{0,73R_c} + 0,33 = \frac{80}{0,73 \cdot 52,5} + 0,33 = 2,42$$

За формулою 2.7, з урахуванням коефіцієнтів, наведених у таблиці 2.8, розрахуємо відповідне значення Ц/В для забезпечення необхідної міцності 40 МПа у віці двох діб:

$$\frac{Ц}{В} = \frac{40}{(0,166 \cdot \ln(2) + 0,0133 \cdot 20 + 0,1806) \cdot 0,73 \cdot 52,5} + 0,33 = 2,19$$

Відповідно до наведеного розрахунку весь набір заданих міцнісних показників бетону забезпечується при Ц/В=2,42.

Розраховуємо за допомогою рівняння (2.8) мінімальне значення температури твердіння бетону, при якій буде забезпечуватися необхідне значення міцності бетону у віці двох діб при Ц/В=2,42.

$$t = \frac{\frac{f_{cm}^{2\text{доби}}}{f_{cm}^{28}} - a \ln(n) - c}{b_t} = \frac{\frac{40}{80} - 0,166 \cdot \ln(2) - 0,1806}{0,0133} = 15,3^\circ \text{C}$$

Для забезпечення необхідної міцності 40 МПа на другу добу мінімальна температура твердіння бетону повинна становити не менш як 15,3° С. Однак, значення міцності бетону у віці 28 діб при такій температурі твердіння, як впливає з рівняння 2.9 становитиме:

$$f_{cm}^{28} = ((0,166 \cdot \ln(28) + 0,0133 \cdot 15,3 + 0,1806) \cdot 0,73 \cdot 52,5 \cdot (2,42 - 0,33)) = 75,1 \text{ МПа}$$

За формулою (2.9) розраховуємо необхідну тривалість тверднення бетону до досягнення ним міцності 80 МПа при збільшенні температури тверднення до 40° С.

$$\ln(n) = \frac{\frac{f_{cm}^{28}}{f_{cm}^{28}} - b_t \cdot t - c}{a} = \frac{1 - 0,0133 \cdot 40 - 0,1806}{0,166} = 1,73$$

Відповідно $n \approx 2$ доби.

2.2. *Визначити необхідне значення Ц / В для отримання бетону з міцністю при стиску через 28 діб після проходження тепловологісної обробки $f_{cm}^{28} \geq 100 \text{ МПа}$ з досягненням через 2 години після тепловологісної обробки (тривалість ізотермічної витримки 8 годин, температура ізотермічної витримки 60° С) 70% від проектної міцності ($f_{cm}^{TBO} = 70 \text{ МПа}$). Прийняти $R_y^{28} = 52 \text{ МПа}$.*

Попередньо за допомогою формул (2.10) і (2.13) знаходимо значення коефіцієнта $A_{\tau,t}$, який відповідає заданому режиму ТВО. Для цього переводимо значення температури і тривалості ізотермічної витримки в кодований вид:

$$X_1 = (60 - 60) / 20 = 0, \quad X_2 = (8 - 6) / 2 = 1$$

$$A_{\tau,t}^{2год} = 0,62 + 0,16 \cdot 0 + 0,12 \cdot 1 - 0,05 \cdot (0)^2 - 0,04 \cdot 1^2 - 0,09 \cdot 0 \cdot 1 = 0,7$$

$$A_{\tau,t}^{28} = 0,94 + 0,04 \cdot 0 + 0,02 \cdot 1 + 0,02 \cdot (0)^2 + 0,003 \cdot 1^2 - 0,01 \cdot 0 \cdot 1 = 0,963$$

Користуючись формулою (2.6) з додатковим урахуванням розрахованих значень коефіцієнтів $A_{\tau,t}^{2год}$ і $A_{\tau,t}^{28}$ визначаємо необхідне значення $\text{Ц} / \text{В}$, яке буде забезпечувати досягнення заданої міцності бетону після тепловологісної обробки ($f_{cm}^{TBO} = 70 \text{ МПа}$) і через 28 діб тверднення ($f_{cm}^{28} \geq 100 \text{ МПа}$).

$$\text{Ц}/\text{В} = (f_{cm}^{TBO}) / (0,73 A_{\tau,t}^{2год} R_{ц}) + 0,33 = (70 / 0,73 \cdot 0,7 \cdot 52) + 0,33 = 2,94$$

$$(\text{Ц} / \text{В})_1 = (f_{cm}^{28} / 0,73 A_{\tau,t}^{28} R_{ц}) + 0,33 = (100 / 0,73 \cdot 0,963 \cdot 52) + 0,33 = 3,04$$

Відповідно до наведеного розрахунку весь набір заданих міцнісних показників бетону забезпечується при $\text{Ц}/\text{В} = 3,04$.

2.3. *Розрахувати чи буде забезпечуватися необхідна відпускна міцність бетону через 2 години після тепловологісної обробки не менше 30 МПа при значенні Ц/В визначеному в попередньому прикладі (Ц/В=3,04), але при зменшенні тривалості ізотермічної витримки до 4 годин, температури до 40° С.*

Попередньо за допомогою формули (2.10) знаходимо значення коефіцієнта $A_{\tau,t}$, який відповідає заданому режиму ТВО. Для цього переводимо значення температури і тривалості ізотермічної витримки в кодований вид: $X_1 = (40-60)/20 = -1$, $X_2 = (4-6)/2 = -1$.

$$A_{\tau,t}^{2год} = 0,62 + 0,16 \cdot (-1) + 0,12 \cdot (-1) - 0,05 \cdot (-1)^2 - 0,04 \cdot (-1)^2 - 0,09 \cdot (-1) \cdot (-1) = 0,16$$

Користуючись формулою (2.6) з урахуванням розрахованого значення коефіцієнта $A_{\tau,t}^{2год}$ і заданого значення C/B , визначаємо міцність бетону через 2 години після тепловологісної обробки:

$$f_{cm}^{2год} = 0,73 A_{\tau,t}^{TBO} R_y (C/B - 0,33) = 0,73 \cdot 0,16 \cdot 52,5(3,04 - 0,33) = 16,6 \text{ МПа}$$

Задана умова не виконується. Для забезпечення необхідної відпускнуї міцності бетону необхідно застосувати комплекс відповідних технологічних заходів (коригування режиму ТВО, введення добавок-прискорювачів та ін.).

3. ВИСОКОМІЦНІ БЕТОНИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОГЕННОЇ СИРОВИНИ

3.1. Бетони на основі золовмісних композиційних цементів

Водопотреба і міцність. З композиційних цементів (КЦ), які перспективні для отримання високоміцних бетонів, можна виділити тонкомелені багатокомпонентні цементи (ТБЦ) і в'язучі (цементи) низької водопотреби (ЦНВ).

ТБЦ отримують помелом портландцементного клінкеру або товарних портландцементів з різними мінеральними добавками природного і штучного походження (кварцовими пісками, вапняками, перлітом, вулканічними породами, золами ТЕС, доменними шлаками), які вводяться в цемент замість частини клінкеру в кількості до 50%. Експериментально встановлено, що оптимальна дисперсність ТБЦ становить 450 м²/кг. Подальше збільшення тонкості помелу практично не підвищує активності, але значно збільшує витрату енергії на помел. При цьому для запобігання значного підвищення водопотреби передбачається введення при помелі пластифікаторів лігносульфонатного типу. Застосування ТБЦ в бетоні передбачає введення добавок суперпластифікаторів при отриманні бетонних сумішей.

Іншим типом тонкодисперсних композиційних в'язучих для сучасних бетонів є ЦНВ. Традиційний спосіб отримання ЦНВ полягає у спільному помелі цементного клінкеру або бездобавочного портландцементу з сухим суперпластифікатором і мінеральними наповнювачами. В процесі помелу відбувається взаємодія молекул суперпластифікатора з поверхнею цементних частинок. Підсумком фізико-хімічних процесів, що при цьому відбувається утворення «мікрокапсул» або «адсорбційних комплексів», що представляють собою цементні частинки з щільною оболонкою з молекул суперпластифікатора. При замішуванні молекули води не можуть проникнути в «мікрокапсулу» і тому залишаються в міжзерновому просторі, забезпечуючи підвищену рухомість бетонних сумішей.

Оскільки гідратаційні процеси ТБЦ та ЦНВ відбуваються в стиснутому середовищі внаслідок відносно високого вмісту дисперсного наповнювача, продуктом пуцоланової реакції в основному є гідросилікати кальцію CSH(I), які виступають в ролі основного носія міцності в цементному камені. Повільна початкова гідратація ЦНВ сприяє формуванню такої структури каменя, яка характеризується великою кількістю переплетених між собою довгих волокон тоберморитоподібних утворень, характерних для низькоосновних гідросилікатів кальцію. При цьому надійне зчеплення і переплетення волокнистих гідросилікатів кальцію досягається за рахунок максимального зближення частинок твердої фази при високому вмісті дисперсного наповнювача.

Найбільш ґрунтовні дослідження цементів низької водопотреби були проведені для систем з використанням в якості наповнювача кварцового піску. В окремих роботах розглядають введення до складу ЦНВ карбонатного компонента, цементного пилу, відходів збагачення залізних руд. В той же час найвищу активність мають ТБЦ та ЦНВ з використанням золи виносу та доменного гранульованого шлаку, з їх використанням досягається найвища міцність бетону.

В якості пластифікуючого компонента при використанні ТБЦ та ЦНВ розглядалися в основному суперпластифікатори (СП) нафталін-формальдигідного типу, що пояснюється їх доступністю. Іншою позитивною особливістю використання таких СП є те, що вони частково виконують роль інтенсифікатора помелу. Особливий інтерес представляють композиційні тонкодисперсні цементи для бетонів і розчинів на їх основі з використанням суперпластифікаторів нового покоління, зокрема полікарбоксилатних та поліакрилатних з високою водоредукуючою здатністю.

Одним з найбільш поширених мінеральних наповнювачів ТБЦ та ЦНВ, ефективність якого підтверджена практичним досвідом, є зола-винос.

Зола-винос активно впливає на усіх стадіях гідратації і структуроутворення цементних систем, формування структури композиційних будівельних матеріалів і послідовного переходу

від коагуляційної структури до просторового кристалічного каркасу.

На сьогодні, завдяки дослідженням багатьох вчених, розроблені основи теорії цементних бетонів та розчинів з активними мінеральними наповнювачами. Відповідно до теоретичних уявлень властивості наповнених цементних систем – результат синтезу хімічних, фізико-хімічних і фізико-механічних впливів на різних рівнях їх структури, у яких наповнювач приймає активну участь. Зола-виносу, завдяки склоподібній алюмосилікатній фазі, володіє пуцолановою активністю і хімічно взаємодіє з $\text{Ca}(\text{OH})_2$, який виділяється при гідролізі клінкерних мінералів цементу. При цьому не тільки збільшується об'єм гідратних новоутворень, але й прискорюється процес гідролізу, збільшується ступінь гідратації цементу, що, у кінцевому рахунку, позитивно позначається на міцності цементного каменю. Зола-виносу, маючи високу питому поверхню, окрім прямої хімічної взаємодії з цементом, активно впливає на фізико-хімічні процеси біля поверхні розподілу цементне тісто – наповнювач. З утворенням конденсаційно-кристалізаційної структури цементного каменю відбувається формування епітаксіальних контактів між цементним тістом і зернами наповнювача. Відповідно до теорії Гіббса-Фольмера значно зменшується також енергія утворення зародків кристалів при наявності центрів кристалізації, якими служать частинки наповнювача.

Підвищення дисперсності золи може бути досягнуте їх відбором з останніх секцій електрофільтрів або помелом, який руйнує наявні в них агрегати окремих частинок і зменшує їх розміри. Зменшення водопотреби золи при її помелі пояснюється зменшенням кількості капілярної води, утримуваної агрегованими частинками, що веде до більш значного ефекту, ніж зростання кількості адсорбованої плівкової води, яке має місце по мірі збільшення питомої поверхні.

Введення золи сприяє зменшенню водовідділення бетонних сумішей. Пластифікуюча та водоутримуюча здатність золи обумовлює перспективність її застосування також в будівельних розчинах. Суміші з оптимальною добавкою золи

мають достатньо високу життєздатність і придатні для транспортування на далекі відстані.

Вплив золи на міцність бетонів залежить від її складу та дисперсності, вмісту та хіміко-мінералогічного складу цементу, віку та умов обробки бетону. Для оцінки впливу золи на міцність бетону введено поняття її “цементуючої ефективності”, яке характеризується коефіцієнтом цементуючої ефективності $K_{ц.е}$ – витратою цементу, яку може компенсувати 1 кг золи. При прогнозуванні міцності бетону запропоновано знаходити приведені цементно-водне відношення $(Ц/В)_{пр}$ за формулою:

$$(Ц/В)_{пр} = \frac{Ц + K_{ц.е}m_з}{В}, \quad (3.1)$$

де $Ц$ та $m_з$ – відповідно витрата цементу та золи в бетонній суміші; $В$ – витрата води.

З метою визначення значення $K_{ц.е}$ можна встановити для даного цементу експериментальну залежність $R_σ = f(Ц/В)$, потім за значеннями міцності матеріалу з добавкою золи визначити $(Ц/В)_{пр}$. Встановлено, наприклад, що при застосуванні портландцементу Кам'янець-Подільського заводу і золи Ладжинської ТЕС значення коефіцієнта $K_{ц.е}$ коливається від 0,2 до 0,4.

Більшість дослідників відзначають позитивний вплив підвищення дисперсності золи на міцність цементно-золих сумішей. Встановлено, що активність золи істотно підвищується при доведенні розмірів її часток до 5...30 мкм. Характерно, що вплив дисперсності золи на міцність бетону виявляється помітно сильніше, ніж вплив на активність цементу. Це обумовлено помітним пластифікуючим ефектом тонких фракцій золи на бетонні суміші, незважаючи на збільшення нормальної густоти золівмісних в'язучих.

При значеннях водоцементного відношення, прийнятих для випробувань цементів, яскраво вираженої залежності між дисперсністю золи-виносу і міцністю розчинів не виявляється. Цей ефект дозволив зробити висновок, що тонкість помелу золи повинна бути достатньою для руйнування або "обдирання" склоподібної оболонки на поверхні часток.

При виготовленні цементів з використанням крупнодисперсної золи-виносу можливим є спосіб змішування попередньо меленої золи з портландцементом або їх спільний помел. Більшість дослідників рекомендує сумісний помел золи-виносу, клінкеру та добавок. При цьому в золі залишається значна кількість сферичних частинок, що позитивно впливає на водопотребу та ряд інших властивостей бетонів та розчинів.

Для досягнення високої міцності золівмісних бетонів визначальне значення має хіміко-мінералогічний склад клінкеру. У ранньому віці росту міцності бетонів сприяє підвищений вміст у клінкері лугів, які прискорюють хімічну взаємодію золи і цементу. У більш пізньому віці для прояву пуцоланової реакції золи кращими є цементы з підвищеним вмістом аліту, які при гідролізі утворюють значну кількість $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Зола не тільки підвищує когезійну та адгезійну міцність цементної матриці, але й, що дуже важливо, знижує пористість заповнювача.

При деякому відставанні міцності золівмісних бетонів у ранні строки багатьма дослідниками показано, що в період 28...180 діб інтенсивність росту їх міцності при стиску приблизно така ж або вища, ніж без добавки золи.

При тривалому твердінні інтенсивно зростає міцність золівмісних бетонів та розчинів при розтягу та згині. Зразки у вигляді стержнів і брусків, вирізаних з дослідної розчинової кладки, показали міцність при згині золівмісних розчинів через 3 міс. – 80, а через 10 років – 150% міцності контрольних зразків. У бетонах та розчинах із золою так само, як і з іншими активними мінеральними добавками, спостерігається більш високе відношення міцності на розтяг до міцності на стиск.

Випробування бетонів тривалими навантаженнями показали, що введення золи значно знижує їх повзучість.

Зола сприяє підвищенню сульфатостійкості цементних бетонів так само, як і інші активні мінеральні добавки. Це можна пояснити тим, що вміст утвореного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в золівмісних бетонах та розчинах в результаті гідратації C_3S і C_2S в цементі менший, ніж при відсутності золи, оскільки $\text{Ca}(\text{OH})_2$ разом з силікатами, що містяться в золі, утворюють гідросилікати

кальцію. Крім того, зменшується кількість еtringіту в результаті зменшення концентрації $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в тверднучому бетоні. Найбільш значне поліпшення сульфатостійкості відзначається для бетонів на портландцементі з високим вмістом C_3A . У дослідях В.В. Стольникова коефіцієнт стійкості цементу після 6 місячного впливу розчину сульфатів складав 0,33, у той час як при додаванні золи він перевищував 1, що свідчить про повну відсутність корозії зразків. Найкращі результати відзначені для бетонів при введенні золи-виносу з найбільшим вмістом $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$, тобто найбільш кислих за хімічним складом. Введення золи не дозволило досягти підвищення стійкості бетонів при сульфатно-магнезійній агресії. Незначною мірою позначається добавка золи на стійкість бетону до кислотної і магнезійної агресії.

При використанні в бетонній суміші реакційноздатних заповнювачів, які містять опал, халцедон, кремнієві сланці, вулканічні туфи і т.п., зола може бути застосована лише в тому випадку, якщо сумарний вміст лужних оксидів у в'язучому у перерахунку на Na_2O буде не більшим 0,6% за масою. У золах сухого відбору зазвичай міститься 1...5% лужних оксидів, використання їх можливе в практично безлужних цементах. У той же час ряд досліджень показав, що заміщення цементу всіма видами золи зменшує взаємодію між лугами і заповнювачами. Верхня допустима межа можливого сумарного вмісту лужних оксидів у цементно-зольному в'язучому рекомендується 1,5%.

Як і інші активні мінеральні добавки зола-виносу може викликати деяке зменшення морозостійкості бетонів і розчинів. Встановлено, що при дозуванні золи 30...50% маси композиційного в'язучого спостерігається збільшення капілярного підсосу і водопоглинання, особливо в початковий термін випробувань, що свідчить про підвищення абсолютного об'єму відкритих капілярних пор, заповнення яких водою відбувається під дією сил гідростатичного тиску; при цьому загальна пористість хоча і зростає, але значно менше. Дослідження показали, що при заміні цементу золою істотно зменшується об'єм контракційних пор. Із зростанням вмісту золи

співвідношення між капілярною і контракційною пористістю змінюється.

Ступінь зниження морозостійкості бетонів і розчинів при введенні в них золи різна і залежить від її характеристик. До погіршення основних фізико-механічних властивостей цементно-зольних композицій, у тому числі і морозостійкості, приводять неоднорідність складу і властивостей золи. Значне підвищення морозостійкості золівмісних бетонів і розчинів досягається введенням добавок поверхнево-активних речовин (ПАР). Аналіз результатів чисельних досліджень впливу золи-виносу на властивості бетонів та розчинів вказує на необхідність розгляду його в прив'язці до конкретної характеристики компонентів і складів золівмісних сумішей, хіміко-мінералогічного складу золи і клінкеру та інших добавок.

Для отримання високотехнологічних бетонів типу High Performance Concrete (HPC) необхідне зниження водоцементного відношення до $V/C < 0,4$, що вимагає застосування спеціальних технологічних заходів. До таких заходів відносять застосування суперпластифікаторів і комплексних добавок на їх основі. Для бетонів без добавок суперпластифікаторів при низьких значеннях V/C порушується правило незмінності водопотреби бетонної суміші, тобто при збільшенні витрати портландцементу більше 400 кг/м^3 (для тонкомелених цементів більше 350 кг/м^3) необхідно для одержання рухомих сумішей одночасно збільшувати і витрату води для компенсації підвищення в'язкості цементного тіста. Відповідно збільшується витрата цементу, що погіршує структуру бетону, викликає підвищену усадку та деструктивні явища. Все це знижує ефективність використання цементу. Тому збільшення витрати цементу в бетонах більше $550..600 \text{ кг/м}^3$ недоцільне як з техніко-економічних міркувань, так і з позицій покращення технічних властивостей бетону.

В наших експериментах враховуючи результати досліджень ефективності різних складів на властивості золівмісних КЦ поліфункціональних модифікаторів (ПФМ) – комплексних добавок був обраний ПФМ, який містив поряд з інтенсифікатором помелу пропіленгліколем, що вводиться при

помелі цементу, суперпластифікатор полікарбоксилатного типу SikaVC225.

Для дослідження водопотреби і легкоукладальності бетонних сумішей на основі композиційних золівмісних цементів з добавками ПФМ був реалізований трирівневий чотирьохфакторний план В₄, умови якого наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Умови планування експериментів

Фактори впливу		Рівні варіювання			Інтервал
Натуральний вид	Кодованний	-1	0	+1	
Вміст добавки ПФМ у КЦ, %	x ₁	0,4	0,7	1,0	0,3
Питома поверхня КЦ, S _{штг} , м ² /кг	x ₂	350	450	550	100
Витрата цементу Ц, кг/м ³ .	x ₃	300	400	500	100
Рухомість суміші, ОК, см	x ₄	2	13	24	11

З урахуванням речовинного складу портландцементу склад отриманого в'язучого був наступний: клінкер – 50%, доменний шлак – 12%, зола-виносу – 34%, гіпсовий камінь – 4%, пропіленгліколь – 0,04%.

Після обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримали математичну модель водопотреби бетоної суміші при використанні золівмісних композиційних цементів.

$$\begin{aligned}
 B_{6,c} = & 142 - 24,92x_1 + 4,14x_2 + 3,92x_3 + 5,49x_4 - \\
 & - 0,63x_1x_2 + 0,63x_1x_3 - 1,25x_2x_4 + 0,38x_3x_4 - 0,68x_1^2 + \\
 & + 1,82x_2^2 + 0,82x_3^2 - 1,18x_4^2
 \end{aligned}
 \quad (3.2)$$

Аналізуючи математичну модель (3.2) звернемо увагу на наявність суттєвої взаємодії ефектів впливу питомої поверхні цементу та витрати КЦ, а також рухомості бетонної суміші. Зокрема, при збільшенні $S_{\text{пит}}$ водопотреба бетонної суміші зменшується при одночасному збільшенні показника рухомості та зменшенні витрати цементу. Суттєвий нелінійний ефект простежується при аналізі впливу питомої поверхні та рухомості сумішей. Ранжування кількісних ефектів впливу досліджуваних факторів на водопотребу дозволяє розташувати їх за спадаючою силою впливу: $x_1 > x_2 > x_3 > x_4$.

Графічні залежності водопотреби бетонної суміші від досліджуваних факторів наведені на рис. 3.1.

З рис. 3.1, слідує, що найбільший вплив на водопотребу бетонних сумішей має вміст ПФМ₁, збільшення витрати якого з 0,4% до 1% (від маси КЦ) зумовлює практично лінійне зменшення водопотреби бетонної суміші з 170...180 л/м³ до 110...120 л/м³. Вплив інших факторів є менш значним. При збільшенні рухомості бетонної суміші від жорсткої до литої консистенції витрата зростає на 10...15 л/м³. Підвищена дисперсність в'язучого (450...550 м²/кг) спричиняє збільшення витрати води на 7...10 л/м³ у порівнянні з питомою поверхнею 350...450 м²/кг. При збільшенні дисперсності з 350 до 450 м²/кг підвищення витрати води є меншим у порівнянні з $S_{\text{пит}} - 450...550$ м²/кг. Вміст КЦ є найменш значимим фактором щодо впливу на водопотребу в дослідженому діапазоні, при збільшенні долі якого з 300 кг/м³ до 500 кг/м³ водопотреба зростає на 3...6 л/м³, а при підвищеній дисперсності – до 10 л/м³.

Таким чином, проведені дослідження свідчать про те, що для отримання литих та самоущільнювальних бетонних сумішей на основі КЦ в усьому діапазоні витрат цементу його дисперсності і рухомості бетонної суміші необхідною умовою є підвищена витрата ПФМ.

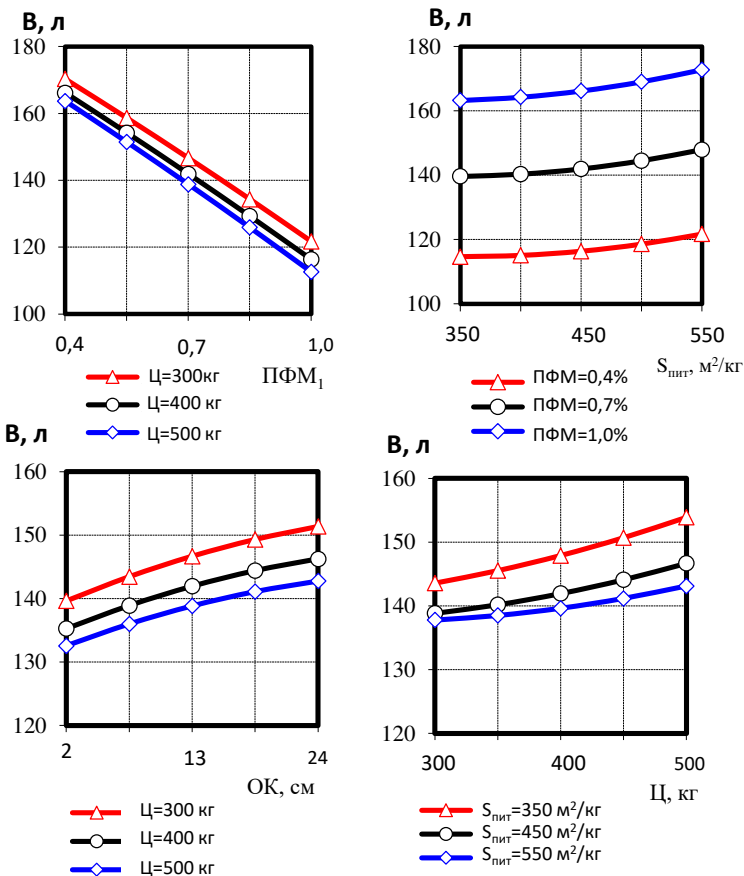


Рис. 3.1. Вплив факторів складу на водопотребу бетонних сумішей на основі золівмісних КЦ

Аналіз отриманих графіків свідчить про те, що ОК > 22 см досягається при витраті суперпластифікатора 0,7...1%, S_{пит} – 350...450 м²/кг. На величину ОК поряд з СП впливає питома поверхня, збільшення якої призводить до зменшення рухомості. Витрата цементу, в свою чергу, не чинить суттєвого впливу на рухомість. Визначення водопотреби і її регулювання від зміни

основних технологічних факторів може здійснюватися за допомогою номограми (рис. 3.2), що побудована на основі математичної моделі (3.1). Як відомо, водопотреба бетонних сумішей кореляційно зв'язана з нормальною густиною цементу. Відповідні експериментальні дані щодо залежності водопотреби бетонних сумішей на основі композиційних цементів з добавкою ПФМ при різній легкоукладальності наведені у табл. 3.2.

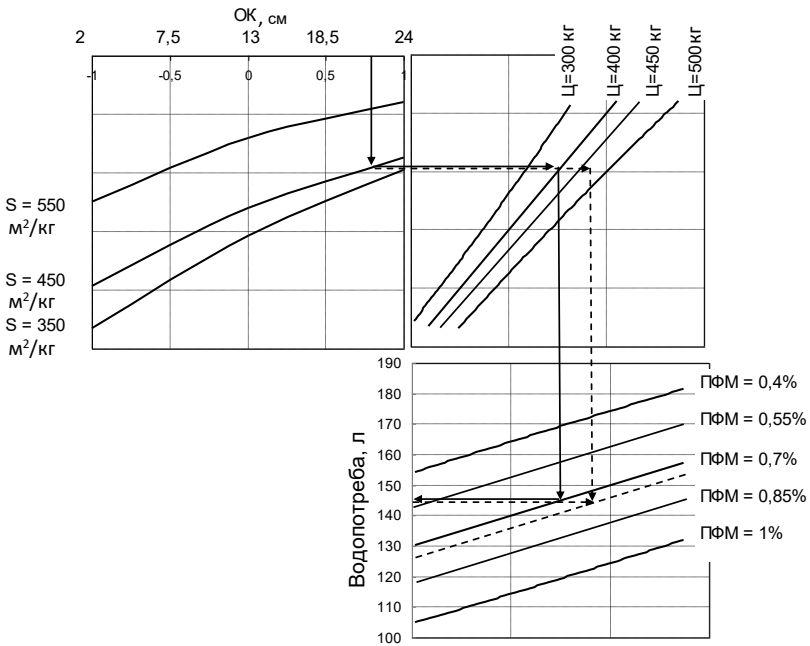


Рис. 3.2. Номограма визначення водопотреби бетонних сумішей на основі золівмісних КЦ

Таблиця 3.2

Залежності водопотреби бетонних сумішей від НГ цементу та максимальної крупності заповнювачів*

НГ КЦ, %	Водопотреба бетонної суміші, кг/м ³ при її консистенції			
	ОК = 1...4 см		ОК > 22 см	
	D _{max} =20мм	D _{max} =5мм	D _{max} =20мм	D _{max} =5мм
19	105	135	145	230
22	125	165	175	250
25	150	220	210	275

* Вміст добавки ПФМ в цементі складає 0,7% від маси КЦ.

При аналізі математичних моделей, прослідковується суттєва взаємодія В/Ц та $S_{\text{пит}}$ на міцність як ранню так і марочну. Ранжування кількісних ефектів впливу основних технологічних факторів на міцнісні показники бетону при стиску дозволяє розташувати їх в такому порядку (В/Ц > вміст добавки суперпластифікатора > тонкість помелу КЦ). Вплив факторів на міцність на розтяг при розколюванні має подібний характер.

Графічні залежності міцності бетону на стиск у віці 1 та 28 діб, побудовані на основі отриманих моделей, наведені на рис. 3.3, та на розтяг при розколюванні у віці 28 діб (рис. 3.4).

Аналіз отриманих даних, свідчить, що міцність при стиску досліджуваних бетонів у віці 1 діб лежить в межах 20...43 МПа, у віці 28 діб – 59...92 МПа, при витраті в'язучого 500 кг/м³ (вміст цементного клінкеру – 250 кг/м³ бетоної суміші). Збільшення $S_{\text{пит}}$ з 350 до 550 м²/кг призводить до закономірного збільшення міцності на 35-50% в усі терміни твердіння. Однак у віці 1 доби бетони на більш тонкодисперсному цементі ($S_{\text{пит}} = 450...550$ м²/кг) мають вищу міцність на 40...50% у порівнянні з $S_{\text{пит}} = 350$ м²/кг, у більш пізньому віці вплив дисперсності згладжується. В/Ц має також суттєвий вплив на міцність як ранню, так і марочну. Збільшення В/Ц з 0,25 до 0,35 супроводжує спад міцності на 10...20 МПа.

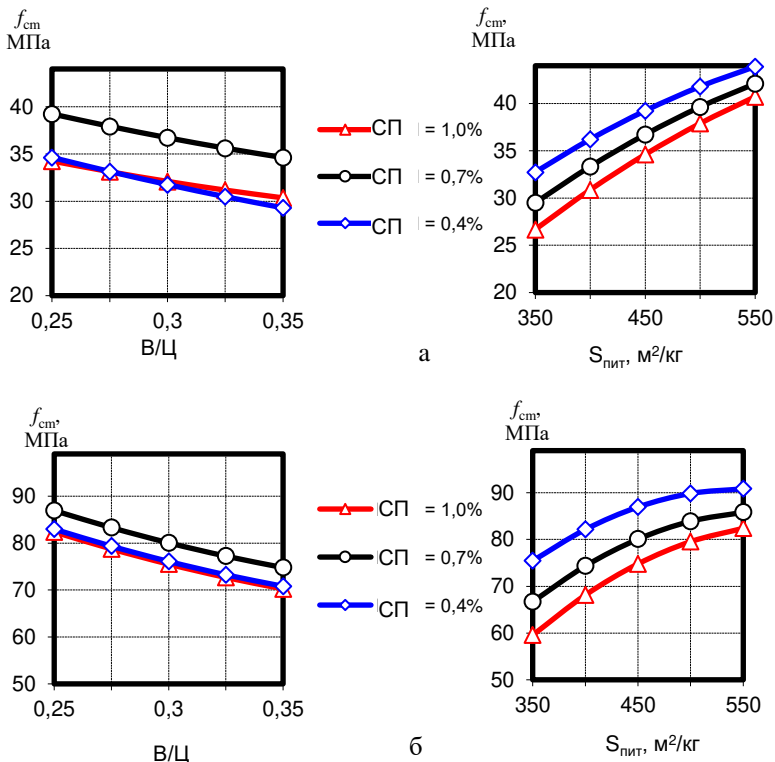


Рис. 3.3. Залежності міцності бетону на стиск у віці 1 (а) та 28 діб (б)

На основі отриманих даних та математичної моделі побудована номограма (рис. 3.5).

Важливим технологічним процесом, який впливає на структуру і експлуатаційні властивості бетонних та залізобетонних конструкцій є тепловологісна обробка (ТВО). Ця технологічна стадія в сучасних умовах є ефективним методом прискорення твердіння, що веде за собою скорочення процесу виробництва та підвищення продуктивності. Вона багато в чому зумовлює кінцеві фізико-механічні властивості бетону, застосування певних режимів ТВО дозволяє в тій чи іншій мірі керувати процесами структуроутворення. Це особливо важливо

для бетонів, до яких ставляться підвищені вимоги за довговічністю, наприклад для дорожнього чи водогосподарського будівництва. У цьому випадку слід застосовувати "м'які", низькотемпературна режими, які в той же час дозволяють досягати достатньої розпалубочної і передаточної міцності.

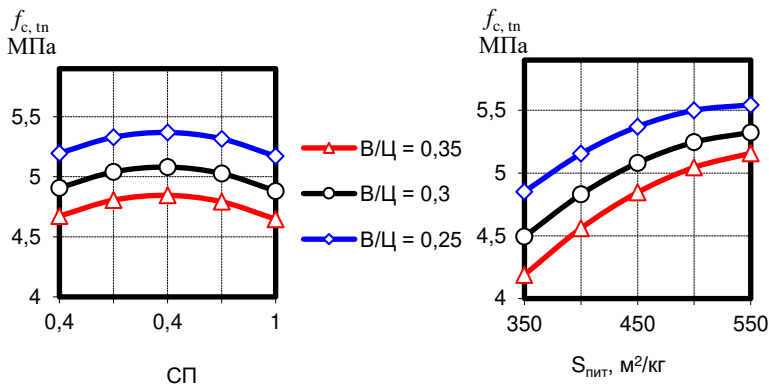


Рис. 3.4. Залежності міцності бетону на розтяг при розколюванні у віці 28 діб

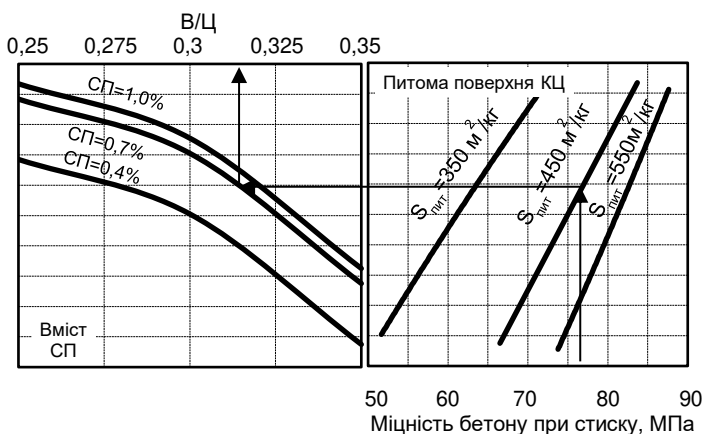


Рис. 3.5. Номограма визначення міцності бетонів на основі золівмісних КЦ у віці 28 діб

Як відомо, тепла обробка більшою мірою прискорює твердіння бетонів на малоактивних цементах, ніж на в'язучих

підвищеної активності. Однак в заводському виробництві для одержання максимально можливої абсолютної міцності бетону в короткі терміни доцільно застосовувати швидкотверднучі цементи та цементи підвищених марок. Тому досить ефективними можуть бути модифіковані золівмісні композиційні цементи.

Графічні залежності міцності пропареного бетону на основі золівмісних КЦ від технологічних факторів через 4 год після ТВО наведені на рис. 3.6, а у віці 28 діб на рис. 3.7.

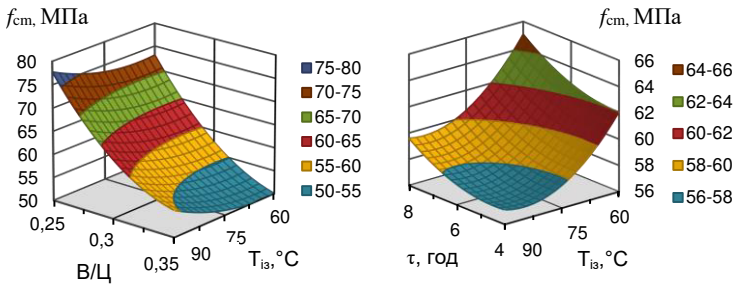


Рис. 3.6. Вплив технологічних факторів на міцність бетону після пропарювання

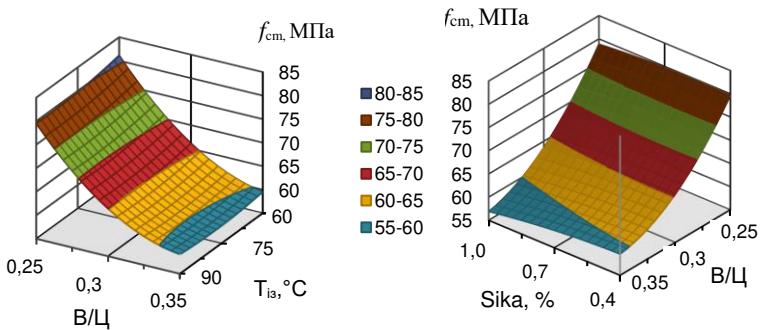


Рис. 3.7. Вплив технологічних факторів на міцність пропареного бетону у віці 28 діб на основі золівмісних КЦ

Як і очікувалось, найбільш впливовим є фактор В/Ц, однак простежується його деяка взаємодія з параметрами теплової обробки – тривалістю та максимальною температурою. Серед цих двох факторів температура є більш впливовим, збільшення тривалості ізотермічної витримки на 2 год. дозволяє компенсувати зниження максимальної температури на 15° С за інших рівних умов пропарювання бетону на основі золівмісних КЦ.

У випадку збільшення ізотермічної витримки з 4 до 8 год спостерігаємо ріст міцності в межах 10...15%, так само як і при збільшенні максимальної температури на 25...30° С. Підвищення кількості суперпластифікатора у в'язучому з 0,4% до 0,7...1,0% може супроводжуватись незначним зниженням міцності пропареного бетону (рис. 3.7), однак при цьому отримуються суміші литої консистенції з розпливом конуса до 60 см, що є позитивним моментом при виготовленні сучасних високотехнологічних бетонів, здатних до самоущільнення

Деформативні властивості. Особливості порової структури бетонів, склад і структура цементного каменю, його об'ємна концентрація в бетонах на основі золівмісних КЦ мають суттєвий вплив на їх деформативні властивості.

Модуль пружності бетону E_b можна виразити, ґрунтуючись на теоретичних даних, отриманих при розгляді бетону як двохфазної системи, зі сферичними частинками, рівномірно розподіленими в цементному камені:

$$E_p = \frac{V_k + (2 - V_k)E_z / E_k}{2 - V_k + V_k E_z / E_k}, \quad (3.3)$$

де V_k – об'ємна концентрація цементного каменю; E_z і E_k – модуль пружності заповнювача і цементного каменю.

На модуль пружності цементного каменю вирішальний вплив відіграє його пористість V_n і пружність т.з. “гелево-кристалічної фази” ($E_{z.k}$), що впливає із відомого виразу:

$$E_k = (1 - \nu_n)^3 E_{z.k}. \quad (3.4)$$

Найвні літературні дані про вплив ПАР суперечливі, хоча більшість дослідників вважає, що введення добавок знижує модуль пружності бетону. Зниження модуля пружності з добавками ПАР пояснюється за рахунок адсорбційного модифікування структури цементного каменю або, виникненням у гідратованих оболонках зерен більшої кількості структурних елементів, що приводить до збільшення поверхні ковзання часток. При введенні пластифікуючих добавок варто враховувати поряд з модифікуванням структури вплив двох можливих протилежних по дії ефектів – зменшення пористості цементного каменю і зменшення об'єму цементного каменю в бетоні.

В.Г. Батраков проаналізував ряд експериментальних результатів вітчизняних і закордонних дослідників про вплив добавки суперпластифікатора СП-1 на модуль пружності прийшов до висновку, що для литих бетонів введення добавки при незначному підвищенні міцності (103,3%) приводить до незначного зменшення модуля пружності (98,8%). При використанні суперпластифікатора для зменшення В/Ц і збільшення міцності, модуль пружності бетону може істотно зростати. Саме це можна прогнозувати для композиційних цементів та високоміцних бетонів, де суперпластифікатор вводиться як у в'язуче, так і у бетон з метою максимального зниження пористості цементного каменю.

Як і для звичайних для високоміцних бетонів вирішальний вплив на характер зв'язку модуля пружності і міцності бетону, відіграють пружні властивості заповнювача, В/Ц і вміст цементного тіста в бетонній суміші.

Деформації усадки досліджених авторами бетонів (табл. 3.3) визначалися за допомогою індикаторів годинникового типу з ціною поділки 1 мкм, встановлених по двох протилежних гранях призм на базі 200 мм. Досліди проводили при температурі $(18 \pm 2)^\circ \text{C}$ і відносній вологості $(75 \pm 5)\%$.

Таблиця 3.3

Деформативні властивості бетонів на основі КЦ

№ з/п	Параметри складу бетонної суміші			Міцність, МПа у віці 28 діб		Модуль пружності, E_b МПа $\times 10^4$		Деформація усадки, ϵ_{yc} мм/м $\times 10^{-5}$ через, діб	
	Вміст КЦ, кг/м ³	$S_{птг}$, м ² /кг	В/Ц	Куби-кова	Призма	Розрахунковий	Експериментальний	28	90
1	500	450	0,25	70,1	53,5	5,50	5,55	1,7	2,1
2	500	550	0,25	74,9	58	5,78	5,83	2,1	2,4
3	500	450	0,35	54,7	41,5	4,55	4,61	2,4	2,6
4	500	550	0,35	59,8	45,7	4,88	4,94	2,6	2,8
5	300	450	0,35	41,4	31,1	3,64	3,68	2,1	2,4
6	300	550	0,35	45,4	34,5	3,92	3,95	2,3	2,5

На усадку крім водовмісту впливають також, хоча і в меншій мірі, значення В/Ц, питомої поверхні цементу і вміст його в бетонній суміші. Усадка бетонів на основі КЦ є меншою в 1,2...2 рази, порівняно з усадкою бетонів на основі товарних цементів. Отримані результати (табл. 3.3) показують, що при використанні КЦ з питомою поверхнею 450...550 м²/кг можлива практично повна компенсація усадочної деформацій бетону. Ефект зниження усадочних деформацій можна пояснити високою водоутримуючою здатністю КЦ, тобто переходом значної кількості води в адсорбційно-зв'язаний стан і запобіганням швидкого поверхневого висихання бетону.

Тріщиностійкість. Тріщиностійкість бетонів залежить від цілого комплексу чинників: термічного розширення, повзучості, зміни пружно-пластичних характеристик бетону зі зміною температури та ряду інших. Тому вибір критерію та оцінка тріщиностійкості бетонів є досить складним завданням.

Зменшення небезпеки тріщиноутворення масивного бетону при введенні до їх складу або складу в'язучого активних мінеральних наповнювачів, зокрема золи-виносу пов'язують зі зниженням тепловиділення. Цей критерій актуальний для бетонів, що застосовують для зведення ряду гідротехнічних споруд. За критерієм термічної тріщиностійкості визначення порівняльної тріщиностійкості утруднене через необхідність врахування впливу масштабного чинника при переході від зразка до конструкції. Для цієї мети найбільш доцільно використання іншого критерію - відношення міцності на розтяг при розколюванні до міцності на стиск ($f_{c,m}/f_{c,m}$). Збільшення цього відношення вважається більш сприятливим з позиції тріщиностійкості, як було показано в ряді досліджень.

Аналіз результатів експериментальних досліджень дозволяє вважати, що для золовмісних бетонів з добавками суперпластифікаторів, які тверднуть в природних умовах, величина відношення $f_{c,m}/f_{c,m}$ дещо вища у порівнянні з бетонами виготовленими на основі бездобавочних портландцементів. Позитивне значення має введення добавки золи в результаті покращення структури цементного каменю (рис. 3.8).

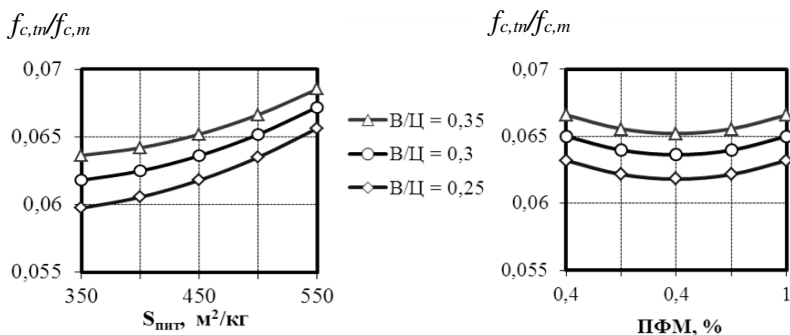


Рис. 3.8. Вплив технологічних факторів на величину коефіцієнта тріщиностійкості бетонів у віці 28 діб на основі золовмісних КЦ

Зменшення відношення $f_{c,m}/f_{c,m}$ в часі відображає особливості процесів структуроутворення цементного каменю,

складу бетону та умов його твердіння. Відомі для звичайних цементних бетонів положення повною мірою можна віднести і до високоміцних бетонів на основі золівмісних КЦ. Зі збільшенням віку таких бетонів зменшується кількість факторів і їх взаємодій, що впливають на відношення $f_{c,m}/f_{c,m}$.

Водонепроникність. Водонепроникність бетону у вирішальній мірі залежить від особливостей його пористої структури. Якщо на міцність бетону основний вплив має загальна пористість, то водонепроникність є функцією відкритої пористості. Основними шляхами проникнення води в бетон є пори седиментаційного походження, утворення яких найбільш характерно для бетонів з підвищеною рухомістю. Седиментація залежить головним чином від в'язкості цементного тіста, а основною седиментаційною характеристикою бетонної суміші є її водовідділення.

Як було відзначено раніше, зола-виносу робить істотний вплив на в'язкість пластифікованого цементного тіста і водовідділення бетонної суміші. За рахунок золи-виносу, що вводиться до складу КЦ та підвищеній дисперсності в'язучого в бетоні зменшується кількість мікропор і має місце кольматація відкритих пор. Основним чинником, що визначає величину водонепроникності високоміцних традиційних бетонів, є водоцементне відношення. Деяке збільшення водонепроникності бетону на основі КЦ, як показали результати експериментальних досліджень (табл. 3.4) з В/Ц 0,25...0,4 може бути пояснено як зменшенням загальної пористості, так і перерозподілом співвідношення між різними типами пор.

Із збільшенням віку бетону водонепроникність підвищується в результаті незворотної зміни структури порового простору і збільшення об'єму твердої фази в цементному камені. За даними В.В. Стольнікова, при достатньому вологісному режимі твердіння підвищення водонепроникності бетону в пізні терміни значно більше, ніж відносний приріст міцності на стиск.

З метою визначення впливу ступеня дисперсності КЦ на проникність був визначений характер пористості зразків бетонів на основі золівмісних КЦ різної дисперсності. Було доведено, що введення КЦ з дисперсністю 350 м²/кг незначно зменшує

кількість відкритих капілярних пор в бетоні. Із збільшенням дисперсності в'язучого до $S_{\text{пит}}=450\dots550 \text{ м}^2/\text{кг}$ загальна кількість капілярних пор суттєво зменшується. Висока дисперсність призводить до значного зменшення еквівалентного радіуса пор і підвищення значення питомої поверхні пор, що також зумовлює зниження проникності бетону.

Таблиця 3.4

Властивості, які визначають довговічність високотехнологічних бетонів на основі КЦ

№ з/п	Параметри складу бетонної суміші			Кубикова міцність, МПа у віці 28 діб	$\frac{f_{pr}}{f_{cm}}$	Водонепроникність, W, МПа	Морозостійкість, F, циклів
	Вміст КЦ, кг/м ³	$S_{\text{пит}}$, м ² /кг	В/Ц				
1	500	450	0,25	70,1	0,76	1,3	430
2	500	550	0,25	74,9	0,77	1,4	470
3	500	450	0,35	54,7	0,76	1,1	360
4	500	550	0,35	59,8	0,76	1,2	390
5	300	450	0,35	41,4	0,75	0,8	340
6	300	550	0,35	45,4	0,76	1	380

Морозостійкість. Морозостійкість бетону значною мірою визначається характером його порової структури. Капілярні пори є основним дефектом будови щільно укладеного бетону, знижуючим його морозостійкість. За даними Г.І. Горчакова морозостійким виявляється бетон з вмістом капілярних пор не більше 5...7 %. Крім того, істотний вплив на морозостійкість надають розміри пор, негативно впливають пори з розміром більше 10^{-5} см.

Отримані результати вказують на низьку відкриту пористість (менше 3...5%) бетонів на основі тонкодисперсних

КЦ і пояснюють можливе підвищення їх морозостійкості в порівнянні з традиційними бетонами. Критичне число циклів заморожування і відтавання наведено в табл. 3.4. Зола-виносу, яка часто призводить до зниження морозостійкості, при введенні її до складу КЦ в композиції з добавками ПФМ сприяє деякому підвищенню морозостійкості високоміцних бетонів, що є результатом зменшення розмірів пор. Збільшення дисперсності в'язучого до $S_{\text{пит}}=450\dots550 \text{ м}^2/\text{кг}$ більшою мірою сприяє зменшенню розмірів відкритих капілярних пор і, як наслідок, підвищенню морозостійкості бетонів на основі золівмісних КЦ.

Проектування складів. Проектування складів високоміцних бетонів при застосуванні золівмісних композиційних цементів як і інших видів бетону зводиться до визначення співвідношення компонентів, яке забезпечує комплекс проектних показників, зокрема міцність на стиск та розтяг у різному віці, необхідну рухомість бетонної суміші.

Порядок розрахунків складів бетону на основі КЦ за такою методикою при заданих значеннях певних факторів передбачає знаходження В/Ц. З цією метою при встановленні для конкретної ситуації основних факторів та діапазонів їх варіювання можна використовувати експериментально-статистичні моделі або номограми на їх основі. Одна із можливих методик, що ґрунтується на використанні номограм (рис. 3.3 і 3.5).

Потім визначають витрату води для заданої легкоукладальності, або користуючись номограмою (рис. 3.3) водопотреби бетонної суміші, залежно від вихідних параметрів (рухомості, питомої поверхні та витрати цементу, вмісту ПФМ).

Витрати композиційного цементу, $\text{кг}/\text{м}^3$:

$$KЦ = B / (B / Ц)$$

Якщо отримана витрата цементу перевищує можливе максимальне значення, слід збільшити витрату ПФМ, перерахувавши її за номограмою на рис 3.3. Поправку на збільшення витрати води приймають за табл. 3.5. Якщо прийнято рішення збільшити водопотребу, то слід перерахувати витрату цементу з урахуванням відкоректованої водопотреби.

Таблиця 3.5

Поправка на водопотребу бетонної суміші при витраті цементу, більший 400 кг/м³ (ПФМ=0,4%)

Питома поверхня КЦ, м ² /кг	Витрата композиційного цементу, кг/м ³									
	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600
	Збільшення водопотреби бетонної суміші понад розрахункову, кг/м ³									
550	4	8	12	15	20	25	30	35	40	45
450	3	6	9	12	15	19	23	27	31	35
350	2	4	6	8	10	12	15	18	21	25

Витрату заповнювачів визначають за методом абсолютних об'ємів.

Приймають задані технологічні параметри (дисперсність цементу, вміст ПФМ, параметри ТВО) на допустимих рівнях. Розрахункові склади коректують спеціальними дослідями.

Приклад розрахунку складу бетону.

Необхідно запроектувати склад бетону класу С50/60, з рухомістю, за осадкою конуса, ОК=22 см, при використанні композиційного цементу (вміст золи-виносу 40%) з питомою поверхнею $S_{\text{пит}}=450$ м²/кг. Щебінь гранітний фр. 5...20 мм з $\rho_{\text{щ}}=2700$ кг/м³ та $\rho_{\text{н.щ}}=1450$ кг/м³, пісок середньої крупності з $\rho_{\text{п}}=2650$ кг/м³ та $\rho_{\text{н.п}}=1470$ кг/м³.

Необхідна середня міцність бетону класу С50/60, визначена на зразках-кубах при коефіцієнті варіації 13,5% становить 77 МПа. Нормується тільки міцність при стиску, тому за номограмою (рис. 3.5) визначаємо необхідне В/Ц=0,315.

1. При вихідних параметрах рухомості ОК=22 см та дисперсності цементу $S_{\text{пит}}=450$ м²/кг задаємось в першому наближенні орієнтовною витратою цементу Ц=400 кг/м³ та добавки ПФМ=0,7%. За допомогою номограми (рис. 1.35) визначимо витрату води, В=145 л/м³.

Визначимо витрату цементу, кг/м³:

$$\text{Ц}=145/(0,315) = 460\text{кг.}$$

2. Згідно табл. 3.5 коректуємо витрату води, при $\Pi=460$ збільшуємо кількість води на 9 л. Таким чином $V = 154$ л.

3. Остаточню розрахована витрата цементу, кг/м^3 :

$$\Pi = 154 / (0,315) = 489 \text{ кг.}$$

4. Визначимо витрату заповнювачів за методом абсолютних об'ємів:

- щебеню, кг/м^3 :

$$\Pi_{\text{Щ}} = \frac{1000}{\alpha \cdot \frac{V_{\text{Щ}}^{\text{п}}}{\rho_{\text{н.Щ}}} + \frac{1}{\rho_{\text{Щ}}}} = \frac{1000}{1,37 \cdot \frac{0,46}{1,45} + \frac{1}{2,7}} = 1238 \text{ кг,}$$

де α – коефіцієнт розсуву зерен; $V_{\text{Щ}}^{\text{п}}$ – пустотність крупного заповнювача

$$V_{\text{Щ}}^{\text{п}} = 1 - \frac{\rho_{\text{н.Щ}}}{\rho_{\text{Щ}}} = 1 - \frac{1,45}{2,7} = 0,46$$

- піску, кг/м^3 :

$$\begin{aligned} \Pi &= \left(1000 - \left(\frac{\Pi}{\rho_{\text{Ц}}} + V + \frac{\Pi_{\text{Щ}}}{\rho_{\text{Щ}}} \right) \right) \cdot \rho_{\text{п}} = \\ &= \left(1000 - \left(\frac{489}{3,1} + 154 + \frac{1238}{2,7} \right) \right) \cdot 2,65 = 609 \text{ кг.} \end{aligned}$$

Розрахунковий номінальний склад бетону, кг/м^3 :

$\Pi = 489 \text{ кг/м}^3$; при $V/\Pi = 0,315$;

$V = 154 \text{ кг/м}^3$;

$\text{ПФМ} = 0,007 \times 489 = 3,42 \text{ кг/м}^3$;

$\Pi = 609 \text{ кг/м}^3$;

$\Pi_{\text{Щ}} = 1238 \text{ кг/м}^3$.

3.2. Бетони з добавкою метаксаоліну

Конкурентоздатною мінеральною добавкою для створення високоефективних поліфункціональних модифікаторів бетонів та розчинів є високоактивний метаксаолін (МТК) – продукт термічної обробки природної алюмосилікатної сировини – каолінів.

Перші відомості про використання метаксаоліну в якості пуцоланової добавки в цементні системи відносяться до 1962 р. Метаксаолін додавали в бетон при будівництві гребель в Бразилії, щоб запобігти можливому руйнуванню в результаті реакції між лугами в цементі і діоксиду кремнію в заповнювачах. У ряді країн промисловістю виробляється метаксаолін зі стабілізованим хімічним складом (“комерційний метаксаолін”). “Комерційний метаксаолін” використовується в основному при виробництві архітектурного бетону та декоративних будівельних сумішей з поліпшеними технологічними властивостями і високою архітектурною виразністю, а також у сумішах для відновлювальних робіт.

Дослідження, проведені Kostuch та ін. показали, що метаксаолін реагує з гідроксидом кальцію протягом 28 діб. Порівняння пуцоланової активності метаксаоліну, доменного гранульованого шлаку, мікрокремнезему і золи-виносу, показали, що метаксаолін володіє найвищою пуцолановою активністю (поглинання 1000 мг $\text{Ca}(\text{OH})_2$ на один грам добавки).

Введення до портландцементу 10% метаксаоліну знижує вміст вільного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в розчині порового простору на 70%, а при 20% метаксаоліну вміст вільного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ досягає нуля.

Позитивний вплив добавки метаксаоліну в зниженні загальної пористості цементного каменю супроводжується зменшенням водопоглинання, швидкості дифузії солей і висолоутворення. Це підтверджується дослідженнями Ларбі, відповідно до яких, при вмісті в портландцементі до 20% метаксаоліну, максимальний розмір пор зменшується майже в 10 разів. Ці автори стверджують, що зниження загальної пористості і розміру пор супроводжується зменшенням проникності

розчину, і відповідно більш ніж в 2 рази коефіцієнта водопоглинання.

Дослідження показали, що максимальне збільшення міцності бетону – 35% при В/Ц=0,4 і 25% при В/Ц=0,45 спостерігалось на 7-й день тверднення при вмісті метакаоліну в цементі близько 15%. Розглянутий вище ефект типовий при використанні метакаоліну в якості окремого компонента. Значна зміна впливу метакаоліну на властивості цементних систем спостерігається при його одночасному введенні разом із добавкою суперпластифікатора.

На рис. 3.9 представлені поля міцності бетону на стиск у віці 3 та 28 діб тверднення залежно від значень факторів варіювання.

Внаслідок активного зв'язування метакаоліном $\text{Ca}(\text{OH})_2$ та утворення дрібнокристалічної щільної структури спостерігається зростання міцності бетону. Однак, при високих витратах метакаоліну частинки метакаоліну, які не вступають у реакцію, блокують ріст гідратних новоутворень, що призводить до зменшення міцності.

Критерієм ефективності мікронаповнювачів може бути коефіцієнт ефективності K_e , за яким їх умовно поділяють на високоефективні ($K_e \geq 1,2$) та малоефективні ($K_e < 1,2$). Пропонується наступна формула для визначення коефіцієнту ефективності:

$$K_e = f_i / \sqrt{[C_i + K_u(C_i - C_k)]} \times 100, \quad (3.5)$$

де f_i і C_i – відповідно міцність бетону і витрата цементу у зразках з наповнювачами порівняно зі зразками з добавкою суперпластифікатора (СП), %; K_u – коефіцієнт зниження витрати цементу при введенні добавки СП.

Величина K_u знаходиться за формулою:

$$K_u = (C_0 - C_k) 100 / (C_0 C_k), \quad (3.6)$$

де C_0 , C_k – витрата цементу в контрольних зразках відповідно без добавки і з добавкою СП, $\text{кг}/\text{м}^3$; C_k – доза добавки СП в контрольному складі, %; C_i – доза добавки СП, необхідна для надання сумішам з наповнювачами необхідної рухомості, %.

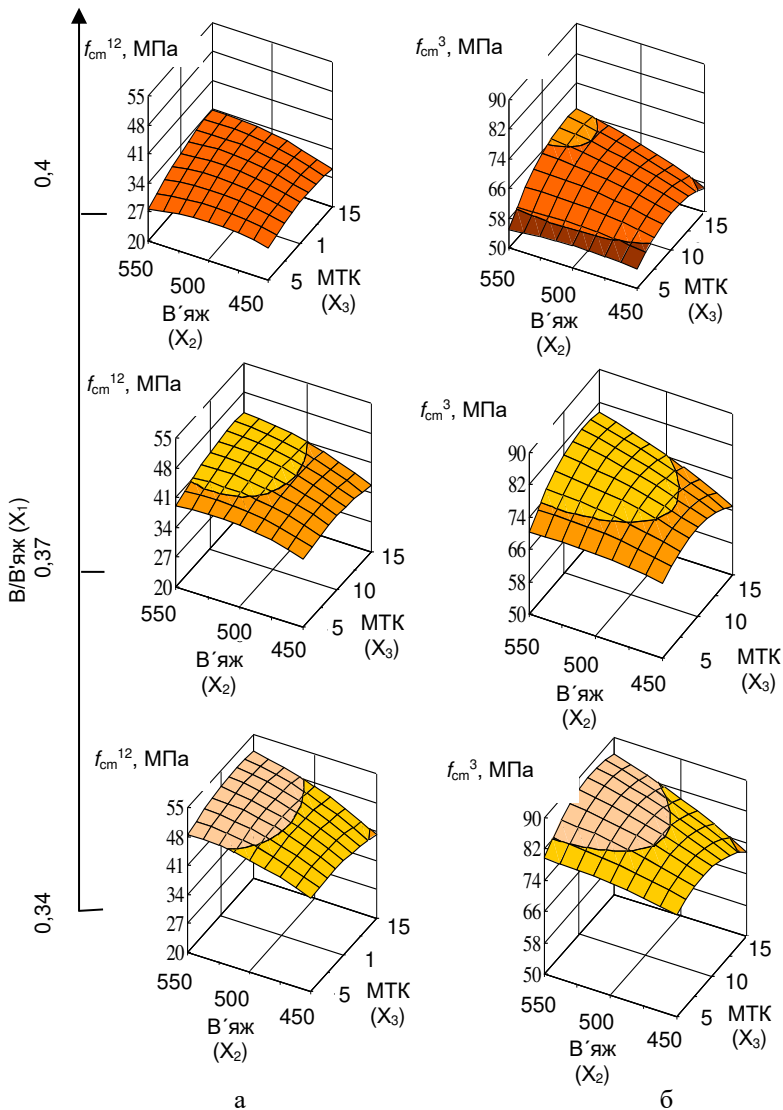


Рис. 3.9. Міцність бетонів на стиск залежно від витрат в'яжучого (В'яж) і метакаоліну (МТК) у віці: а – 12 год; б – 3 доби

Важливою позитивною особливістю цієї формули є те, що в ній відокремлені ефекти, отримані від дії суперпластифікатора та мінеральної добавки.

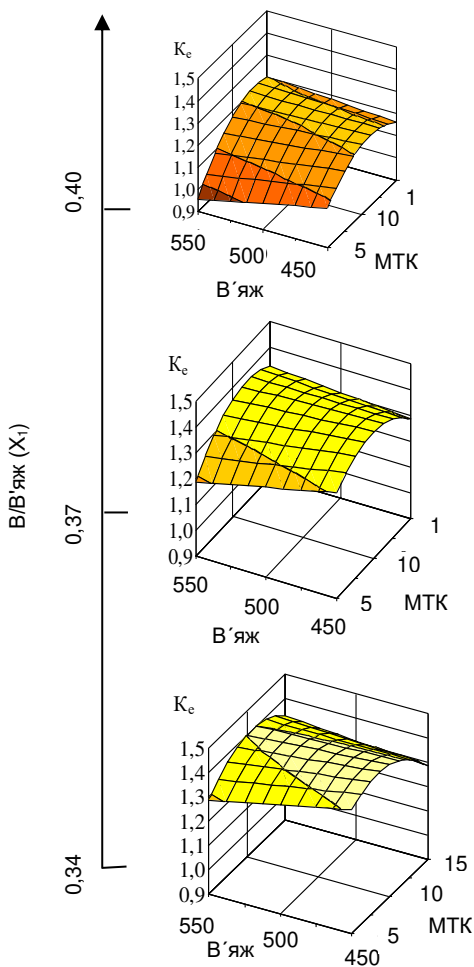


Рис. 3.10. Коефіцієнт ефективності (K_e) залежно від вмісту добавки метакаліну (МТК), % за масою і витрати в'язучого, $\text{кг}/\text{м}^3$

На рис. 3.10 представлена залежність коефіцієнту ефективності від досліджуваних факторів. Зменшення В/В'яж призводить до збільшення значення K_e внаслідок значного росту міцності бетонів. Збільшення вмісту в'яжучого призводить до зворотного ефекту. Зростання частки метаксаоліну у в'яжучому викликає збільшення значення K_e . Як і для міцності бетону на стиск, ця залежність має екстремум, що відповідає максимальному значенню K_e , яке дозволяє віднести метаксаолін до високоефективних мінеральних добавок за умови $V/V'яж < 0,4$.

Введення метаксаоліну до складу бетону в результаті збільшенні однорідності бетону та покращення зчеплення між його складовими збільшує поряд з міцністю на стиск також міцність бетону на осьовий розтяг (рис. 3.11).

$f_{c,tk}$, МПа

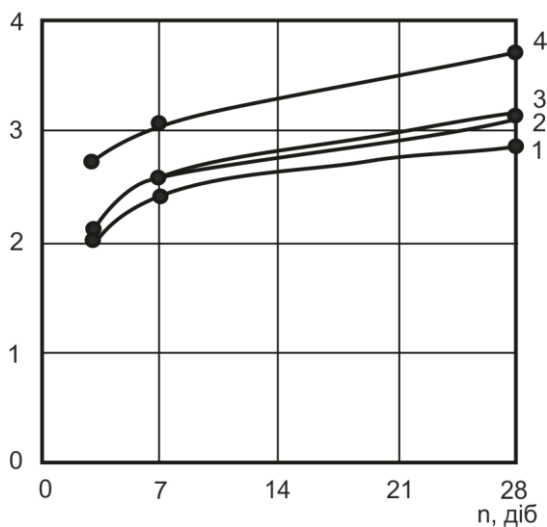


Рис. 3.11. Міцність бетонів з добавкою метаксаоліну на осьовий розтяг:

- 1 – В/В'яж=0,40, СП=0,5%; 2 – В/В'яж=0,42, СП=0,55%, МТК=5%; 3 – В/В'яж=0,44, СП=0,75%, МТК=10%; 4 – В/В'яж=0,34, СП=1,35%, МТК=10%

Проектування оптимальних складів бетонних сумішей.

Нижче розглянута задача оптимізації складу високоміцних бетонів з добавкою поліфункціонального модифікатора (ПФМ) на основі суперпластифікатора та метакаоліну з метою мінімізації вартості бетону при забезпеченні збережуваності рухомості сумішей τ_{22-18} (осадка конуса суміші від 22 до 18 см) та міцності на стиск у віці 28 діб f_{cm}^{28} .

Таблиця 3.6

Умови планування експерименту

Фактори	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	-1	0	+1	
Водов'язуче відношення (В/(Ц+МТК)), X_1	0,34	0,37	0,40	0,03
Витрата в'язучого (Ц+МТК), кг/м ³ , X_2	450	500	550	50
Витрата метакаоліну, %, X_3	5	10	15	5
Модуль крупності піску, X_4	1,6	2,0	2,4	0,4

На основі експериментальних даних були отримані адекватні рівняння регресії в кодованих змінних, які характеризують вплив досліджуваних факторів на міцність бетону на стиск у віці 28 діб:

$$f_{cm}^{28} = 76,5 - 9X_1 + 3,5X_2 + 2,0X_3 + 2,8X_4 - 3,0X_1^2 - 1,0X_2^2 - 4,2X_3^2 - 1,3X_4^2 - 0,9X_1X_2 + 1,5X_1X_3 + 2,7X_2X_3, \quad (3.7)$$

На основі експериментальних даних було отримано рівняння регресії зміни тривалості збережуваності також:

$$\tau_{22-18} = 2,35 + 0,22X_1 - 0,18X_2 + 0,19X_3 + 0,14X_4 - 0,11X_1^2 - 0,07X_2^2 + 0,06X_4^2 - 0,05X_2X_3. \quad (3.8)$$

Вартість цементу, добавок СП та метакаоліну, які витрачаються на 1м³ бетону, набагато перевищує вартість заповнювачів. Таким чином мінімізація вартості бетону

фактично означає мінімізацію вартості в'язучого $C_{B'яжс}$, до якої умовно зараховуємо не тільки метакаолін, але і СП:

$$C_{B'яжс} = C_{Ц} \cdot Ц + C_{СП} \cdot СП + C_{МТК} \cdot МТК \rightarrow \min, \quad (3.9)$$

де $C_{Ц}$, $C_{СП}$, $C_{МТК}$ – відповідно вартість, цементу, суперпластифікатору та метакаоліну, грн./кг;

$Ц$, $СП$, $МТК$ – відповідно витрата цементу, суперпластифікатору та метакаоліну, кг/м³.

За залежністю цільової функції $C_{B'яжс}$ від витрати метакаоліну та моделями (3.7, 3.8), може бути знайдена мінімальна кількість метакаоліну та суперпластифікатору для конкретних умов виготовлення бетону з урахуванням необхідної збережаності рухомості суміші, міцності бетону та інших показників якості.

Для оптимізації складів бетонів при заданій постановці задачі можна використати методологію лінійного програмування.

Методику розрахунку розглянемо на прикладі визначення складу бетону з добавками СП та МТК при забезпеченні $\tau_{22-18} \geq 2$ год та $f_{cm}^{28} = 80$ МПа, за умови досягнення мінімальної вартості.

1. Функції обмежень при $\tau_{22-18} = 2$ год та $f_{cm}^{28} = 80$ МПа матимуть наступний вигляд:

$$\begin{aligned} 2 &= 2,35 + 0,22X_1 - 0,18X_2 + 0,19X_3 - 0,11X_1^2 - 0,07X_2^2 - 0,05X_2X_3; \\ 80 &= 76,5 - 9,9X_1 + 3,5X_2 + 2,0X_3 - 3,0X_1^2 - 1,0X_2^2 - 4,2X_3^2 - \\ &\quad - 0,9X_1X_2 + 1,5X_1X_3 + 2,7X_2X_3. \end{aligned} \quad (3.10)$$

2. Стабілізуємо значення фактору X_3 на середньому рівні (МТК=10%В'яж), тоді вищенаведені рівняння перепишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} 0,35 + 0,22X_1 - 0,18X_2 - 0,11X_1^2 - 0,07X_2^2 &= 0; \\ -3,5 - 9,9X_1 + 3,5X_2 - 3,0X_1^2 - 1,0X_2^2 - 0,9X_1X_2 &= 0. \end{aligned} \quad (3.11)$$

3. Будуємо ізолінії τ_{22-18} та f_{cm}^{28} в залежності від факторів X_1 та X_2 (рис. 3.12) та визначаємо область можливих варіантів рішень (заштрихована ділянка, рис. 3.12).

4. В точках на границі експерименту знаходимо витрату СП та визначаємо значення Ц, СП і МТК в кг.

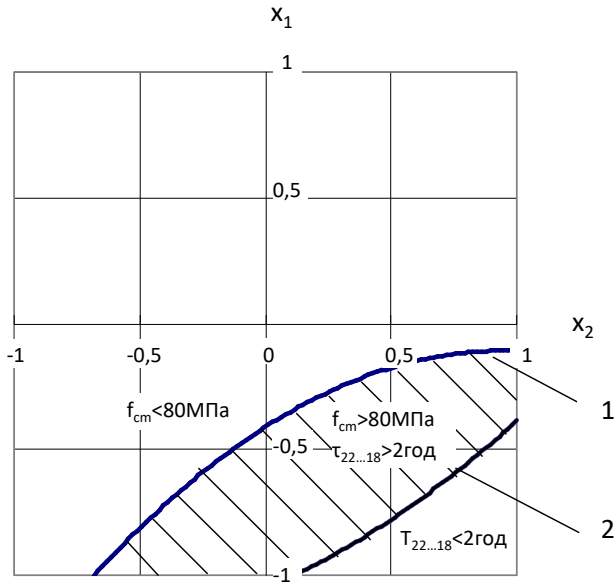


Рис. 3.12. Графічний метод пошуку допустимої області рішень задачі при $X_3=0$, $X_4=0$:

- 1 – лінія рівня функції міцності при $f_{cm} = 80$ МПа;
- 2 – лінія рівня функції збереження рухомості в часі при $\tau_{22...18} = 2$ год

5. За формулою (3.9) знаходимо в кожній точці вартість в'язучого. Вартість в'язучого в точках на перетині границі області можливих рішень та області значень факторів X_1 та X_2 представлена на рис. 3.12. Як видно з рисунку, мінімальна вартість в'язучого буде в точці на границі допустимої області з координатами $(-0,68; -1)$, яка належить лінії рівня функції f_{cm}^{28} .

Аналогічно можемо провести розрахунок для інших значень f_{cm}^{28} . На рис. 3.13 представлені залежність мінімальної вартості в'язучого від витрати метакаоліну та заданої міцності

бетону на стиск, а також лінія мінімальної вартості за умови заданої міцності.

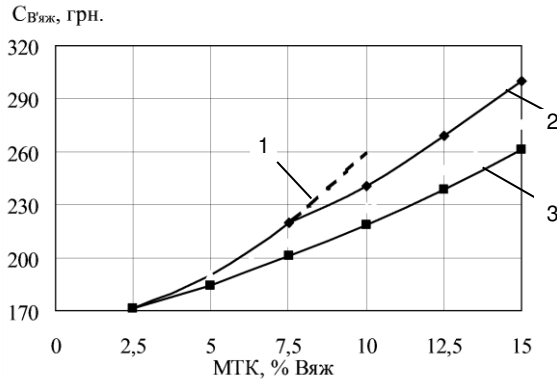


Рис. 3.13. Залежність вартості в'язучого від витрати метаксаоліну (при $\tau \geq 2$ год): 1 – лінія мінімальної вартості; 2 – лінія $f_{cm}^{28}=80$ МПа; 3 – лінія $f_{cm}^{28}=60$ МПа

Для досягнення міцності на стиск $f_{cm}^{28}=80$ МПа і $\tau \geq 2$ год мінімальна вартість в'язучого забезпечуватиметься при витраті метаксаоліну 7,5% від маси в'язучого (35 кг/м³). Витрата суперпластифікатору СП при цьому складатиме, 1,17% від маси в'язучого.

Знаючи витрату цементу, метаксаоліну та $B/B'_{яз}$, знаходимо об'єм в'язучого, кг/м³ за формулою:

$$V_{B'_{яз}} = B + Ц / \rho_c + МТК / \rho_{МТК}, \quad (3.12)$$

де ρ_c та $\rho_{МТК}$ – відповідна істина густина цементу та метаксаоліну, кг/м³.

Відповідно об'єм заповнювачів:

$$V_3 = 1000 - V_{B'_{яз}}. \quad (3.13)$$

Витрату піску та щебеню знаходимо за формулами:

$$П = V_3 \cdot r \cdot \rho_n; \quad (3.14)$$

$$Щ = V_3 \cdot (1-r) \cdot \rho_{щ}, \quad (3.15)$$

де ρ_n та $\rho_{щ}$ – відповідно істинна густина піску та щебеню, кг/м³;
 r – частка піску в суміші заповнювача.

3.3. Бетони із застосуванням відходів каменеподрібнення

До найбільш крупнотонажної галузі переробки природного каменю є виробництво на його основі щебеню для цементних бетонів.

Найпоширенішою і найбільш застосовуваною гірською породою для виробництва щебеню є граніт. Крім того, щебінь у великих обсягах виготовляють також із базальту та андезиту. Для виробництва щебеню з метаморфічних гірських порід залучають кварцит, мармуризовані вапняки, доломіт, а з осадових – пісковик, вапняк.

При виготовленні щебеню утворюється від 18 до 25% відсівів від маси гірської породи, що переробляється. Останнім часом суттєво збільшився попит на так званий «кубовидний» щебінь, вихід відсіву при його виробництві може досягати 30...36% і більше залежно від структурно-текстурних особливостей порід. Обсяги відсівів вивержених гірських порід в т.ч. за рахунок виробництва щебеню з покращеною формою зерен, постійно зростають.

Для типових підприємств із середньою потужністю 350 тис. м³ щебеню утворюється приблизно 80...110 тис. м³ відсівів в рік.

Зростання кількості відходів призводить до утворення відвалів, які займають значні площі сільськогосподарських угідь, а також до забруднення повітряного і водного середовища.

При розробці сучасної технологічної схеми виробництва заповнювачів бетонів і розчинів передбачається ряд додаткових операцій по сортуванню, очищенню і, при необхідності, подрібненню відходів.

Відходи очищуються мокрими чи сухими способами (рис. 3.14, 3.15). Сухі способи базуються на подрібненні домішок ударом чи стиранням в середовищі холодних чи гарячих газів і послідовним їх відділенням від кам'яного матеріалу грохоченням, пневматичними методами і т. д.

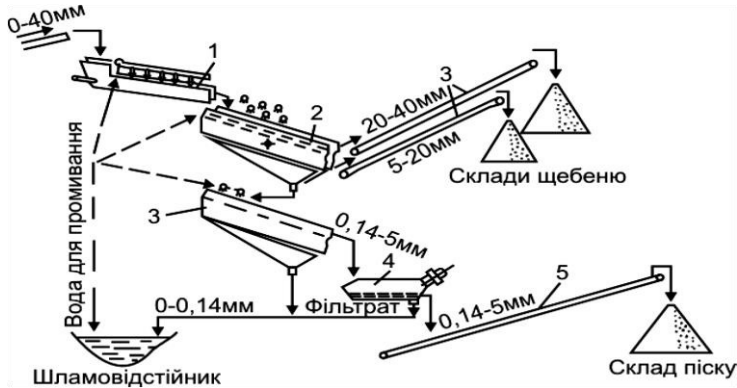


Рис. 3.14. Схема мокрого способу переробки відсівів подрібнення:

- 1 – машина для промивання; 2,3 – грохоти;
- 4 – вібровакуумознезводнювач; 5 – конвеєри

Мокрі способи передбачають відділення домішок мокрим грохоченням на кінцевих стадіях виробництва. Мокре просіювання раціональне для видалення домішок, що легко відділяються. При цьому за допомогою спеціальних класифікаторів з відходів можна виділяти чисті фракції піску.

Реалізована на практиці технологія сухої повітряної класифікації відсівів з використанням каскадно-гравітаційних класифікаторів. В них використаний спосіб розділення в повітряному потоці дрібнозернистих і піщаних матеріалів за крупністю і густиною частинок за рахунок взаємодії двох протилежно спрямованих сил: гравітації, діючої на частинки вихідного матеріалу, і висхідного повітряного потоку. На таких апаратах можна класифікувати сипучі матеріали максимальною крупністю до 10 мм і вологістю до 6% з розділенням на 2...3 класи, тобто з отриманням 2...3 продуктів.

Відсівви подрібнення можна поділити на дві групи (табл.3.7):

- перша – відсівви, що одержують при переробці на щебінв вивержених гірських порід і валунів;
- друга – відсівви, що одержують при переробці масивних осадових гірських порід (пісковиків, вапняків, доломіту), а також гравію.

Згідно табл. 3.7 у відсіввах першої групи міститься менша кількість високодисперсних домішок ніж у відсіввах другої групи.



Рис. 3.15. Схема сухої переробки відсіввів подрібнення

Таблиця 3.7

Вміст домішок у відсіввах подрібнення двох груп

№ з/п	Показник	Перша група	Друга група
1	Вміст зерен більших 0,16 мм, %	5...30	До 65
2	Вміст частинок менших 0,16 мм, %	5...25	До 43
3	Кількість пилюватих та глинистих частинок, %	2...15	3...33
4	Вміст глини у шматках	Практично відсутня	0,15...12

Аспіраційний гранітний пил (АГП) є продуктом, що вловлюється аспіраційними системами при подрібненні гірських порід на щебінь. АГП залежно від системи пиловловлювання може бути умовно розділений на два види:

- аспіраційний пил високої дисперсності (АПВД), що вловлюється рукавними фільтрами;
- аспіраційний пил середньої дисперсності (АПСД), який вловлюється циклонами.

Хімічний склад дослідженого авторами АГП та його фізичні характеристики наведені в табл. 3.8 та табл. 3.9.

Таблиця 3.8

Хімічний склад аспіраційного пилу

Назва показника	Позначення показника	Кількісне значення, %
Оксид кальцію	CaO	1,29
Оксид кремнію	SiO ₂	72,97
Оксид алюмінію	Al ₂ O ₃	13,6
Оксид заліза (III)	Fe ₂ O ₃	0,98
Оксид заліза (II)	FeO	0,58
Оксид магнію	MgO	0,46
Оксид титану	TiO ₂	0,3
Оксид натрію	Na ₂ O	3,91
Оксид калію	K ₂ O	5,18
Оксид фосфору	P ₂ O ₅	0,08
Оксид водню	H ₂ O	0,15
Втрати при прожарюванні	ВПП	0,6

Аспіраційний пил є більш дисперсним порівняно з частинками відсівів менше 0,16 мм, 95% його частинок мають розміри від 0 до $8 \cdot 10^{-9}$ м. Результати досліджень зернового складу АГП наведені на рис. 3.16.

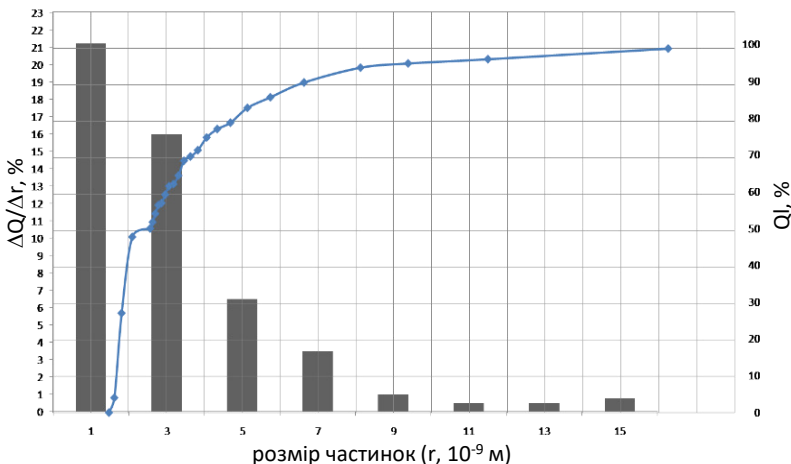


Рис. 3.16. Результати седиментаційного аналізу АГП

Таблиця 3.9

Фізичні характеристики АГП

№ з/п	Характеристики	Величина
1	Питома поверхня, м ² /кг	
	- АПВД	680...720
	- АПСД	240...260
2	Насипна густина, кг/м ³	
	- АПВД	590...650
	- АПСД	820...870
3	Зерновий склад, %	
	до 20 мкм	15,5...25,5
	20...40 мкм	36,5...45,5
	40...80 мкм	24,9...33,5
	80...160 мкм	3,1...14,5
4	Вміст глинистих частинок, %	0,2...0,5
5	Вологість, %	0,3...0,5
6	Наявність водорозчинних дом., %	відсутні

За мінералогічним складом, як показали дослідження, АГП близький до складу частинок <0,16 мм гранітних відсівів.

При умові використання ефективних суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу та додаткового впливу

високоактивних мінеральних добавок можна отримати високоміцний дрібнозернистий бетон з використанням в якості основного заповнювача гранітних відсівів оптимізованого зернового складу, отриманого шляхом додавання до нефракціонованих відсівів фракції 2,5...5 мм.

Відсіві подрібнення граніту є особливим видом заповнювача, котрий крім певної крупності і вмісту шкідливих домішок характеризується також перервним зерновим складом, складною формою зерен та рельєфом поверхні, підвищеною пористістю, а також наявністю дисперсних частинок, що можуть за певних умов виконувати роль мінерального заповнювача. Такі особливості гранітних відсівів спричиняють своєрідний вплив на характеристики дрібнозернистого бетону, тому загальноприйняті коефіцієнти у рівняннях міцності потребують, у даному випадку, деякого уточнення.

Отримання високоміцних дрібнозернистих бетонів на відсівах подрібнення можливе при умові нейтралізації негативного впливу пилюватих і глинистих частинок (частинок <0,16 мм) на водопотребу шляхом використання ефективних суперпластифікаторів. Водоредукуючий ефект останніх є визначальним чинником у забезпеченні необхідної міцності (табл. 3.10).

Таблиця 3.10

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 (діб)		
					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	48,4	53,24
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

На основі отриманих моделей побудована номограма (рис. 3.17), що дозволяє визначити витрату цементу дрібнозернистого бетону на гранітних відсівах, враховуючи B/C , рухомість бетонної суміші і вміст частинок $<0,16$ мм у відсівах.

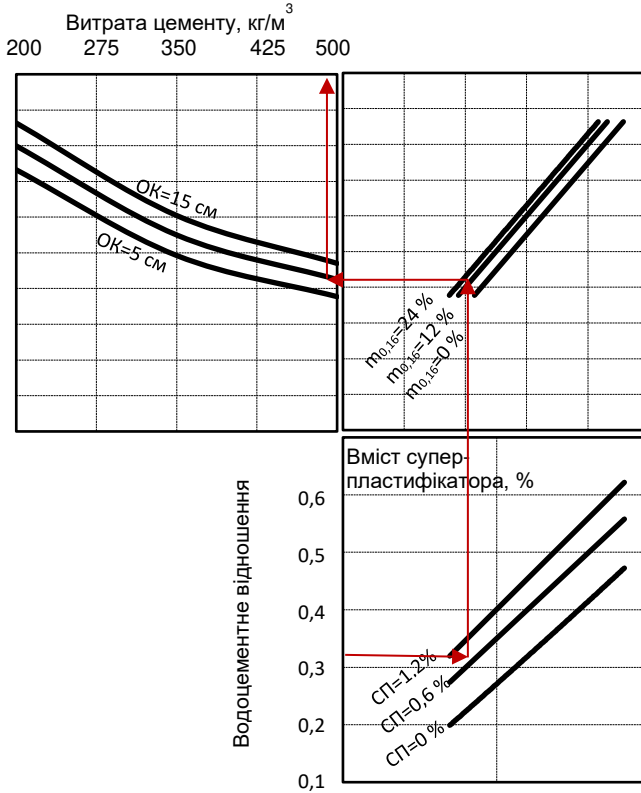


Рис. 3.17. Номограма для визначення витрати цементу

Методика розрахунку полягає в наступному:

1. Задаючись активністю цементу та необхідним значенням міцності бетону у віці 28 діб, вибравши відповідні коефіцієнти з табл. 3.10 знаходимо потрібне C/B :

$$f_{cm}^{28} = A \cdot R_c (C/B - b). \quad (3.16)$$

Таблиця 1.33

Коефіцієнти рівняння по визначенню міцності

Вміст частинок розміром <0,16 мм у відсіві, $m_{0,16}$ %	A	b
0	0,27	-0,79
12	0,38	0,07
24	0,51	0,11

2. Переходимо до B/C :

$$B/C = 1/(C/B). \quad (3.17)$$

3. За номограмою (рис. 3.17), враховуючи рухомість суміші, кількість частинок <0,16 мм у відсіві знаходимо витрати цементу та суперпластифікатора.

4. За формулою (3.18), знаючи витрату цементу та водоцементне відношення, знаходимо витрату води:

$$B = C \cdot (B/C). \quad (3.18)$$

5. За формулами (3.19-3.21), знаючи витрату та густину цементу і витрату води, знаходимо об'єм цементного тіста, об'єм (V_3) та масу (M_3) заповнювача:

$$V_{ц.м} = \frac{C}{\rho_ц} + B; \quad (3.19)$$

$$V_3 = 1000 - V_{ц.м}; \quad (3.20)$$

$$M_3 = V_3 \rho_3. \quad (3.21)$$

Приклад розрахунку. Розрахуємо склад дрібнозернистого бетону з 28-добовою міцністю на стиск 60 МПа. Рухомість бетонної суміші рівна 10 см. В якості пластифікуючої добавки використовується суперпластифікатор Melflux в кількості 0,6% від C . Активність цементу – 50 МПа. Вміст у відсіві пилюватих частинок <0,16 мм – 12%. Рухомість суміші $OK=10$ см.

1. За заданими активністю цементу та необхідним значенням міцності бетону у віці 28 діб, знаходимо потрібне C/B :

$$f_{cm}^{28} = 0,38 R_c (C/B - 0,07);$$

$$\frac{C}{B} = \left(\frac{f_{cm}^{28}}{0,38 R_c} \right) - 0,797 = \left(\frac{60}{0,38 \cdot 50} \right) + 0,07 = 3,23.$$

2. Знаходимо B/C :

$$B/C = 1/3,23 = 0,31.$$

3. За номограмою (рис. 3.17) знаходимо витрату цементу, яка становить 495 кг/м^3 .

4. За формулою (3.18), знаючи витрату цементу та водоцементне відношення, знаходимо витрату води:

$$B = 495 \cdot 0,31 = 153 \text{ л/м}^3.$$

5. За формулами 3.19-3.21 знаючи витрату та густину цементу і витрату води, знаходимо об'єм цементного тіста, об'єм та масу заповнювача:

$$V_{ц.т} = \frac{C}{\rho_c} + B = \frac{495}{3,1} + 153 = 313 \text{ л};$$

$$V_з = 1000 - 313 = 687 \text{ л};$$

$$M_з = 687 \cdot 2,7 = 1854 \text{ кг/м}^3.$$

Отриманий за розрахунками бетон має наступний склад:

- цемент – 495 кг/м^3 ;
- відсів – 1854 кг/м^3 ;
- вода – 153 л/м^3 ;
- суперпластифікатор Melflux – $2,9 \text{ кг/м}^3$.

4. САМОУЩІЛЬНЮВАНІ БЕТОНИ

4.1. Загальні відомості

На розвиток і вдосконалення технологічного процесу виробництва бетонних сумішей, формування з них залізобетонних конструкцій впливають два ключові чинники: з одного боку, отримання міцного і довговічного бетону, з іншого - зниження трудових і енергетичних витрат при його виробництві. Протягом тривалого періоду ці два фактора залишались суперечливими, оскільки для отримання високоміцних, довговічних бетонів їх склади проектували з низьким значенням водоцементного відношення, на основі жорстких бетонних сумішей, які потребують підвищених енергетичних витрат як при перемішуванні, так і при укладанні і вібраційному ущільненні в формах. Останнє істотно підвищує трудомісткість технологічного процесу. У той же час, можливість отримання високорухомих бетонних сумішей забезпечувалася, в основному, за рахунок збільшення витрати води замішування що, в свою чергу призводить, до зниження міцності і довговічності бетону.

Ці протиріччя значною мірою були вирішені з розробкою ефективних пластифікаторів і суперпластифікаторів в середині 70-х років минулого століття. Їх застосування забезпечило можливість отримання високорухомих бетонних сумішей і бетонів з високими фізико-механічними і експлуатаційними характеристиками на рядових портландцементях і заповнювачах при помірній або зниженій витраті води. У той же час, поряд з очевидними перевагами в практиці отримання високорухомих бетонних сумішей мали місце і ряд недоліків. Так, більшість пластифікаторів сповільнювали тужавлення і твердіння бетонної суміші, особливо при високих вмістах. Суперпластифікатори першого-другого покоління не забезпечували необхідну збережуваність рухомості бетонних сумішей при транспортуванні до місця формування протягом 60...90 хвилин. При прокачуванні бетонних сумішей бетононасосами до місця укладання на відстань понад 200-250 м спостерігались випадки їх

розшарування.

З появою суперпластифікаторів третього покоління, застосуванням високодисперсних кремнеземомістких матеріалів техногенного походження, як активних мінеральних добавок перш за все мікрокремнезему, в технології бетону стався потужний якісний стрибок. Оптимальне поєднання зазначених добавок-модифікаторів, а при необхідності суміщення з ними інших органічних і мінеральних матеріалів, дозволяє направлено керувати реологічними властивостями бетонних сумішей, модифікувати структуру цементного каменю на мікрорівні таким чином, щоб надати властивостей, які забезпечують високу експлуатаційну надійність бетонних конструкцій.

Необхідність реалізації в світовій практиці унікальних проектів (протяжні підвісні мости в Японії і Китаї, комплекси великих гідротехнічних і транспортних споруд в Нідерландах, бурові платформи в Норвегії, висотні будівлі і споруди в різних країнах) зумовила підвищення вимог до бетонів і бетонних сумішей: застосування литих сумішей у великому обсязі, забезпечення стійкості до розшарування в процесі їх транспортування на великі відстані і формування, прискорений набір міцності в ранні строки твердіння.

В результаті проведених науково-дослідних робіт вченими Токійського університету в кінці 80-х років минулого століття був розроблений склад бетону, який був настільки рухомим, що не вимагав вібраційного ущільнення – самоущільнюваний бетон (SCC – self-compacting concrete). На початку 90-х років минулого століття такі бетони виробляли під такими торговими марками, як NVC non – vibrated concrete, super quality concrete SQC.

Створення самоущільнюваного бетону (СУБ), перш за все, пов'язано з впровадженням в практику нового покоління суперпластифікаторів на основі поліакрилатів і полікарбоксилатів.

Під самоущільнюваними розуміють бетонні суміші, здатні укладатися в форму чи опалубку без вібрації, під впливом власної ваги, рівномірно розподілятися по усьому об'ємі при збереженні однорідності навіть при наявності густо розташованої арматури, а також самостійно звільнятися від повітря, що в них міститься.

Визначальними особливостями таких сумішей є їх висока легкоукладальність, що поєднує дві протилежні за своєю природою характеристики: низьке граничне напруження зсуву, що зумовлює високу текучість суміші, і підвищену в'язкість, яка забезпечує стабільність і зв'язність суміші. Максимальне напруження зсуву СУБ (менше 60 Па) є значно меншим, ніж у звичайного бетону (100-1000 Па), в той же час пластична в'язкість практично однакова (20-200 Па·с). Вирішення цієї компромісної задачі забезпечує:

- здатність СУБ при високій текучості повністю заповнювати всі порожнини в опалубці під дією власної ваги (filling ability);
- здатність СУБ до подолання перешкод (passing ability) – долати перешкоди у вигляді вузьких перерізів опалубки і формувальної оснастки, проміжки між стержнями арматури без розшарування або блокування крупного заповнювача;
- опір сегрегації (resistance to segregation) – здатність СУБ залишатися однорідними за складом без розшарування при транспортуванні і формуванні.

Здатність до заповнення різних порожнин забезпечується підвищеною деформативністю цементної пасти, що досягається застосуванням ефективних суперпластифікаторів, оптимальним водов'язким відношенням, використанням мінеральних добавок з безперервною гранулометриєю. При цьому дисперсні частинки розміром менше 90 мкм в кількості 500...600 кг/м³ забезпечують стійкість бетонної суміші до розшарування.

Для підвищення здатності бетонної суміші долати перешкоди необхідно, перш за все, оптимізувати гранулометричний склад заповнювачів, зменшити витрату крупного і збільшити відповідно витрати дрібного заповнювача, обмежити максимальний розмір зерен крупного заповнювача і збільшити вміст цементної пасти, забезпечуючи тим самим обмазку зерен для зниження тертя.

Залежно від властивостей прийнята класифікація самоущільнюваних бетонних сумішей (табл. 4.1, 4.2).

Таблиця 4.1

Класи СУБ за розпливом конуса

Клас	Діаметр розпливу конуса, мм	Область застосування
SF1	550-650	Неармовані або малоармовані бетонні конструкції – плити перекриттів, трубопроводи, облицювання тунелів, фундаментів.
SF2	660-750	Більшість звичайних споруд – колони, стіни.
SF3	760-850 (EN12350-8)	Вертикальні елементи, густоармовані конструкції складних форм, торкретування.

Для отримання максимального розпливу конуса бажано використовувати щебінь фракції 3...8 см.

При визначенні класу бетонної суміші за *розпливом конуса* (рис.4.1) знаходять показник SF, який визначається за формулою:

$$SF = \frac{d_1}{d_2}, \quad (4.1)$$

де d_1 – найбільший діаметр розпливу, мм;

d_2 – розплив під кутом 90° до d_1 , мм.

Значення d_1 и d_2 округлюють до 10 мм.

Таблиця 4.2

Класи СУБ по в'язкості, схильності до закупорювання і стабільності до седиментації

Класи	Визначальна властивість	Нормоване значення	Примітка
За в'язкістю VS 1 VS 2	Час розтікання бетонної суміші до діаметра 500 мм, с t_{500} (EN 12350-8)	До 2,0 від 2,0	Класифікація не дійсна для бетону з $D_{\max} > 40$ мм
VF 1 VF 2	Тривалість витікання бетонної суміші з воронки, с t_v , (EN 12350-9)	До 9,0 від 9,0 до 25,0	Класифікація не дійсна для бетону з $D_{\max} > 22,4$ мм
За схильністю до закупорювання PL 1 PL 2	Текучість бетонної суміші в L-подібному коробі (EN 12350-10)	Від 0,80 від 0,80	З 2-ма арматурними стержнями; з 3-ма арматурними стержнями
PS ₁ PS ₂	Прохідність PS блокуючого кільця, мм (EN 12350-12)	До 10 До 10	З 12 арматурними стержнями З 16 арматурними стержнями (Класифікація не дійсна для бетону з $D_{\max} > 40$ мм)
За стабільністю до седиментації SR1 SR2	Розшарування, % (EN 12350-11)	Від 20 Від 15	Класифікація не дійсна для бетону з $D_{\max} > 40$ мм

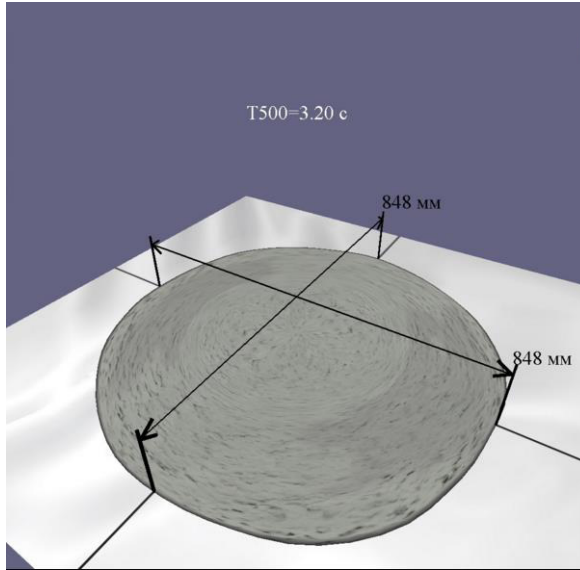


Рис. 4.1. Визначення розпливу самоущільнювальної бетонної суміші за допомогою конуса Абрамса

Текучість бетонної суміші PL, яка визначається за допомогою L-подібного короба (рис. 4.2), розраховують з точністю до 0,01 за формулою:

$$PL = \frac{H_2}{H_1}, \quad (4.2)$$

де H_1 – середнє значення висоти бетонної суміші у вертикальній частині короба, мм;

H_2 – в кінці горизонтальної частини короба, мм.

Текучість бетонної суміші визначають також за допомогою V-подібної воронки (рис. 4.3).

Стійкість до розшарування SR розраховують у % з округленням до 1% за формулою:

$$SR = \frac{m_{ps} - m_p}{m_s} \cdot 100, \quad (4.3)$$

де m_{ps} – маса збірника з ситом, включаючи масу бетонної суміші, що пройшла крізь сито, г;

m_p – маса збірника з ситом, г;

m_s – первинна маса бетону, яка подавалася на сито, г.

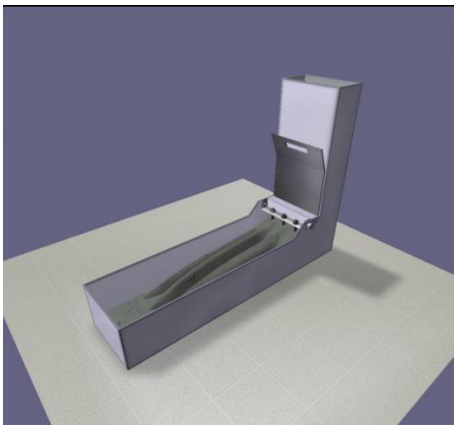


Рис. 4.2. L-подібний короб для визначення текучості самоущільнювальної бетонної суміші

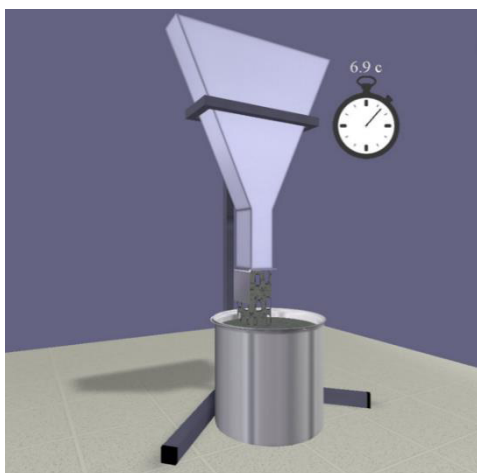


Рис. 4.3. V- подібна воронка для визначення текучості самоущільнювальної бетонної суміші

Схильність до закупорювання (прохідність PS блокувального кільця, рис. 4.4) розраховують за формулою:

$$PS = \frac{\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2}}{4} - \Delta h_0, \quad (4.4)$$

де PS – прохідність, мм;

$\Delta h_x, \Delta h_y$ – різниця висот між верхнім краєм блокуючого кільця і певними точками бетону.

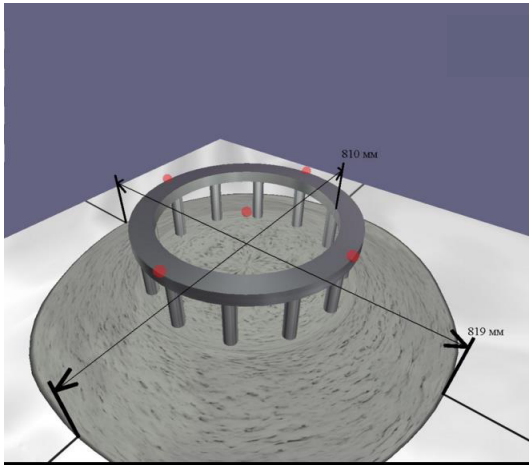


Рис. 4.4. Випробування самоущільнювальної бетонної суміші за допомогою j-подібного кільця

Основні компоненти самоущільнюваного бетону ті ж, що й використовуються при виробництві звичайного бетону. Відмінність полягає лише в їх співвідношенні, а також у використанні спеціальних добавок, які, власне, і надають бетону здатність до самоущільнення. У той же час, для досягнення високих технологічних і експлуатаційних характеристик самоущільнюваних бетонів висуваються більш жорсткі вимоги до сировинних матеріалів.

Відповідно до рекомендацій Європейської федерації фахівців з будівельної хімії та бетону (European Federation of Specialists Construction Chemicals and Concrete Systems) при

проектуванні складу бетону більш доцільно виражати співвідношення вихідних компонентів не за масою, а за об'ємом. На першому етапі встановлюються співвідношення між компонентами на основі типових діапазонів їх вмісту, що забезпечують нормовані показники самоущільнюваної бетонної суміші:

- об'ємне співвідношення вода / дисперсний матеріал (цемент, мінеральна добавка, фракції піску дрібніше 0,125 мм) – від 0,80 до 1,10;
- загальний вміст дисперсних матеріалів – від 160 до 240 літрів (400-600 кг на кубічний метр);
- вміст цементу – 350-450 кг/м³ (витрата цементу понад 500 кг/м³ може збільшити усадку і повзучість бетону; витрата менше 350 кг/м³ може бути допустимою тільки при використанні інших дрібнодисперсних мінеральних наповнювачів або пуцоланових добавок);
- вміст крупного заповнювача – від 28 до 35% по об'єму бетонної суміші;
- водоцементне відношення призначається виходячи з вимог EN 206-1 (зазвичай вміст води не перевищує 200 л/м³).

Професор Х. Окамура запропонував метод проектування самоущільнюваного бетону, основна ідея якого полягає в тому, що на першому етапі випробовуються цементна паста і розчин з метою визначення сумісності суперпластифікатора, цементу, дрібного заповнювача і пуцоланової добавки, а на другому етапі випробовується пробний заміс СУБ. Перевагою цього методу є те, що він дозволяє уникнути повторення подібних трудомістких випробувань для всієї бетонної суміші. Однак, серед недоліків методу слід зазначити, перш за все, що далеко не всі заводи товарного бетону оснащені необхідним обладнанням для дослідження реології цементних паст і розчинів, зокрема ротаційними віскозиметрами. Г.В. Несветаєвим запропонована досить проста методика оцінки реологічних характеристик цементної пасти: залежності граничного напруження зсуву цементного тесту від виду і дозування добавки для цементу певного хіміко-мінералогічного складу. Наприклад, для отримання самоущільнюваних сумішей класу SF 1 значення

граничної напруги зсуву орієнтовно має становити не більше 10, а сумішей класу SF 2 – не більше 8.

Тайванськими вченими запропонована спрощена методика проектування складу СУБ, основою якої є умова досягнення максимального коефіцієнта упаковки крупного і дрібного заповнювача – (packing factor PF). Більш високе значення PF обумовлює більш високий вміст крупного та дрібного заповнювачів, зменшуючи кількість в'язучої речовини. Відповідно, легкоукладальність суміші, її здатність до самоущільнення, а також міцність бетону при стиску будуть зменшуватися. З іншого боку, низьке значення PF обумовлює підвищену усадку бетону. Підвищений вміст в'язкої пасти також впливає на довговічність СУБ і істотно збільшує його собівартість. У зв'язку з цим при проектуванні складу суміші важливо вибрати таке оптимальне значення PF, яке б забезпечувало як вимоги до властивостей СУБ, так і економічні чинники.

В табл. 4.3 наведено склади самоущільнюваних бетонів, що застосовуються в різних країнах світу.

Таблиця 4.3

Усереднені склади самоущільнюваних бетонів

Компоненти бетонної суміші	Усереднена витрата на 1 м ³ бетонної суміші в різних країнах			
	Японія	США	Країни ЄС	Індія
Вода, л	175	180	190	163
Портландцемент, кг	530	357	280	330
Мінеральна добавка, кг	70 (низько-кальцієва зола)	119 (доменний граншлак)	245 (мелений вапняк)	150 (високо-кальцієва зола)
Дрібний заповнювач, кг	751	936	865	309
Крупний заповнювач, кг	789	684	750	455
Добавка супер-пластифікатора, л	9	2,5	4,2	0,92

В Японії близько 50% нових залізобетонних конструкцій виготовляється з СУБ, в Європі на їх частку припадає 7...10% обсягу виробленого бетону.

Відзначено позитивний досвід застосування самоущільнюваних бетонів в дорожньому будівництві, які забезпечують поліпшення якості дорожнього полотна, підвищення швидкості будівництва, зниження енергоспоживання і трудомісткості процесу.

У той же час, залишаються не в повному обсязі вирішеними проблеми, пов'язані з деформаційними характеристиками самоущільнюваних бетонів - підвищеною усадкою і повзучістю, зниженим модулем пружності. Значний вплив на властивості сумішей і бетонів може створювати проблема сумісності застосовуваних в складі СУБ модифікаторів між собою і з портландцементом. Крім того, вартість основних добавок-суперпластифікаторів на основі полікарбоксилатних ефірів, а також мікрокремнезему, залишається досить високою. Це обумовлює необхідність пошуку рішень по розробці складів поліфункціональних модифікаторів, основу яких складають різні відходи промисловості, що забезпечують отримання бетонних сумішей і бетонів з нормованими показниками якості і задовільними економічними показниками.

4.2.Властивості самоущільнюваних бетонів

Властивості самоущільнюваних бетонів нижче розглянуті на прикладі золівмісних бетонів. Експериментальні результати, отримані у НУВГП аналізом математичних моделей згідно умов, наведених у табл. 4.4.

Бетони отримували на портландцементі ПЦ-1 М500. В якості заповнювача використовували фракційну суміш – 0,16...2 мм (кварцовий пісок) та 2...5 мм (гранітний щебінь). Активною мінеральною добавкою слугувала зола-виносу Ладигенської ТЕС. В бетонні суміші вводили добавку суперпластифікатора (СП) полікарбоксилатного типу Melflux 2651f.

Таблиця 4.4

Умови планування експериментів при дослідженнях цементно-зольних бетонних сумішей

Фактор, вид		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
натуральний	кодований	-1	0	+1	
Водоцементне відношення, В/Ц	X_1	0,3	0,4	0,5	0,05
Витрата води, кг/м^3	X_2	170	180	190	10
Частка піску в об'ємі піску та 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 , кг/м^3	X_5	2900	3900	4900	1000

В результаті статистичної обробки експериментальних даних отримано комплекс наведених нижче поліноміальних моделей, що характеризують діаметр розпливу стандартного конуса, см (Y_3), витрату добавки суперпластифікатора Melflux 2651f (СП), кг/м^3 необхідної для отримання високорухомої самоущільнюваної суміші класів SF1 та SF2 (Y_4), а також параметрів, що визначають однорідність і стійкість бетонних сумішей до розшарування: водовідділення, г/л, розчиновідділення, % і $\text{tg } \eta$. Крім цього отримана поліноміальна модель об'єму залученого повітря, %.

Три з отриманих експериментально-статистичних моделей моделі розпливу стандартного конуса і витрат суперпластифікатора наведені у кодованих змінних нижче:

$$Y_1 = 56,05 + 3,39X_1 + 1,39X_2 - 2,84X_3 - 0,5X_4 + 2,78X_5 - 3,07X_1^2 - 3,08X_2^2 + 1,9X_3^2 - 1,07X_4^2 + 0,43X_5^2 + 2,25X_1X_4 + 1,13X_2X_5 + 1,12X_3X_4 - 2,25X_3X_5; \quad (4.5)$$

$$Y_2 = 4,55 - 0,07X_1 - 0,94X_2 - 1,06X_3 + 0,37X_4 + 0,7X_2^2 + 0,25X_3^2 + 0,14X_4^2 - 0,23X_5^2 - 0,24X_1X_2 - 0,25X_1X_4 - 0,32X_1X_5 - 0,17X_3X_5 ; \quad (4.6)$$

Аналіз математичних моделей (4.5, 4.6) і (рис.4.5) показав, що пластифікуючий ефект золи і її вплив на діаметр розпливу конуса D_p (Y_1) і величину ефективної в'язкості $\ln \eta$ (Y_2) не можуть бути однозначно обумовлені введенням кількістю золи в цементне тісто з добавкою суперпластифікатора Melflux, а в значній мірі залежать від дисперсності золи (рис. 4.5).

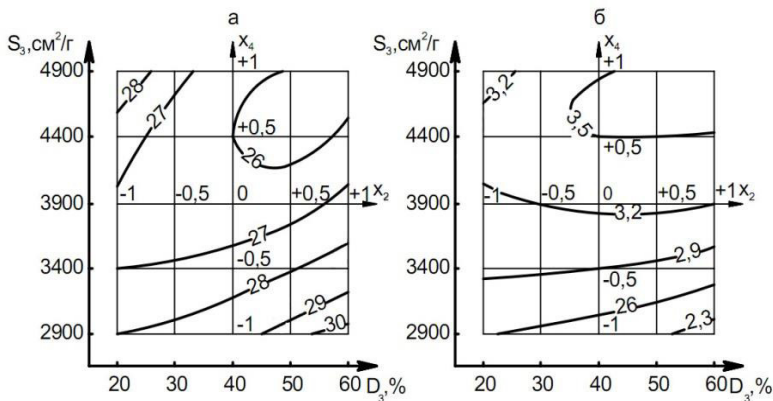


Рис. 4.5. Вплив витрати і дисперсності золи на діаметр розпливу і логарифм величини ефективної в'язкості цементного тіста (при $V/(Ц+З) = 0,28$ і витраті Melflux 2651f 0,8%): а – ізолінії D_p , см; б – ізолінії $\ln \eta$, (Па·с)

Залежність рухомості і ефективної в'язкості цементно-зольного тіста від кількісного вмісту золи і її дисперсності обумовлена зміною водопотреби золи при збільшенні її питомої поверхні шляхом домелу. Проведені заміри водопотреби золи дозволили отримати такі результати: при $S_3 = 2900$ $\text{cm}^2/\text{г}$ НГ золи = 16,75%; при $S_3 = 3900$ $\text{cm}^2/\text{г}$ НГ = 25,25%; при $S_3 = 4900$ $\text{cm}^2/\text{г}$ НГ = 28,25%.

Вирішальний вплив на зміну рухомості і ефективної в'язкості цементно-зольного тіста чинить водотверде відношення $V/(Ц+З)$, з ростом якого відбувається збільшення рухомості і

зниження величини ефективної в'язкості, причому слід зауважити, що більш інтенсивна зміна досліджуваних характеристик спостерігається при низьких значеннях водотвердого відношення. Наприклад, при зміні $V/(Ц+З)$ від 0,24 до 0,26 при $S_3 = 4900 \text{ см}^2/\text{г}$ рухомість збільшилася від 20,5 до 24 см, а ефективна в'язкість зменшилася від 172 до 67 Па·с, при зміні $V/(Ц+З)$ від 0,28 до 0,30 рухомість збільшилася від 27 до 28 см, а ефективна в'язкість зменшилася від 32 до 20 Па·с.

Як впливає з аналізу моделі (4.5), збільшення рухомості з ростом водотвердого відношення позначається до його певного значення. При більш високих значеннях $V/(Ц+З)$ може відбуватися падіння рухомості, обумовлене обмеженою водоутримуючою здатністю цементно-золяного тіста.

Зі збільшенням питомої поверхні золи є можливість підвищити зв'язність і седиментаційну стійкість цементно-золяного тіста.

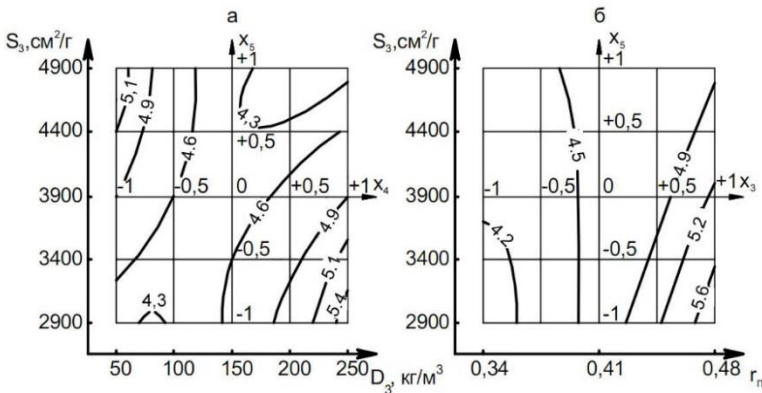


Рис. 4.6. Зміна витрати СП «Melflux 2651Б» ($\text{кг}/\text{м}^3$) в самоущільнюваних золовмісних бетонних сумішах:
 а – від S_3 і D_3 при $V/Ц = 0,4$; $V = 180 \text{ кг}/\text{м}^3$; $r_{п} = 0,41$;
 б – від S_3 і $r_{п}$ при $V/Ц = 0,4$; $V = 180 \text{ кг}/\text{м}^3$; $D_3 = 150 \text{ кг}/\text{м}^3$

Поряд з тим як впливає з аналізу моделей (рис. 4.6) вплив витрати золи на легкоукладальність не може розглядатися без урахування її дисперсності. Крім вмісту золи (D_3) на вплив її питомої поверхні (S_3) позначається $V/Ц$ і частка піску (r) в об'ємі піску та щебню.

Збільшення питомої поверхні золи-виносу при її оптимальних витратах і високих значеннях В/Ц сприяє підвищенню легкоукладальності. Зі зменшенням В/Ц позитивний ефект подрібнення золи згасає.

Позитивний ефект підвищення дисперсності золи на легкоукладальність краще проявляється з підвищенням частки піску в суміші заповнювачів.

Цей факт обумовлений зміною гранулометричного складу золи при її помелі. При помелі золи в першу чергу різко скорочується вміст крупних частинок, що при зниженій частці піску в суміші заповнювачів несприятливо позначається на загальній гранулометрії заповнювачів суміші, при підвищеній же частці піску, навпаки, сприяє створенню найбільш сприятливої для досягнення максимальної легкоукладальності безперервної гранулометрії. Для самоущільнюваних бетонних сумішей важливими властивостями, що характеризують їх якість, є водовідділення і розшаровуваність.

Ефективність добавки золи-виносу на водовідділення зростає зі збільшенням її кількості і зменшенням В/Ц. При цьому останнє є головним фактором, що визначає водовідділення. Так, при витраті золи 90 кг і В/Ц = 0,3 величина водовідділення становить 0,25 г/л, а зі збільшенням В/Ц до 0,5 водовідділення зростає до 1,45 г/л.

При В/Ц = 0,5 збільшення D_3 від 50 до 150 кг/м³ призводить до зменшення водовідділення від 1,85 г/л до 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 самоущільнюваних золовмісних бетонів має також і підвищення її дисперсності. 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 вона знижується до 0,15 г/л.

Чутливість водовідділення до витрати золи в міру збільшення її питомої поверхні обумовлює можливість при підвищеному В/Ц використовувати золу при раціональному дозуванні 150...200 кг/м³ в якості водоутримуючої добавки в

самоущільнюваних бетонних сумішах після її додаткового подрібнення.

Особливістю самоущільнюваних сумішей є можливість внутрішнього і зовнішнього розшарування. Перше обумовлено дією сили тяжіння і зменшується в міру збільшення в'язкості розчинової частини і зменшення крупності зерен заповнювача. Друге виникає в результаті недостатнього зчеплення щебеню і розчинової складової, що може бути обумовлено надмірно високою в'язкістю останньої або підвищеним вмістом щебеню.

Добавка золи-виносу чинить позитивний вплив на зниження величини розшаровуваності самоущільнюваної золовмісної бетонної суміші. При цьому слід зазначити екстремальний характер цього впливу (рис. 4.7), який можна пояснити тим, що оптимальній витраті золи відповідає деяка найкраща гранулометрія суміші.

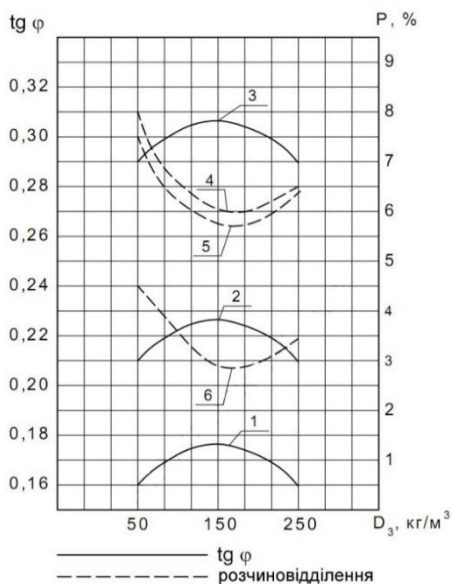


Рис. 4.7. Вплив витрати і дисперсності золи на розчиновідділення (P) самоущільнюваних золовмісних бетонних сумішей:
 (В/Ц = 0,4; В = 180 кг/м³; $r_{II} = 0,41$ і S_3 : 1, 4 – 4900; 2, 5 – 3900;
 3, 6 – 2900 см²/г)

Повітровтягування в самоущільнюваних бетонних сумішах є одним з основних факторів, що визначають міцність, однорідність і довговічність бетону. Відомо, що кожен відсоток залученого повітря обумовлює зниження міцності бетону на 5...10%. Залучення повітря відбувається в процесі перемішування, вивантаження і укладання бетонної суміші і залежить від складу бетонної суміші, характеристик матеріалів для її приготування, дозування добавки пластифікатора. Введення до складу самоущільнюваних бетонних сумішей добавок суперпластифікаторів дозволяє збільшити повітровтягування до 3%. Однак, такі суміші швидко втрачають повітря, що зумовлено їх низькою в'язкістю.

Використання золи-виносу, яка піддається додатковому помелу, підвищує в'язкість цементних систем. Це у свою чергу має сприяти утримуванию в самоущільнюваних сумішах з СП залученого повітря.

Для аналізу моделей міцності була побудована діаграма ізоляційної міцності (рис. 4.8). Відповідно до цієї діаграми інтервал можливих значень витрати золи при збільшенні як міцності бетону, так і водоцементного відношення при незмінній міцності звужується.

Аналіз діаграми (рис. 4.8) дозволяє стверджувати про можливість вибору оптимальних значень витрати золи. Якщо за оптимальну приймати мінімально можливу витрату золи, то зі збільшенням В/Ц вона зростає. Для практичних цілей, проте, оптимальну витрату золи можна призначати однаковою у всьому діапазоні міцності бетону.

Характер впливу дисперсності золи на міцність бетонів та розчинів залежить від сукупності факторів: вихідної рухомості, водов'язучого відношення, пустотності заповнювачів, виду застосовуваної золи, умов твердіння бетону та ін.

З одного боку, збільшення дисперсності золи (шляхом її помелу) повинно приводити до збільшення її хімічної активності, що чинить позитивний вплив на зростання міцності бетону. З іншого боку, збільшення дисперсності золи викликає збільшення вмісту повітря в бетонній суміші і 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 привести до розшарування самоущільнюваного бетону.

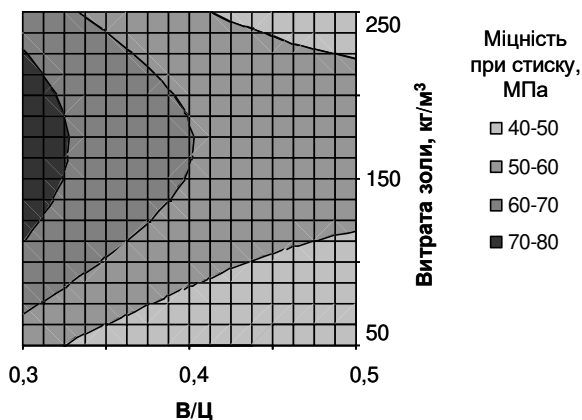


Рис. 4.8. Діаграма міцності самоущільнюваних золовмісних бетонів при $V = 180 \text{ кг/м}^3$, $r_{II} = 0,41$

При постійному V/C і витраті золи вплив її дисперсності на міцність самоущільнюваного бетону носить екстремальний характер (рис. 4.9).

Оптимальну дисперсність золи, аналогічно оптимальній витраті золи, можна призначити постійною для широкого діапазону міцності самоущільнюваного бетону. Інтервал значень $S_{з \text{ опт.}}: 3500 \dots 4000 \text{ см}^2/\text{г}$.

Отримані експериментальні і розрахункові дані свідчать про можливість за рахунок введення оптимальної кількості золи-виносу в складі самоущільнюваних бетонів скоротити витрату цементу на 20...23% при одночасному забезпеченні заданої міцності. Помел золи до оптимальної питомої поверхні дозволяє досягти додаткової економії цементу в кількості 8...10%.

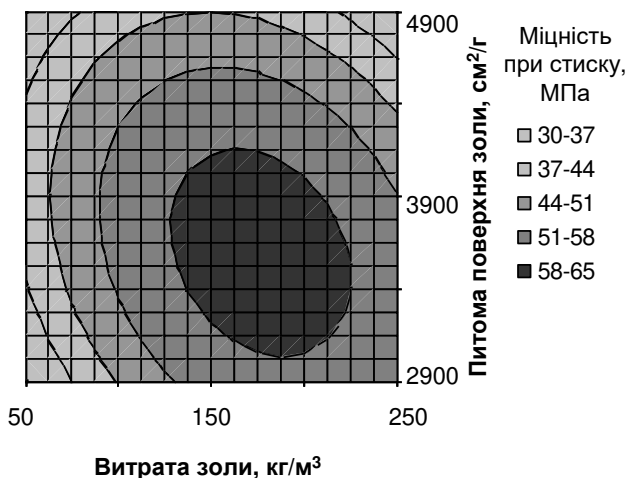


Рис. 4.9. Діаграма міцності самоущільнюваних золовмісних бетонів при В/Ц = 0,4, В = 180 кг/м³, $r_{\text{Ц}}$ = 0,41

4.3. Самоущільнювані бетони з добавками полімерів

Цементний, в тому числі цементно-золий самоущільнюваний бетон, має ряд суттєвих недоліків, навіть при використанні добавок суперпластифікаторів. Це, в першу чергу, високе співвідношення міцності на стиск (f_{cm}) до міцності на розтяг ($f_{\text{c.tf.}}$), яке збільшується з віком і класом бетону.

Застосування дрібнозернистих золомісних бетонів, хоча й позитивно впливає на співвідношення $f_{\text{c.tf.}}/f_{\text{cm}}$, однак воно лишається достатньо високим досягаючи 8...10 і більше. Низька деформативність бетону, і особливо його міцність при розтягу – є однією із головних причин його недостатньої тріщиностійкості. Підвищення міцності цементних бетонів і розчинів на розтяг і їх деформативності – один із головних наслідків застосування полімерних добавок в цементних системах.

Дослідження показали, що при 10% добавці полівінілацетатної дисперсії (ПВАД) міцність цементно-піщаного розчину (1:3) на згин при комбінованих умовах

твердіння перевищила в 3...4 рази міцність контрольних зразків, а при твердінні на повітрі – в 2,9 раз. Підвищення міцності розчину на згин при введенні 10...20% ПВАД хоча і є дещо меншим, однак все рівно лишається значним. Позитивний вплив на міцність при розтягу та згині і на відношення $f_{c,tf}/f_{cm}$ відмічається також при введенні в цементні розчини добавок латексу та водорозчинних смол.

Для цементних бетонів і розчинів як матеріалів для підлог суттєвим наслідком введення полімерних добавок є збільшення їх ударної міцності, адгезійної здатності, зносостійкості. За даними М. Брокарда полівінілацетатний бетон, який зберігався в умовах 50%-ої вологості при полімер-цементному відношенні (П/Ц) 0.05 має в 3 рази більшу стійкість до стирання, ніж звичайний бетон. При П/Ц=0.1 і П/Ц=0.2 цей показник відповідно зростає в 12 і 20 разів. В сухих умовах твердіння з підвищеним П/Ц багаторазово зростають також міцність склеювання і ударна міцність зразків.

Позитивний вплив полімерних добавок на порову систему цементного каменя обумовлює їх понижену проникність. При цьому закономірно, що бетон з добавкою ПВАД проявляє меншу проникність і більшу стійкість при насиченні неполярними рідинами, а з добавками каучуків і інших неполярних полімерів, водою і іншими полярними рідинами. Цей висновок справедливий і у відношенні стійкості модифікованих бетонів і розчинів по відношенню до агресивної дії різних хімічних речовин.

Зниження пористості і наповнення пор полімерами, а також втягнутим повітрям призводить, як відмічає більшість дослідників, до підвищення морозостійкості бетонів та розчинів. У роботі Намікі і Охама наведені результати дослідження стійкості зразків модифікованих розчинів, вкладених на звичайний цементний розчин після 10-річної дії зовнішнього середовища в умовах Токіо. На відміну від зразків, зв'язаних з немодифікованим розчином і зруйнованих через рік після перебування у звичайних умовах, більшість зразків зв'язаних модифікованим розчином через 10 років мали задовільний стан в тих же умовах. Охама відмічає також, що більшість

модифікованих розчинів має хорошу стійкість до карбонізації атмосферним CO_2 , що сприяє запобіганню корозії сталевій арматури.

Модифікуючи властивості затверділих бетонів і розчинів, добавки полімерів суттєво відбиваються на реологічних та технологічних властивостях цементних сумішей.

При низьких полімер-цементних відношеннях вододисперговані і водорозчинні полімери, як правило, мають пластифікуючу та повітровтягуючу дію. З підвищенням вмісту полімерів, і зокрема ПВАД, легкоукладальність сумішей погіршується внаслідок підвищення в'язкості системи. Модифіковані цементні суміші вигідно відрізняються від звичайних підвищеною водоутримуючою здатністю, яка збільшується зі зростанням полімерцементного відношення.

Вже порівняно невеликі кількості полімерів (2...3%) дозволяють зменшити кількість мікрodefектів в структурі цементного каменя і бетону, підвищити однорідність бетону і модифікувати структуру цементного каменя.

Властивості самоущільнюваних дрібнозернистих бетонних сумішей із добавками полімерів. Аналіз наявної інформації щодо самоущільнюваних дрібнозернистих золomisних бетонів дозволяє припустити, що одним із ефективних шляхів покращення його технічних властивостей є застосування поліфункціональних модифікаторів (ПФМ), що містять суперпластифікатори (СП) і полімери.

В наших дослідженнях композиція СП – ПВАД яка виконувала роль поліфункціонального модифікатора (ПФМ) у бетонну суміш вводилась з водою замішування. В якості суперпластифікатора використовували добавку полікарбоксилатного типу Melflux 2651f. У відповідності з нашими експериментальними даними при дозуванні цього суперпластифікатору (СП) до 1% водовідділення самоущільнюваних сумішей практично не збільшується, а потім має тенденцію до росту (рис. 4.10). У той же час ПВАД забезпечує зниження водовідділення у всьому інтервалі дозувань від 0.5 до 3%. Наявність у ПФМ обох компонентів призводить до того, що їх водовідділення забезпечується таким як і без добавок.

Це можна пояснити, головним чином, повітрявтягуючою здатністю досліджуваної полімерної добавки. Із збільшенням вмісту ПВАД від 0 до 3% у самоущільнювані суміші втягується додатково більше 1% повітря і сумарний повітря вміст в них зростає до 2,5% (рис.4.10).

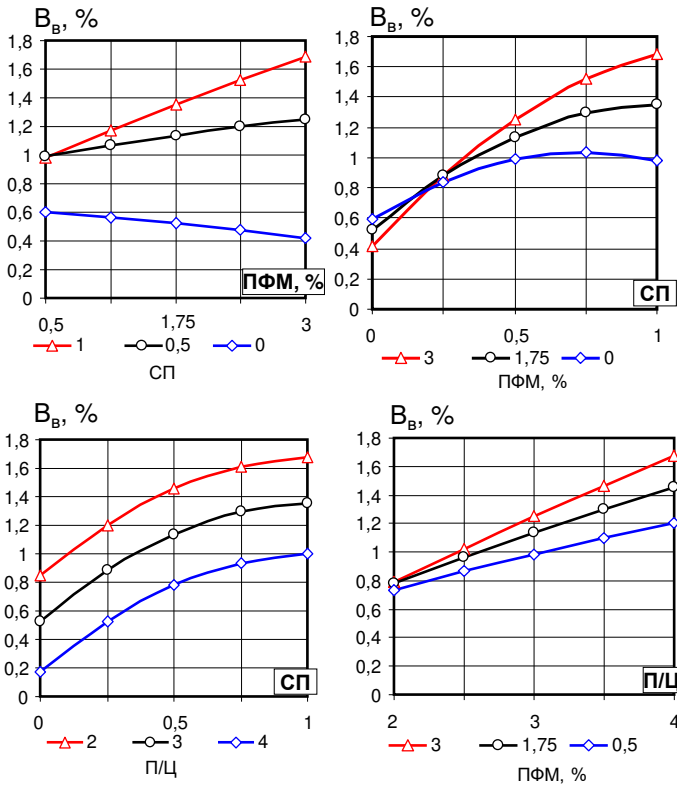


Рис. 4.10. Залежності водовиділення (V_v , %) самоущільнюваних бетонів із добавкою ПФМ від досліджуваних факторів: вмісту ПФМ, % маси цементу (ПФМ, %) масової частки СП у складі ПФМ (СП) та масового співвідношення піску і цементу (П/Ц)

Розрахункові криві повітрявтягування самоущільнюваних бетонних сумішей (рис. 4.11), отримані на основі відповідних

рівнянь регресії, відображають відомий висновок, що в рухомих бетонних сумішах суперпластифікатори сприяють видаленню повітря. Спільне введення СП і ПВАД запобігає виникненню зазначеного вище негативного ефекту.

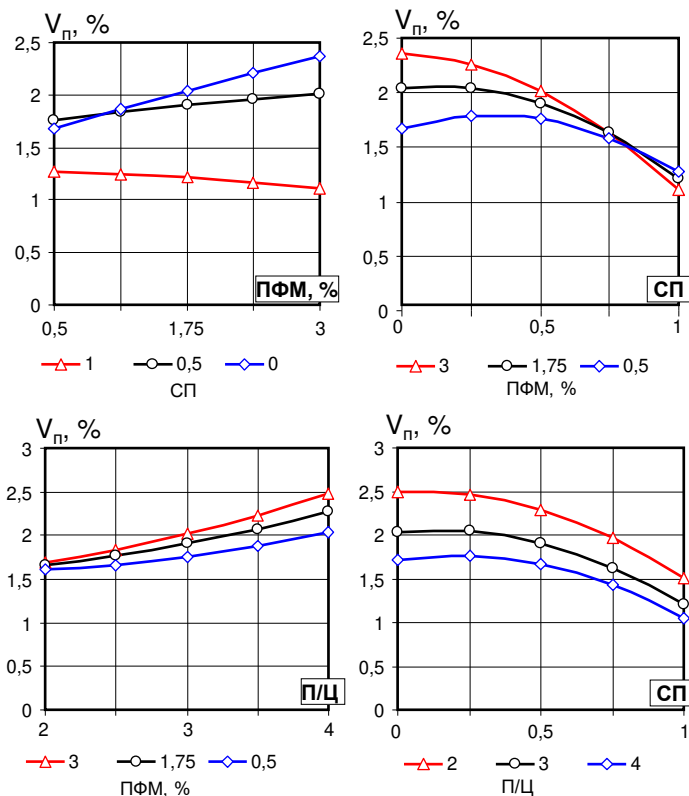


Рис. 4.11. Залежності повітрявтягування ($V_p, \%$) самоущільнюваних бетонів із добавкою ПФМ від досліджуваних факторів: вмісту ПФМ, % маси цементу (ПФМ, %) масової частки СП у складі ПФМ (СП) та масового співвідношення піску і цементу (П/Ц)

Для самоущільнюваних бетонних сумішей практичне значення має зберігання рухомості сумішей у часі. Вивчали зміну

рухомості сумішей за зануренням конуса Стройцила (ЗК) при $n=3$, $V/C=0,6$ при температурі $20\pm 2^\circ\text{C}$.

Вихідними матеріалами для виготовлення самоущільнюваних сумішей у дослідях служили портландцемент з нормальною густиною $\text{НГ}=26,8\%$ і пісок з водопотребою $\text{Вп}=8,5\%$ з добавками СП і ПВАД. Результати дослідів приведені на рис. 4.12.

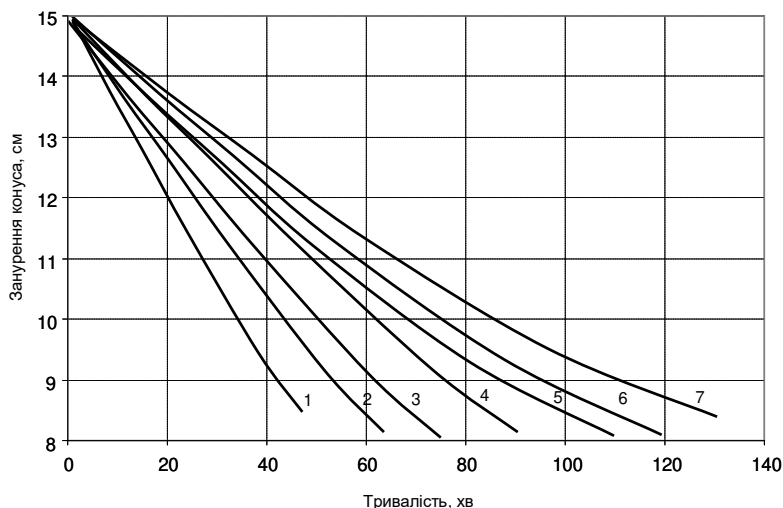


Рис. 4.12. Вплив добавки ПФМ на втрату рухомості самоущільнюваних бетонних сумішей:

- 1 – СП - 0.5% маси цементу; 2 – СП - 3%; 3 – СП - 0.25%;
 ПВАД - 0.25%; 4 – без добавок; 5 – СП - 1.5%; ПВАД - 1.5%;
 6 – ПВАД - 0.5%; 7 – ПВАД - 3%

Найбільш низький темп падіння рухомості мають суміші, у яких ПФМ представлений лише ПВАД, а найбільш високий – СП. Подовжений період "життєздатності" самоущільнюваних сумішей із добавкою ПВАД можна пояснити сповільнюючим впливом останньої на строки тужавлення цементного тіста і менш інтенсивною кінетикою росту пластичної міцності.

Для міцності СУБ при стиску і згині (рис. 4.13, 4.14), як і

слід було очікувати, із досліджуваних факторів найбільш значимим виявилось водоцементне відношення. При цьому характерно, що для бетонів із добавкою ПФМ, так як і для звичайних цементно-піщаних розчинів, збільшення В/Ц веде до значно більш істотного падіння міцності на стиск ніж міцності на згин. Якщо f_{cm} при зміні В/Ц від 0.3 до 0.5 падає майже в 2 рази, то $f_{c,tf}$ – в 1,25...1,3 рази. При цьому інтенсивність падіння як f_{cm} , так і $f_{c,tf}$ практично не залежить ні від вмісту ПФМ, ні від співвідношення його компонентів.

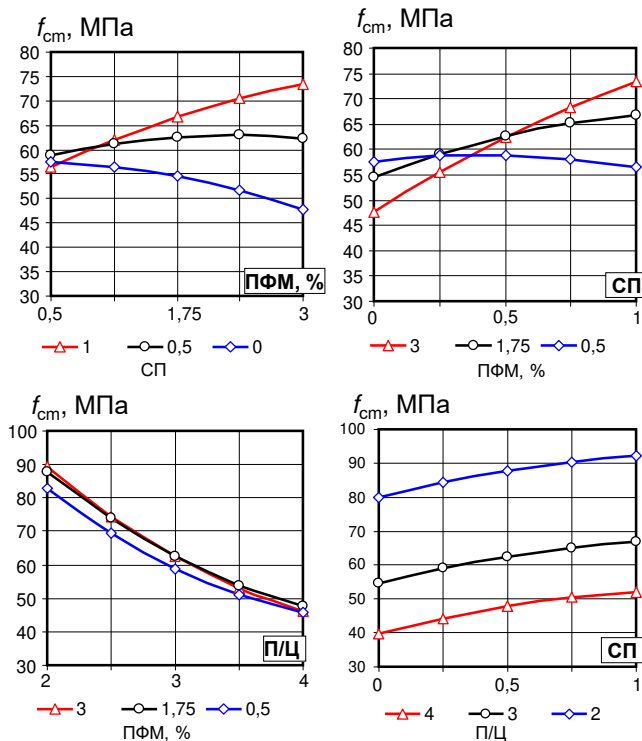


Рис. 4.13. Залежності міцності при стиску (f_{cm} , МПа) самоущільнюваних бетонів із добавкою ПФМ від досліджуваних факторів:
 вмісту ПФМ, % маси цементу (ПФМ, %);
 масової частки СП у складі ПФМ (СП);
 масового співвідношення піску і цементу (П/Ц)

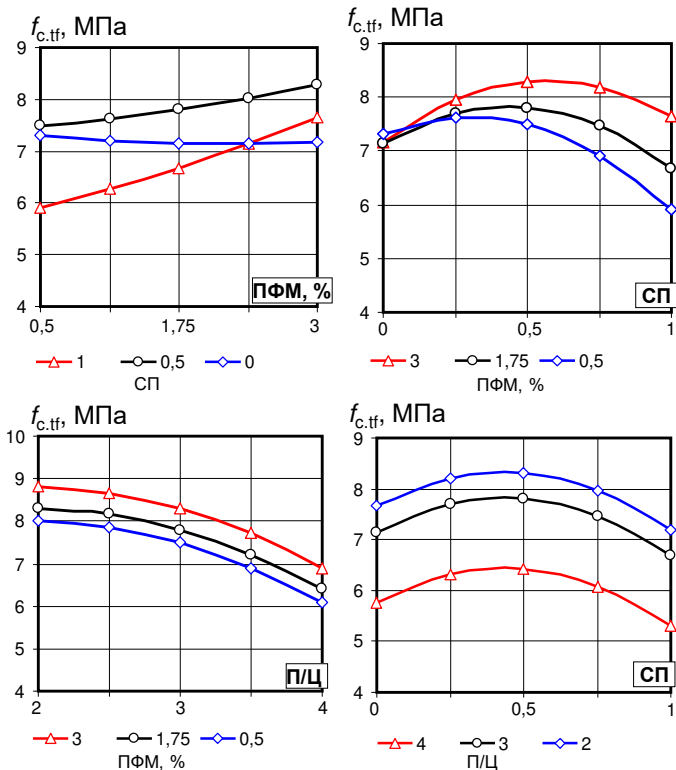


Рис. 4.14. Залежності міцності при згині ($f_{c,tf}$, МПа) самоущільнюваних бетонів із добавкою ПФМ від досліджуваних факторів:
 вмісту ПФМ, % маси цементу (ПФМ, %);
 масової частки СП у складі ПФМ (СП);
 масового співвідношення піску і цементу (П/Ц)

Збільшення вмісту полівінілацетатної добавки, особливо від 1.5 до 3%, призводить до істотного падіння величини f_{cm} (рис. 4.13). Уповільнення процесу наростання міцності полімерцементів спостерігалось й іншими дослідниками, хоча наявні дані дуже суперечливі, що можна пояснити розходженнями у вихідних матеріалах, технології приготування сумішей, умовах їхнього твердіння і т.п. За даними М.М.

Круглицького, із збільшенням вмісту полівінілацетатної емульсії і полівінілового спирту в цементному камені до 1% міцність його при стиску в умовах твердіння при 18...20°C і відносній вологості 60...65% зменшилася на 13%. Проте в композиціях, що містять 20% ПВАД, зниження f_{ct} склало усього 8.7%.

Наші експериментальні дані і отримані по ним моделі f_{cm} показують, що при малих дозуваннях ПФМ (від 0.5 до 1.75%) зміна в їхньому складі масової частки СП від 0 до 0.5 практично не викликає зниження міцності при стиску СУБ.

Вплив досліджуваних ПФМ на міцність цементних композицій при згині (рис. 4.14) має ряд особливостей. Найбільш інтенсивно $f_{c,tf}$ у досліджуваній області дозувань ПФМ росте в тих випадках, коли добавка представлена лише суперпластифікатором Melflux. Проте абсолютні значення міцності на згин залишаються більш високими при використанні ПФМ із максимальною масовою часткою СП не більше 0.5 (рис.4.14). Отримані дані показують, що в області порівняно невисоких досліджуваних концентрацій ПВАД відчувається її помітний позитивний вплив на $f_{c,tf}$ цементних композицій. Як відомо, цей вплив зростає в області високих концентрацій полімерних добавок. Відповідно знижується і співвідношення $f_{cm}/f_{c,tf}$. Наприклад, за даними М.М. Круглицького міцність при згині цементного каменю, модифікованого полівінілацетатної емульсією в кількості 20% маси цементу (у перерахунку на суху речовину) склало 14.1МПа і була майже у 2 рази вищою ніж при 1% ПВАД. При цьому співвідношення $f_{cm}/f_{c,tf}$ склало 3.12, у той час як для цементного каменю без добавок воно було 7.3, при вмісті ПВАД 1% – 5.45. За нашими даними, для СУБ з В/Ц=0.3...0.5 без добавок $f_{cm}/f_{c,tf}$ у 7 діб 5...7, у 28 – 6,5...9 і в 90 діб – 6.7...9.2. Розрахункові співвідношення $f_{cm}/f_{c,tf}$ для СУБ із добавкою ПФМ при різних значеннях досліджуваних чинників, отримані з використанням відповідних рівнянь регресії, приведені в табл. 4.5.

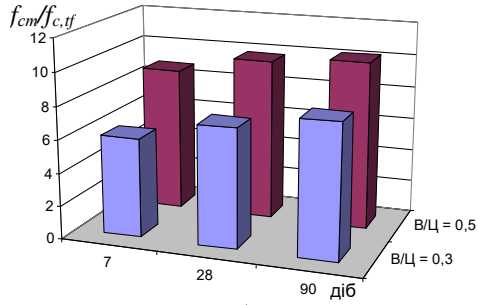
Таблиця 4.5

Розрахункові співвідношення $f_{cm}/f_{c,tf}$ для СУБ із добавкою ПФМ

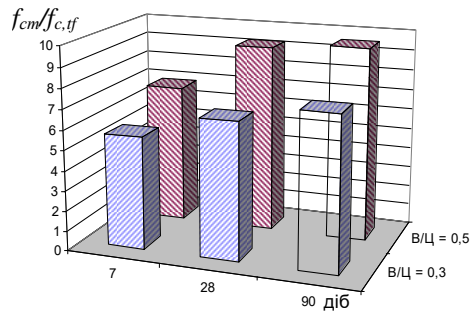
№ з/п	$f_{cm}/f_{c,tf}$		
	7 діб	28 діб	90 діб
1	5.82	6.57	7.13
2	3.51	4.9	4.8
3	5.69	6.86	7.61
4	4.31	5.52	5.4
5	8.77	9.11	9.26
6	6.69	6.98	6.49
7	9.83	9.37	9.56
8	7.83	8.61	7.58

Аналіз даних табл. 4.5 показує, що тенденція до зниження $f_{cm}/f_{c,tf}$ проявляється в міру зростання як загального вмісту ПФМ, так і збільшення в останньому частки полімерного компоненту. У світлі сучасних уявлень параметр $f_{cm}/f_{c,tf}$ до певної міри характеризує досконалість структури композиційного матеріалу. За сприятливих умов для утворення структури цементного каменю зменшуються напруження, що виникають в результаті спрямованого росту кристалів при твердінні цементу. Можна припустити, що більш низькі відношення $f_{cm}/f_{c,tf}$ СУБ із добавкою ПФМ обумовлені адсорбційним модифікуванням структури цементного каменю. Відомо, що адсорбційною здатністю стосовно полярних поверхонь гідратних новоутворень володіють як СП, так і полівінілацетатний полімер. Останній при достатній кількості утворює, крім того, суцільну плівкову матрицю, що також сприяє підвищеній міцності цементного каменю на розтяг і згин.

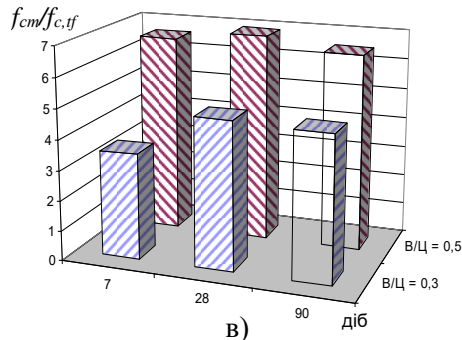
На рис. 4.15 за даними табл. 4.5 показана кінетика зміни $f_{cm}/f_{c,tf}$ СУБ із добавками ПФМ по мірі твердіння. Для бетону без добавок і з пониженим вмістом ПФМ, особливо при переважанні СП, характерна тенденція до збільшення $f_{cm}/f_{c,tf}$ із переходом бетону від раннього до більш пізнього віку. При рості вмісту ПФМ і частки в ньому полімерного компонента співвідношення міцнісних параметрів стабілізується в часі, або навіть може спостерігатися тенденція до зниження $f_{cm}/f_{c,tf}$.



а)



б)



в)

Рис. 4.15. Кінетика зміни $f_{cm}/f_{c,tf}$ для СУБ із добавкою ПФМ:

а – без добавок; б – ПФМ - 0.5%, частка СП у складі

Зміна водопоглинання СУБ із добавками ПФМ по мірі зміни їхнього складу (рис. 4.16) добре корелюється з міцністю

при стиску, що природно пояснюється близькою залежністю обох властивостей від відкритої пористості бетону. Із збільшенням В/Ц від 0.3 до 0.5 водопоглинання зменшується практично лінійно. При В/Ц=const найбільш істотні розходження у водопоглинанні бетонів, що містять ПФМ різноманітного складу, відзначаються при максимальному вмісті добавки. При цьому найменше водопоглинання має бетон, що містить у якості добавки тільки суперпластифікатор. Збільшення вмісту СП у бетоні від 0.5 до 3% при В/Ц=0.4 ($X_3=0$) дозволяє зменшити, наприклад, водопоглинання з 8 до 6.5% , тобто на 18.7%.

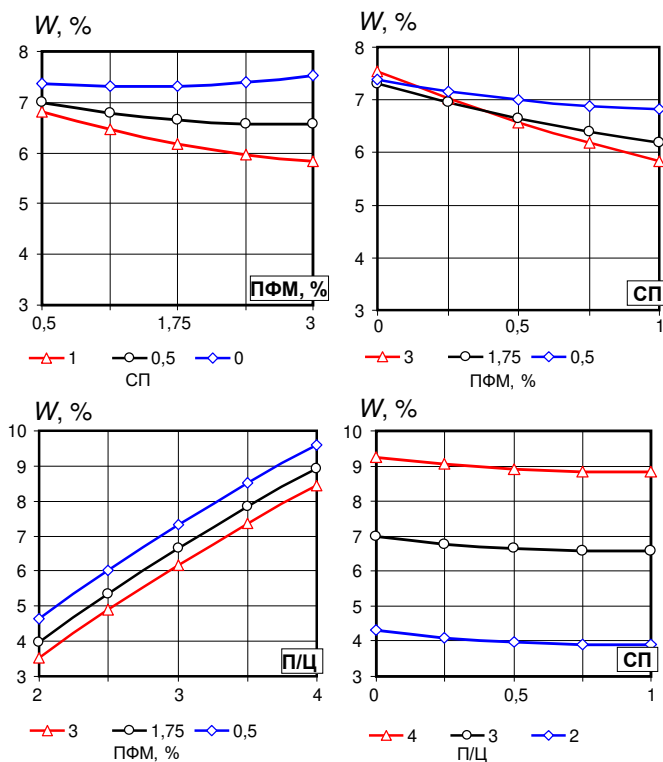


Рис. 4.16. Залежності водопоглинання (W , %) самоущільнюваних бетонів із добавкою ПФМ від досліджуваних факторів:
 вмісту ПФМ, % маси цементу (ПФМ, %);
 масової частки СП у складі ПФМ (СП);
 масового співвідношення піску і цементу (П/Ц)

Одним їх найбільш істотних переваг полімерцементних бетонів при використанні їх для підлог є їх знижена стиранність. Як показали досліди, істотний позитивний ефект ПВАД на стираність виявляється при низьких значеннях полімерцементного відношення (П/Ц). При П/Ц = 0.005 і В/Ц=0.3 розрахункова стираність СУБ складає 0.53 г/см², у той же час як зростання П/Ц до 0.03 зменшує стираність до - 0.35 г/см², тобто на 34%. Додаткові досліди показали, що стираність СУБ без добавок складала 0.83 г/см².

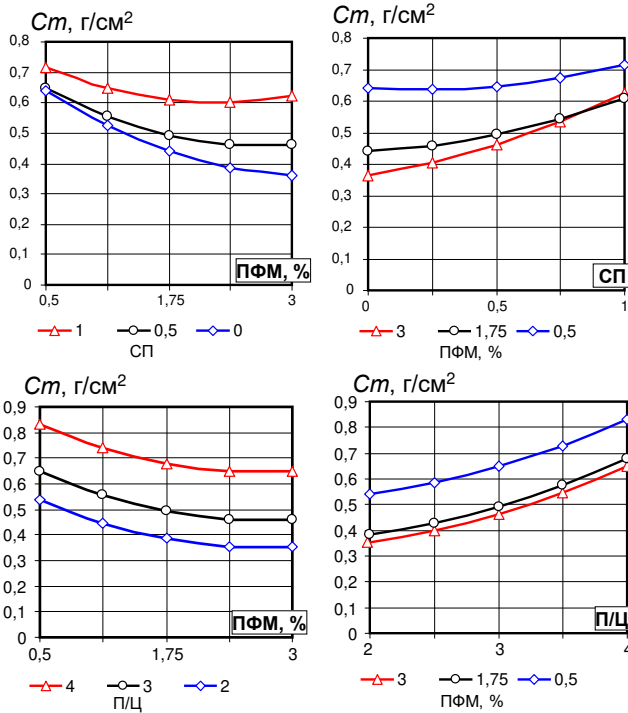


Рис. 4.17. Залежності стиранності (St , г/см²) самоущільнюваних бетонів із добавкою ПФМ від досліджуваних факторів: вмісту ПФМ, % маси цементу (ПФМ); масової частки СП у складі ПФМ (СП); масового співвідношення піску і цементу (П/Ц)

Деякий позитивний ефект на стираність СУБ, хоча і значно менший ніж добавка ПВАД, чинить і добавка Melflux 2651f, що можна пояснити її впливом на міцність при $V/\Omega = \text{const}$ (рис. 4.17). Між останньою і стираністю при інших постійних умовах простежується чітка залежність.

5. РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВІ БЕТОНИ

5.1. Загальні відомості

Найбільш ефективним різновидом дрібнозернистого бетону, котрий володіє підвищеною однорідністю, міцністю та деформативністю є розроблений у Франції у 90-х роках 20 століття реакційно-порошковий бетон (РПБ) (Reactive Powder Concrete (RPC)). Для такого бетону міцність при стиску досягає до 150...200 МПа, що в декілька разів перевищує міцність для звичайних бетонів. Як показують дані багатьох дослідників, для РПБ поряд з високою міцністю характерний також високий показник тріщиностійкості, що характеризується співвідношенням міцності при стиску до міцності при згині. Такий показник для РПБ знаходиться у межах від 3,5 до 5, тоді як для традиційних високоміцних бетонів – 8...10. Поєднання надвисокої міцності та високої деформативності у реакційно-порошковому бетоні забезпечується додатково внаслідок дисперсного армування.

У складі РПБ не міститься крупний заповнювач. Замість нього використовуються дрібні порошки, такі як кварцовий пісок і мелений кварц з розмірами частинок від 0,045 до 0,6 мм. Термін "реакційно-порошковий" відображає той факт, що дисперсні компоненти в РПБ при твердінні проходять відповідні хімічні перетворення.

Надвисокі механічні характеристики РПБ можна пояснити наступними їх особливостями:

- 1) підвищенням однорідності шляхом усунення крупних заповнювачів;
- 2) підвищенням щільності бетону шляхом оптимізації зернового складу суміші компонентів;
- 3) покращенням властивостей цементуючої матриці шляхом додавання високоефективних пуцоланових добавок, таких як мікрокремнезем та за рахунок зменшення за допомогою суперпластифікаторів водов'язучого відношення;

Ефективність РПБ підтверджується даними про його використання у відповідальних спорудах.

Завдяки підвищеній міцності, довговічності і радіаційній стійкості РПБ може бути використаний як надійний матеріал для контейнерів радіоактивних відходів атомних електростанцій. Він також застосовується для термічного захисту будівельних конструкцій, оскільки забезпечує кращу вогне- та жаростійкість, ніж звичайний високоміцний бетон.

Висока деформативність і поглинання енергії забезпечують надійність конструкцій із застосуванням РПБ навіть при землетрусах.

Дослідження свідчать про те, що РПБ дозволяє розширити можливості використання бетону при виготовленні нових тонкостінних конструкцій, виробництво яких раніше було неможливим. Незважаючи на те, що виробничі витрати на РПБ є, в цілому, вищими, ніж для звичайних бетонів, при його використанні існують економічні переваги. За рахунок застосування дисперсного армування короткими сталевими волокнами можливе повне або часткове усунення використання арматурних стержнів. За рахунок надвисоких механічних характеристик РПБ товщина бетонних елементів може бути зменшена, що призводить до економії матеріалів і витрат на виготовлення конструкції в цілому.

Існує ряд прикладів застосування РПБ для зведення елементів мостів (переважно пішохідних). Шербрукський пішохідний міст у Квебеку в Канаді (рис. 5.1) був першою в світі великою спорудою, яка була побудована на основі РПБ. Конструкція мосту являє собою ферму, що не містить звичайної арматурної сталі, натягнуту сталевими тросами. Ефективна товщина пішохідного мосту становить лише 150 мм. Така ж конструкція, яка була б побудована зі звичайного НРС, мала б товщину майже 400 мм.

Пішохідний міст в Кореї Суньюдо у Сеулі є найбільшим з РПБ мостом у світі з одним прольотом 120 м. Міст також не містить звичайної арматури. Під час будівництва всі елементи конструкції були зібрані поруч з будівельним майданчиком в зоні, яка містила дозувальні установки, сталеву опалубку та камеру термічної обробки.



Рис. 5.1. Шербрукський пішохідний міст у м. Квебеку (Канада)

Пішохідний міст Саката-Мірай в Японії зведений із застосуванням РПБ надзвичайно легкий з вагою всього 56 тонн, що становить приблизно одну п'яту від статичного навантаження еквівалентної звичайної попередньо напруженої залізобетонної конструкції.

Підвищена стійкість до стирання забезпечує тривалий термін служби поверхонь мостів та промислових підлог, в той час як підвищена корозійна стійкість забезпечує захист в районах із суворими кліматичними умовами.

Дисперсність компонентів РПБ дозволяє отримати високу якість обробки поверхні.

РПБ були запропоновані як нове покоління матеріалів для забезпечення безпеки, які мають надзвичайно високу динамічну стійкість.

Дисперсно-армований РПБ, відомий під комерційною назвою DUCON® використовується у захисних бетонних елементах проти динамічних впливів, таких як вибухи, бомбардування, удари або землетруси. Для використання РПБ як захисного бетону вирішальне значення має взаємозв'язок

деформативних та міцнісних властивостей. За допомогою DUCON® можна ефективно підвищити захист будівель від руйнівних дій за рахунок використання тонкостінних елементів. Встановлено, що дисперсно-армований РПБ витримує вибухи, бомбардування, землетруси та їх поєднання при товщині не більше 4...5 см (рис. 5.2). Такі характеристики були підтверджені і продемонстровані у багатьох випробуваннях і дослідженнях відомих університетів і установ. У той же час завдяки високій текучості суміші РПБ придатний для виготовлення виробів різноманітних форм, що адаптує його до загальної архітектурної картини. Матеріал, отриманий за технологією DUCON®, використано для захисту об'єктів критичної інфраструктури, таких як посольства, хмарочоси, громадські центри, центри обробки даних високого рівня безпеки та атомних електростанцій.



а) б)
Рис. 5.2. Результат випробувань вибухом залізобетонних плит, підсилених і не підсилених за допомогою РПБ (а) та залізобетонна плита із захисним шаром РПБ, для захисту від утворення уламків при руйнуванні (б).
(РПБ торгової марки DUCON® (Німеччина))

Використання дисперсно-армованого РПБ дозволяє також забезпечити захист людей від уламків бетонних конструкцій, що утворюються при вибухах чи інших динамічних впливах. Великі приміщення з самонесучими перекриттями, такі як спортивні зали, громадські та виробничі приміщення, будівлі вимагають

високих вимог до безпеки конструкцій. Випробування показали, що захисні шари, виготовлені з дисперсно армованого РПБ DUCON®, можуть поглинати локальні руйнування залізобетонних елементів при товщині до 1,5 см (рис.5.2 (б)).

5.2. Вплив складу РПБ на його властивості

Вплив водов'язучого відношення (В/В'яз). Вплив (В/В'яз) на міцність РПБ при стиску вивчався на класичному складі бетону даного виду, що містив цемент (840 кг/м³), мікрокремнезем SikaFume-HR/TU (260 кг/м³), пісок фракції 0,16...1,25 мм (1200 кг/м³) та суперпластифікатор Melflux 2141 f (2% від маси цементу). Вплив В/В'яз на міцність РПБ вказаного складу при стиску при різній тривалості твердіння показано у табл. 5.1 та на рис. 5.3. З рис. 5.3 чітко видно, що оптимальне В/В'яз, яке дає найвищу міцність на стиск РПБ (145 МПа на 90 діб), рівне 0,2.

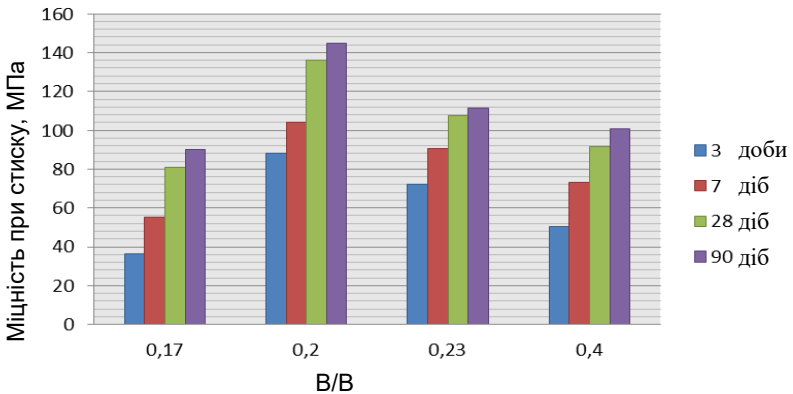


Рис. 5.3. Вплив водов'язучого відношення на міцність РПБ у різному віці

Зниження міцності від максимальної у даному випадку при більш низьких значеннях В/Ц становить від 35% до 60% у віці 3 і 90 діб, відповідно. Зменшення відбувається в основному через відсутність достатньої кількості води замішування бетонної

суміші для забезпечення необхідного ущільнення і належної гідратації. Недостатній вміст води також може сприяти утворенню низької кількості портландиту, який необхідний для пуцоланової реакції і утворення нових гідросилікатів кальцію при взаємодії цементу з високоактивними мінеральними добавками, що обумовлює підвищення міцності.

Таблиця 5.1
Вплив водов'язучого відношення на міцність РПБ при різній рухомості бетонної суміші

Міцність РПБ при стиску у віці, МПа	Водов'язуче відношення (В/В'яз)			
	0,17	0,2	0,24	0,38
	Рухомість (по Сутгарду), мм			
	10	25	30	35
3	36,4	88,1	72,1	50,4
7	55,3	104,2	90,7	73,3
28	81,1	136,2	107,6	91,8
90	90,1	145,0	111,5	100,8

Вплив вмісту та виду суперпластифікаторів. Визначення оптимальної кількості суперпластифікаторів має важливе значення для досягнення максимальної міцності РПБ. У деяких роботах відмічається, що виробництво зв'язної та текучої суміші для РПБ вимагало надзвичайно великих витрат суперпластифікатора порівняно з бетоном НРС (High Performance concrete) та самоущільнюваним бетоном.

Було проведено дослідження ефективності різних видів суперпластифікуючих добавок на міцність РПБ. В якості добавок було використано: суперпластифікатори поліакрилат-ного типу Mapei Dypamon SP-3, та полікарбоксилатного типу Melflux 2651F, PCE-7, Muraplast FK 6330. Всі види пластифікуючих добавок використовувалися у вигляді водних розчинів з концентрацією 25...30%. Витрати води визначалися із умови забезпеченості заданого розпливу 25...30 см по віскозиметру Сутгарда. Результати випробувань наведені у табл. 5.2, рис. 5.4...5.6.

Таблиця 5.2

Вплив виду та кількості добавок-суперпластифікаторів на міцність РПБ

№	Вид пластифікуючої добавки	Витрата пластифікуючої добавки, % від маси цементу*	В/Ц	Розплив, см	f_{cm}^1 , МПа	f_{cm}^7 , МПа	f_{cm}^{28} , МПа
1	Melflux 2651F	2	0,20	30	26,7	100,3	149,6
2		4	0,19	26	22,3	100,5	142,9
3	PCE-7	2	0,20	30	32,5	99,0	143,2
4		4	0,19	30	10,1	88,9	142,4
5	Muraplast FK 6330	2	0,24	30	15,7	97,4	116,7
6		4	0,21	28	12,7	91,1	112,2
7	Dynamon SP-3	2	0,20	30	35,9	122,3	160,4
8		4	0,18	30	17,3	102,1	151,4

* Витрата добавки вказана в розрахунку на 30 % розчин

Задана рухомість суміші РПБ була забезпечена при В/В'яж в межах від 0,18 до 0,24. Найбільше значення у виборі оптимального виду добавки для даного виду бетону має міцність на 1-шу та 28-му добу. Максимальну міцність на 28 добу (141 МПа) було досягнуто при використанні добавки Dynamon SP-3 у кількості 2%, при цьому була забезпечена максимальна текучість і зв'язність суміші при В/В'яж=0,2. Деякі добавки, такі як Muraplast FK 6330 та Melflux 2651F при достатній міцності у 28 діб дещо знижували міцність у ранні терміни. При максимальному дозуванні добавок практично усі досліджені їх види суттєво знижували у першу чергу міцність на 1 добу, а деякі, такі як Muraplast FK 6330 і 28-му. Таким чином, найбільш ефективним видом добавки для РПБ із досліджених можна вважати суперпластифікатор поліакрилатного типу Dynamon SP-3 (рис. 5.4). Даний суперпластифікатор був вибраний для подальших більш детальних досліджень.

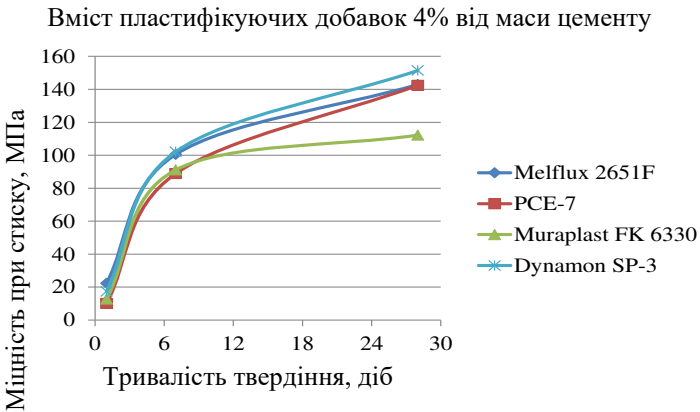
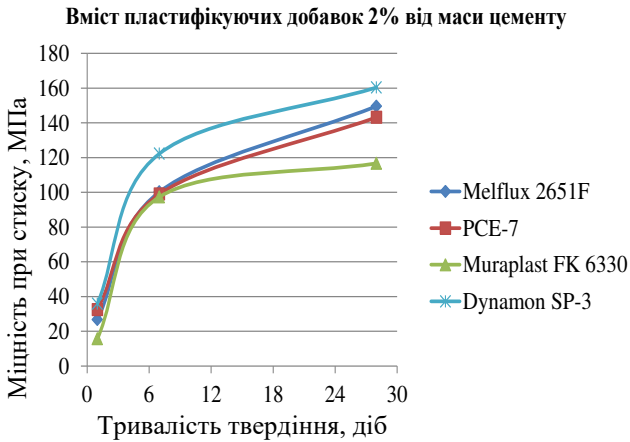


Рис. 5.4. Кінетика набору міцності РПБ з різними видами суперпластифікаторів

На рис. 5.5 показано вплив дозування суперпластифікатора Dynamon SP-3 на міцність при стиску при постійному В/В'яз (В/В'яз=0,2) у різні терміни твердіння. Чітко простежується оптимальне дозування суперпластифікатора, що забезпечує найвищу міцність РПБ при стиску, яке становить 2,0% від маси цементу. Нижчий ніж 2,0% вміст суперпластифікатора викликає суттєве зниження міцності РПБ на стиск. При більшому

вмісті СП ніж 2,0%, міцність на стиск РПБ змінюється, але, як правило, у меншій мірі. Порівнюючи значення міцності бетону з кількістю суперпластифікатора 1% можна зробити висновок, що зниження міцності становить від 46% до 66% у діапазоні від 3 до 90 діб. Недостатній вміст СП знижує також легкоукладальність. Суміш стає менш рухомою і дрібні частинки можуть легко флокулюватися по усьому об'єму цементному тісті, у якому залишаються пори.

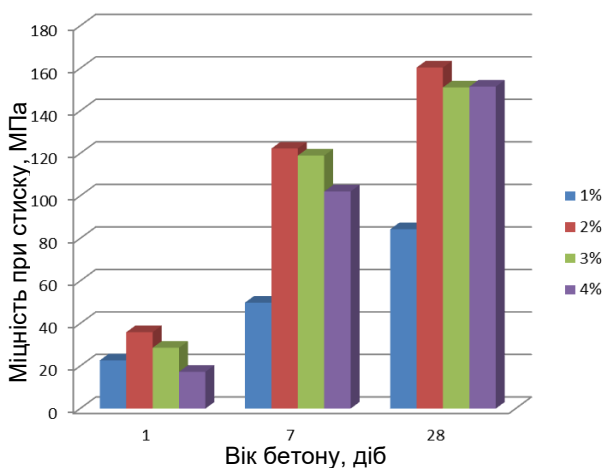


Рис. 5.5. Вплив кількості суперпластифікатора Дупамон SP-3 на міцність РПБ у різному віці

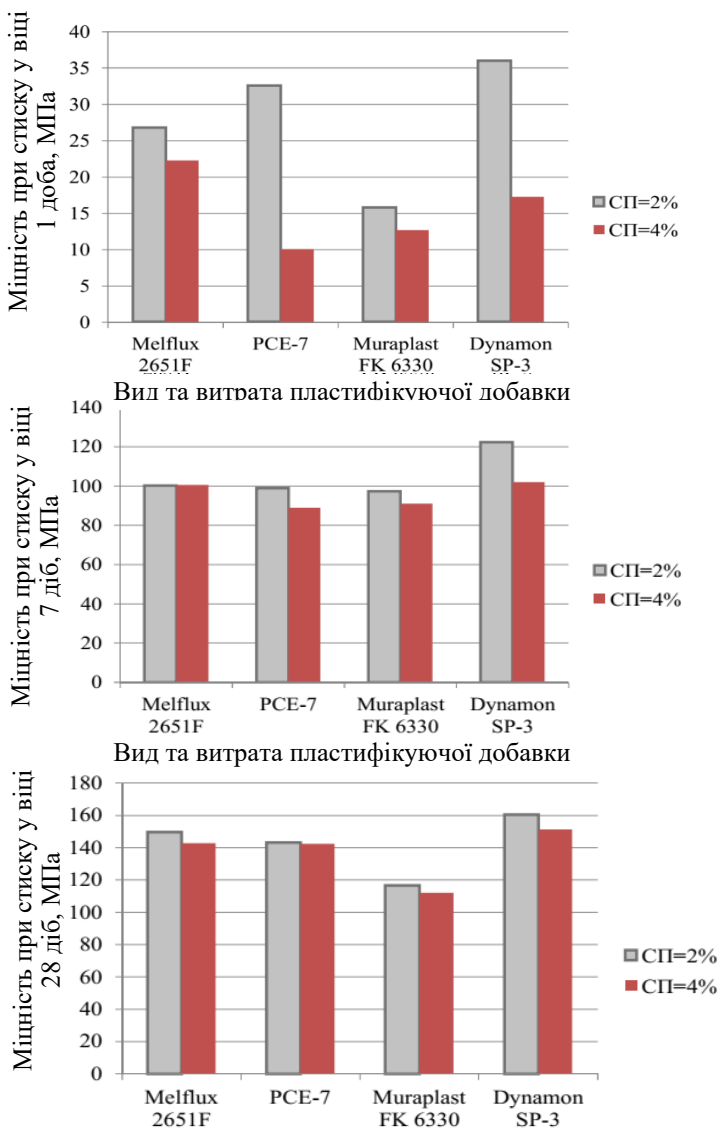


Рис. 5.6. Порівняльний вплив суперпластифікаторів на міцність РПБ у різному віці твердіння

Ефективність різних видів мінеральних добавок у складі РПБ. Як показують дослідження різних дослідників, характерні для РПБ унікальні властивості такий бетон набуває за рахунок використання підвищеної кількості високоактивних мінеральних добавок, таких як мікрокремнезем, які хімічно реагують з гідроксидом кальцію і активно зв'язують його у нерозчинні сполуки. Переважна кількість досліджень РПБ передбачають обов'язкову необхідність використання у якості активного компонента добавки мікрокремнезему.

Використання мікрокремнезему суттєво ускладнює технологію отримання РПБ та підвищує його вартість, причому у багатьох регіонах така добавка відсутня, тому поряд з мікрокремнеземом доцільно розглянути можливість використання інших високоактивних алюмосилікатних добавок, таких як метакаоліни та цеоліти, а також гідравлічних добавок меншої активності, таких як, золи-виносу та доменні шлаки.

В НУВГП в якості мінеральних добавок при проведенні експериментальних досліджень було використано мелений кварцовий пісок (МКП) з питомою поверхнею $S_n=3786$ см²/г, гранітний аспіраційний пил (АПП) ($S_n=2367$ см²/г), доменний гранульований шлак (ДГШ) ($S_n=2725$ см²/г), зола виносу Бурштинської ТЕС (ЗВ) ($S_n=2527$ см²/г). Для порівняння був також отриманий реакційно-порошковий бетон на мікро-кремнеземі SikaFume-HR/TU (МК Sika) ($S_n=23158$ см²/г) і метакаоліні з $S_n=10125$ см²/г. Порівняння усіх досліджених складів здійснювалось з порошковим бетоном, що не містить жодних мінеральних наповнювачів ні інертних, ні активних.

Під час експерименту визначалась водопотреба бетонної суміші до досягнення необхідної рухомості текучої суміші. Рухомість контролювалась шляхом вимірювання розпливу за віскозиметром Сутгарда (25...30 см). З бетонної суміші виготовлялись зразки-куби 10×10×10 см та балки 4×4×16 см. Склади бетону наведені у табл. 5.3. В усіх точках експерименту було використано поліакрилатний суперпластифікатор Marec Dupamon SR3. Визначали міцність при стиску та при згині у віці 1, 7, 28 діб твердіння у нормальних умовах. Також для вибору ефективних складів реакційно-порошкових

бетонів було розраховано показники $U_f = U/f_{cm}$. Результати експерименту наведені у табл. 5.3 та на рис. 5.7.

Таблиця 5.3

Вплив різних видів мінеральних добавок на міцність РПБ при стиску і при згині

№	Цемент кг/м ³	Пісок фракції 0,16... 1,25 мм, кг/м ³	Мінеральна добавка, кг/м ³	Витрага води, л/м ³	В/Ц	Роз- плив см	Міцність бетону у віці днів, МПа					
							f_{ctf}^1	f_{cm}^1	f_{ctf}^7	f_{cm}^7	f_{ctf}^{28}	f_{cm}^{28}
Мікрокремнезем SikaFume-HR/TU (МК Sika) ($S_n=23158 \text{ см}^2/\text{г}$)												
1	1080	1200	120	240	0,22	30	10,1	47	25,6	95	29,7	143
2	840	1200	260	240	0,29	12	12,7	43,3	28,2	125,5	32,2	162,4
Мелений кварцовий пісок (МКП) ($S_n=3786 \text{ см}^2/\text{г}$)												
3	1080	1200	120	240	0,22	30	7,57	49,8	22,34	71,0	26,8	117,6
4	840	1200	260	240	0,29	30	8,72	41,8	18,60	74,5	22,3	111,5
Аспіраційний гранітний пил (АГП) ($S_n=2367 \text{ см}^2/\text{г}$)												
5	1080	1200	120	252	0,23	10	8,81	46,1	20,65	75,3	24,8	107,6
6	840	1200	360	240	0,29	25	8,19	35,8	21,27	71,8	25,5	104,4
Доменний гранульований шлак (ДГШ) ($S_n=2725 \text{ см}^2/\text{г}$)												
7	1080	1200	120	240	0,22	15	6,19	36,1	20,83	82,4	24,9	113,8
8	840	1200	260	240	0,29	25	5,83	23,3	15,66	80,1	18,8	118,0
Зола виносу ТЕС (ЗВ) ($S_n=2527 \text{ см}^2/\text{г}$)												
9	1080	1200	120	240	0,22	30	6,46	31,5	19,22	70,3	23,1	100,9
10	840	1200	260	240	0,29	30	4,76	22,8	15,22	68,5	18,3	114,5
Метакаолін (МТК) ($S_n=10125 \text{ см}^2/\text{г}$)												
13	1080	1200	120	240	0,22	30	9,8	48,1	22,7	103,1	26,6	133,4
14	840	1200	260	270	0,33	10	7,8	27,2	17,2	78,5	20,1	102,4

Як видно з отриманих результатів, РПБ, виготовлений з високотекучих сумішей при максимальному вмісті мікрокремнезему SikaFume-HR/TU 360 кг/м³ на 28-му добу

нормального твердіння досягає міцності при стиску 162,4 МПа, що узгоджується з відомими даними. Часткова чи повна заміна мікрокремнезему даної марки іншими досліджуваними добавками дає можливість отримати бетон зі значеннями міцності, що знаходяться у діапазоні 104...160 МПа. Такі значення міцності, при забезпеченні високої текучості, вказують на те, що отриманий матеріал повинен характеризуватися високими технологічністю та експлуатаційними характеристиками в умовах дії різних навантажень, що виникають при роботі споруд.

Міцність при згині для усіх досліджених серій зразків знаходилась у межах від 18,3 до 32,2 МПа (табл.5.3). Звертають на себе увагу досить високі значення співвідношення міцності РПБ при згині до міцності при стиску ($f_{cm}/f_{c,tf}$) – 4,0...5,0 (табл.5.4). Даний показник характеризує стійкість бетону до утворення тріщин і його деформативність. Для звичайних бетонів співвідношення $f_{cm}/f_{c,tf}$ зазвичай знаходиться у межах 7...8, для дрібнозернистих – дещо нижче 5...6. Підвищена тріщиностійкість і деформативність РПБ є визначальними властивостями, котрі дозволяють рекомендувати ці бетони для відповідальних споруд.

На відміну від інертних добавок, збільшення вмісту яких викликало погіршення текучості та зниження міцності, у випадку застосування золи і шлаку максимальна міцність досягалась при збільшенні вмісту добавок у більш пізньому віці. Зола-винос унаслідок своєї форми зерен проявляє деяку пластифікуючу дію, що дозволяє зберегти низькі значення В/Ц та щільну структуру цементного каменю навіть при високих витратах.

Максимальне підвищення міцності було досягнуто за рахунок використання високоактивних добавок мікрокремнезему та метакаоліну. У найбільшій мірі проявив себе мікрокремнезем SikaFume-HR/TU (максимальна міцність при стиску, при його витраті 260 кг/м³ – 162,4 МПа), дещо меншу ефективність показала добавка метакаоліну (133,4 МПа).

Слід відмітити, що максимальна ефективність добавки метакаоліну спостерігається при витраті близько 10% від маси цементу, такий результат підтверджує дані, отримані при

дослідженні високоміцних бетонів. Подальше підвищення кількості метакооліну призводить до збільшення водопотреби бетонної суміші і міцність бетону знижується.

Таблиця 5.4
Вплив різних видів мінеральних добавок на критерії ефективності міцності

№	Цемент, кг/м ³	Пісок фракції 0,16 ... 1,25 мм, кг/м ³	Мінеральна добавка, кг/м ³	Витрата води л/м ³	В/Ц	Розплив См	Міцність бетону у віці діб					
							$f_{cm}^1 / f_{c,tf}^1$	$f_{cm}^7 / f_{c,tf}^7$	$f_{cm}^{28} / f_{c,tf}^{28}$	Ц/МПа	Ц/МПа	Ц/МПа
Мікрокремнезем SikaFume-HR/TU (МК Sika) ($S_n=23158 \text{ см}^2/\text{Г}$)												
1	1080	1200	120	240	0,22	30	2,7	3,7	4,8	20,0	11,4	7,6
2	840	1200	260	240	0,29	12	2,6	4,5	5,0	25,2	6,7	5,2
Мелений кварцовий пісок (МКП) ($S_n=3786 \text{ см}^2/\text{Г}$)												
3	1080	1200	120	240	0,22	30	6,6	3,2	4,4	19,3	13,5	8,2
4	840	1200	260	240	0,29	30	4,8	4,0	5,0	17,9	10,0	6,7
Аспіраційний гранітний пил (АГП) ($S_n=2367 \text{ см}^2/\text{Г}$)												
5	1080	1200	120	252	0,23	10	5,2	3,6	4,3	20,8	12,8	8,9
6	840	1200	260	240	0,29	25	4,4	3,4	4,1	20,9	10,4	7,2
Доменний гранульований шлак (ДГШ) ($S_n=2725 \text{ см}^2/\text{Г}$)												
7	1080	1200	120	240	0,22	15	5,6	4,0	4,6	20,8	11,7	8,4
8	840	1200	260	240	0,29	30	4,3	5,1	6,3	22,5	9,3	6,3
Зола виносу ТЕС (ЗВ) ($S_n=2527 \text{ см}^2/\text{Г}$)												
9	1080	1200	120	240	0,22	30	4,9	3,7	4,4	23,2	13,7	9,5
10	840	1200	260	240	0,29	30	4,8	4,5	6,3	22,8	10,9	6,5
Тонкомелений кремнезем (МК) ($S_n=21094 \text{ см}^2/\text{Г}$)												
11	1080	1200	120	240	0,22	30	3,5	6,1	5,6	35,8	12,6	8,7
12	840	1200	260	240	0,29	15	4,5	6,5	5,2	23,5	9,2	6,6
Метакоолін (МТК) ($S_n=10 \text{ 125 см}^2/\text{Г}$)												
13	1080	1200	120	240	0,22	30	4,9	4,5	5,0	22,5	10,5	8,1
14	840	1200	260	270	0,33	10	3,5	4,6	5,1	30,9	10,7	8,2

Враховуючи вартість, використання таких добавок як золи-виносу, мелений шлак та мелений пісок може бути найбільш виправдане з економічної точки зору.

Отримані результати (табл. 5.5, 5.6, рис.5.7, 5.8) вказують на ефективність введення в РПБ комплексних мінеральних добавок. Найбільший вплив на міцність РПБ здійснює додаткове введення добавки метаксаоліну – міцність бетону при стиску підвищується до 122...126 МПа. При цьому збільшення вмісту метаксаоліну більше 10% від маси цементу є неефективним внаслідок суттєвого підвищення в'язкості суміші і збільшення водопотреби. Найбільш ефективною добавкою в комплексі з метаксаоліном можна вважати золу-виносу. Позитивний вплив золи на рухомість бетонних сумішей деякою мірою компенсує підвищення в'язкості, властиве метаксаоліну.

Ефективність досліджених комплексів мінеральних добавок з позиції збільшення міцності при згині аналогічна. Максимальні значення $f_{c,tf}$ (23...25 МПа) досягнуті при поєднанні метаксаоліну у кількості 10% від маси цементу з золою-виносу Бурштинської ТЕС.

Таблиця 5.5

Вплив метаксаоліну і цеолітового туфу та інших мінеральних добавок на міцнісні характеристики реакційно-порошкового бетону

№	Вид мінеральної добавки, кг/м ³	В/Ц	Роз-плив, см	Міцність бетону у віці діб, МПа					
				$f_{c,tf}^1$	f_{cm}^1	$f_{c,tf}^7$	f_{cm}^7	$f_{c,tf}^{28}$	f_{cm}^{28}
Вміст метаксаоліну 10% від маси цементу									
4	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,29	30	7,48	22,8	18,78	79,4	23,32	122,6
5	Зола виносу ТЕС (ЗВ)	0,29	30	7,65	29,2	18,87	79,9	25,28	126,2
6	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,29	30	7,57	24,7	17,53	78,9	19,76	125,0

Таблиця 5.6

Результати визначення впливу цеоліту на міцність РПБ

№	Вид мінеральної добавки, кг/м ³	В/Ц	Роз-плив, см	Міцність бетону у віці діб, МПа					
				$f_{c,tf}^1$	f_{cm}^1	$f_{c,tf}^7$	f_{cm}^7	$f_{c,tf}^{28}$	f_{cm}^{28}
Вміст цеоліту 5% від маси цементу									
1	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,31	25	7,30	36,1	12,10	61,6	13,88	93,7
2	Зола виносу ТЕС (ЗВ)	0,31	30	9,35	39,0	12,19	68,0	18,42	96,3
3	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,31	30	8,37	36,6	12,19	66,9	17,36	94,4
Вміст цеоліту 10% від маси цементу									
4	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,36	30	6,68	29,5	10,77	53,9	14,33	70,5
5	Зола виносу ТЕС (ЗВ)	0,34	30	8,28	33,5	12,02	66,4	17,09	88,7
6	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,35	30	7,74	31,9	11,30	65,9	16,20	89,0
Вміст цеоліту 15% від маси цементу									
7	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,4	30	5,87	26,3	9,70	47,7	12,82	63,5
8	Зола виносу ТЕС (ЗВ)	0,38	30	7,03	30,1	10,77	59,8	15,66	80,0
9	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,39	30	6,32	28,6	10,06	57,0	14,42	76,0

Однією з речовин, що містять в своєму складі значну кількість активного кремнезему і володіють високими адсорбційними властивостями, є цеолітовий туф, родовища якого розробляються на Закарпатті. Цеоліт – природний мінерал вулканічного походження кліноптіллолітового типу класу

мікропористих каркасних алюмосилкатів з розміщеними у внутрішньокристалічному просторі обмінними катіонами лужних і лужноземельних металів і молекул води. Відомо, що цеолітові туфи проявляють пуцоланові властивості і здатні до реакцій заміщення з гідроксидом кальцію.

Як показують отримані результати (табл. 5.6), бетони, що містили добавку цеоліту, відрізнялись підвищеною водопотребою (від $V/C=0,31$ – при вмісті цеоліту 5% від цементу до $V/C=0,38\dots0,4$ – при 15%). Відповідно до цього міцність РПБ з цеолітом приймала нижчі значення, ніж з метакаоліном. Максимальні значення міцності при стиску знаходились у межах 93...97 МПа при вмісті цеоліту не більше 5% від цементу. Одночасне введення цеолітових туфів разом з суперпластифікаторами, що в значній мірі знижують водовміст, може створювати певні передумови для їх застосування в високоміцних бетонах.

5.3. Проектування складів РПБ з нормованою рухомістю і міцністю

Склад РПБ із заданими матеріалами доцільно знаходити з допомогою відповідних експериментально-статистичних моделей. Комплекс таких моделей, що отримані у НУВГП, дозволив побудувати номограми водопотреби та міцності реакційно-порошкових бетонів, виготовлених із застосуванням золи виносу ТЕС та доменного гранульованого шлаку (рис. 5.7, 5.8). Дані номограми в сукупності з комплексом отриманих моделей, можуть бути використані для проектування складів РПБ із заданою міцністю та рухомістю. При цьому методика розрахунку полягає в наступному:

1. Використовуючи номограму міцності наведену на рис. 5.7 або 5.8, залежно від виду використаної мінеральної добавки, почергово визначаємо витрату суперпластифікатора Дунапон SP-3, витрату цементу та вміст мінеральної добавки (наповнювача), які будуть забезпечувати задану міцність РПБ на стиск у віці 28 діб.

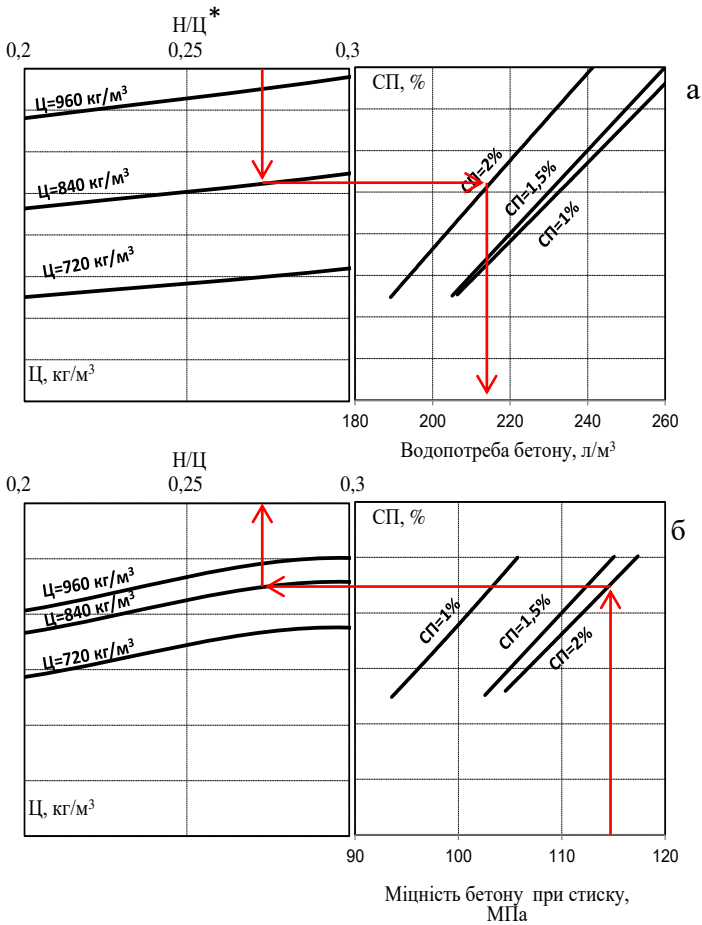


Рис. 5.7. Номограми водопотреби (а) та міцності (б) при стиску РПБ виготовленого із використанням золи виносу ТЕС

* H/C відношення за масою золи-виносу до портландцементу

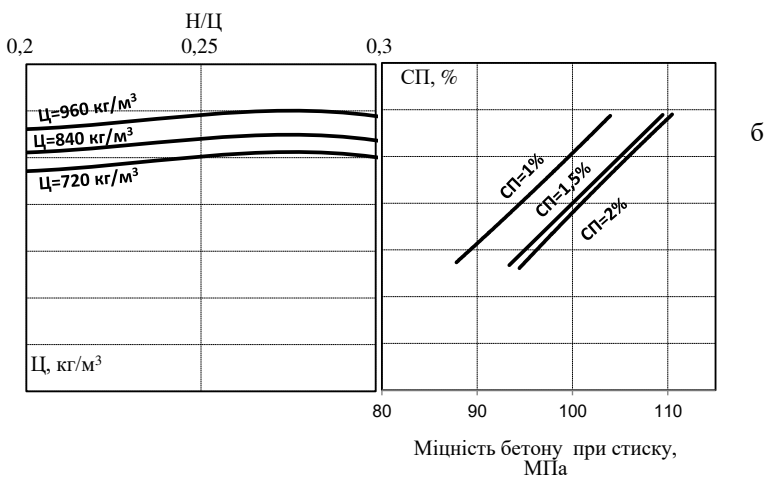
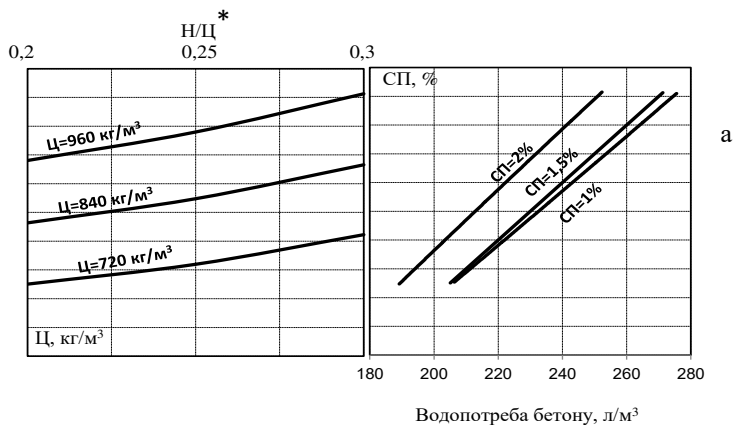


Рис. 5.8. Номограми водопотреби (а) та міцності (б) при стиску РПБ виготовленого із використанням доменного гранульованого шлаку

*H/C відношення за масою доменного гранульованого шлаку до портландцементу

2. Використовуючи номограму водопотреби (рис.5.7, 5.8), при попередньо визначених витраті суперпластифікатора, цементу та мінеральної добавки, встановлюємо витрату води яка

буде забезпечувати отримання бетонної суміші з рухомістю 25...30 см по віскозиметру Суттарда.

3. Витрату заповнювачів можна розрахувати, знаючи об'єм цементного тіста ($V_{ц.м}$) в бетонній суміші.

Об'єм цементного тіста, л/м³:

$$V_{ц.м} = \frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{H}{\rho_{н}} + B. \quad (5.1)$$

Об'єм піску, л/м³:

$$V_n = 1000 - V_{ц.м}. \quad (5.2)$$

Маса піску $П$, кг/м³:

$$П = \rho_n V_n. \quad (5.3)$$

У наведених вище формулах $\rho_{ц}$, $\rho_{н}$, ρ_n – дійсна густина відповідно цементу ($\rho_{ц} \approx 3,1$ кг/л), наповнювача та піску.

Приклад розрахунку.

Розрахувати склад РПБ, виготовленого із застосуванням в якості активного мінеральної добавки золи виносу ТЕС, з 28-добовою міцністю на стиск 115 МПа та рухомістю 25...30 см по віскозиметру Суттарда. В якості пластифікуючої добавки використовується суперпластифікатор Дунамон SP-3. Дійсна густина цементу $\rho_{ц}=3,1$ г/см³, золи виносу ТЕС $\rho_{н}=2,8$ г/см³, піску $\rho_n=2,65$ г/см³.

1. Використовуючи номограму міцності при стиску наведену на рис. 5.7,б, встановлюємо, що для забезпечення заданої міцності при стиску 110 МПа мінімально можлива витрата цементу складатиме – 840 кг/м³, вміст мінеральної добавки – 27,5% від маси цементу, (231 кг/м³) витрата суперпластифікатора Дунамон SP-3 – 2% від маси в'язучого.

2. Використовуючи номограму водопотреби, наведену на рис.5.8,а, встановлюємо, що при розрахунковому компонентному складі бетону мінімально можлива кількість води, при якій забезпечується задана рухомість бетонної 25...30 см по віскозиметру Суттарда буде складати – 215 л/м³.

3. Витрату заповнювачів розраховуємо, знаючи об'єм цементного тіста ($V_{ц.м}$) в бетонній суміші.

Об'єм цементного тіста, л/м³:

$$V_{ц.м} = \frac{Ц}{\rho_ц} + \frac{H}{\rho_H} + B = \frac{840}{3,1} + \frac{231}{2,8} + 215 = 568,5 \text{ л/м}^3$$

Об'єм піску, л/м³:

$$V_n = 1000 - V_{ц.м} = 1000 - 568,5 = 431,5 .$$

Маса піску Π , кг/м³ :

$$\Pi = \rho_n V_n = 2,65 \cdot 431,5 = 1143 \text{ кг/м}^3$$

Отриманий за розрахунками бетон має наступний склад: цемент – 840 кг/м³, зола виносу – 231 кг/м³, вода – 215 л/м³, пісок фракції 0,16...1,25 – 1143 кг/м³. Витрата суперпластифікатора Дунатон SP-3 складає 2% від маси в'язучого.

5.4. Вплив температурних режимів твердіння на міцність РПБ

Встановлено, що на властивості РПБ суттєвий вплив має застосування додаткового тиску при формуванні, зміна температурних умов твердіння, а також спільне використання тиску та температури.

Доведено, що застосування тиску приводить до: зменшення втягнутого повітря, видалення надлишку води і компенсування хімічної усадки. Як відомо суттєво збільшує міцність на стиск бетону його формування в сталевих трубах. Такий спосіб також ефективний і для РПБ. Встановлено, що твердіння РПБ в сталевих трубах значно підвищує його міцність на стиск, а також поздовжню деформацію.

Встановлено, що термічна обробка РПБ після формування є досить ефективною з позиції прискорення пуцоланової реакції, воно суттєво змінює мікроструктуру РПБ, а також позитивно впливає на процес видалення надлишкової води. Термічна обробка після тужавлення сприяє утворенню тобермориту (при температурах до 200° С), і ксоноліту (при температурі 250° С і вище). Підвищення температури прискорює процес гідратації в ранньому віці і підвищує міцність матеріалу на стиск. Однак

швидкий процес гідратації призводить до швидкого наростання аутогенної усадки бетону.

В НУВГП була виконана серія досліджень з метою визначення впливу теплової обробки на процес твердіння і міцність РПБ з використанням золи-виносу та доменного шлаку. При виконанні всіх експериментальних досліджень склад РПБ не змінювався та був наступним: витрати цементу – 840 кг/м³, мінеральної добавки – 260 кг/м³, піску фракції 0,16...1,25 мм – 1200 кг/м³, суперпластифікатора поліакрилатного типу Дунапон SP-3 – 2% від маси в'язучого. Витрати води визначалися із умови забезпеченості заданого розпливу 25...30 см за віскозиметром Суттарда. В якості мінеральних добавок на даному етапі досліджень було використано мелений кварцовий пісок (МКП), доменний гранульований шлак (ДГШ) та золу виносу ТЕС (ЗВ). Додатково до складу бетону вводились добавки метакаоліну в кількості 10% від маси цементу. Теплова обробка проводилась у лабораторній пропарювальній камері за наступним режимом: попереднє витримування – 2 год; підйом температури зі швидкістю 25° С/год; ізотермічна витримка – 8 год, охолодження. Після ТВО визначали міцність зразків при стиску через 2 год, у віці 7 та 28 діб. Результати визначення міцності наведені у табл. 5.7.

Поряд з пропарюванням у роботах багатьох дослідників для забезпечення максимальної гідратації і пуцоланової реакції у РПБ застосовується твердіння у середовищі гарячої води. Для визначення ефективності твердіння досліджуваних нами складів РПБ здійснювалось витримування зразків у воді при температурі 50 та 80° С.

Результати визначення міцності РПБ, що тверднули у гарячій воді наведені у табл. 5.8 та на рис. 5.9.

Таблиця 5.7

Вплив пропарювання на міцнісні характеристики РПБ

№	Вид мінеральної добавки, кг/м ³	В/Ц	Роз- плив, см	Міцність бетону у віці діб, МПа						
				$f_{c,tf}^{TBO}$	f_{cm}^{TBO}	$f_{c,tf}^7$	f_{cm}^7	$f_{c,tf}^{28}$	f_{cm}^{28}	
Температура ізотермічної витримки 50 °С										
1	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,29	30	13,89	45,1	19,44	86,8	19,62	111,0	
2	Зола виносу ТЕС (ЗВ)	0,29	30	14,64	51,2	22,45	93,7	24,14	115,6	
3	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,29	30	14,63	47,3	21,52	89,1	22,42	112,4	
4	Мелений кварцовий пісок (МКП) + метакаолін (МТК)	0,29	30	15,38	67,6	20,94	87,6	22,32	120,3	
5	Зола виносу ТЕС (ЗВ) + метакаолін (МТК)	0,29	30	17,38	72,4	24,40	99,2	26,47	127,6	
6	Доменний гранульований шлак (ДГШ) + метакаолін (МТК)	0,29	30	16,71	71,4	22,37	94,4	23,74	126,8	
Температура ізотермічної витримки 80 °С										
1	Мелений кварцовий пісок (МКП)	0,29	30	14,46	67,1	22,21	88,3	22,53	114,7	
2	Зола виносу ТЕС (ЗВ)	0,29	30	19,90	79,7	24,07	96,1	25,39	120,0	
3	Доменний гранульований шлак (ДГШ)	0,29	30	19,90	78,3	23,30	93,8	24,83	116,5	
4	Мелений кварцовий пісок (МКП) + метакаолін (МТК)	0,29	30	20,83	74,0	22,80	94,9	23,43	124,2	
5	Зола виносу ТЕС (ЗВ) + метакаолін (МТК)	0,29	30	26,15	92,6	27,23	105,3	28,48	132,6	
6	Доменний гранульований шлак (ДГШ) + метакаолін (МТК)	0,29	30	24,43	92,6	24,53	99,1	26,20	128,6	

Пропарювання РПБ при температурі 50° С спричиняє підвищення міцності при стиску на 1 добу в середньому у 2,5...3 рази, на 28 добу – на 1,5...2%. Підвищення температури ізотермічного прогріву однозначно викликає підвищення міцності РПБ. Порівняно зі зразками, що тверділи у нормальних умовах, пропарювання при 80° С спричиняє підвищення міцності на 1 добу у 3,5...4 рази на 28 добу – на 4...5%. Як відомо, тепловолгісна обробка суттєво активізує пуцоланову активність різних мінеральних добавок. Отримані результати показують, що застосування пропарювання значно збільшує ефект підвищення міцності, що викликають добавки золи-виносу та доменного шлаку. Порівняно з цими добавками ефект меленого кварцового піску значно нижчий. Позитивний вплив термічної обробки на ефективність меленого кварцу як мінеральної добавки, викликає утворення гідросилікатів кальцію, при температурі твердіння РПБ, яка перевищує 250° С. При температурах 50...80° С теплова обробка сприяє прискоренню процесів взаємодії гідрооксиду кальцію з золою та шлаком, що мають переважно скловидну структуру. Позитивний вплив пропарювання відображається також і на міцності при згині (табл. 5.7).

Максимальні значення міцності РПБ при випробуванні зразків отримані (табл. 5.8, рис.5.9) при твердінні у воді з температурою 80° С. РПБ, що містив комплексну мінеральну добавку – метакаолін 10% та золу-виносу (10%) на 28 добу твердіння досягнув міцності при стиску 145 МПа, при згині – 30,8 МПа, що на 15...17% вище ніж міцність бетону такого ж складу, що твердів при нормальних умовах.

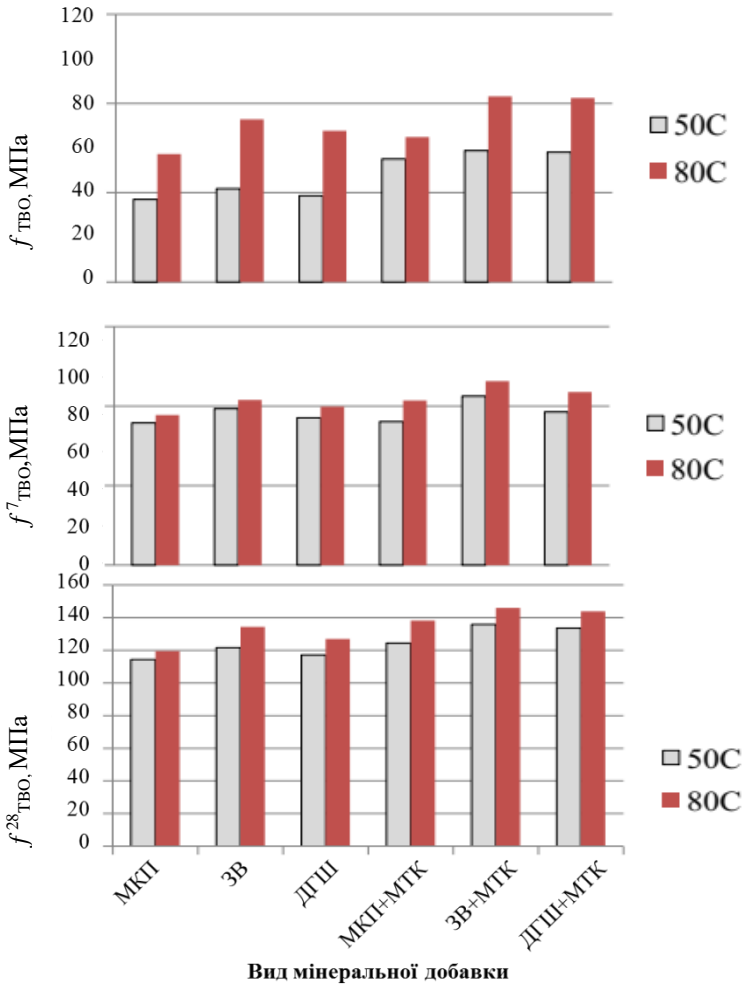


Рис. 5.9. Вплив температури витримування у воді та виду мінеральних добавок на міцність РПБ при стиску через 2 год ($f_{\text{ТВО}}$), 7 діб ($f^7_{\text{ТВО}}$) та 28 діб ($f^{28}_{\text{ТВО}}$)

5.4. Реакційно-порошковий бетон як напівфабрикат для виготовлення сухих будівельних сумішей

Сухі будівельні суміші (СБС) стають все більше актуальними в будівництві завдяки ряду переваг у порівнянні із товарними розчинними сумішами. Використання СБС сприяє підвищенню продуктивності праці і якості робіт, зниженню витрат на транспортування і зберігання, скороченню технологічних операцій. Можливість управління основними властивостями СБС шляхом зміни вмісту різних компонентів створює широкий асортимент необхідних для зведення споруд матеріалів і тим самим дозволяє використовувати їх при виконанні всіх видів робіт.

При зведенні будівель і споруд виникає необхідність в сумішах різного призначення. Виготовлення таких сумішей можливе централізовано на заводах або безпосередньо на будівельних майданчиках з застосуванням напівфабрикатів. В якості такого напівфабрикату може бути використаний реакційно-порошковий бетон. РПБ до замішування водою можна розглядати, як суху суміш, що містить в'язуче (портландцемент), дисперсний наповнювач (мелений шлак, зола та інші) і суперпластифікатор, а також інші добавки-модифікатори. Ці суміші забезпечують високу міцність, адгезійну здатність і довговічність бетонів та розчинів у різних умовах експлуатації.

На основі розроблених складів РПБ можливо при додаванні коректуючих компонентів отримання сухих будівельних сумішей різного складу та функціонального призначення. Зокрема:

- сумішей для захисного («бронювального») шару конструкцій,
- сумішей для ремонту та поновлення поверхонь та споруд;
- мурувальних сумішей для улаштування теплозберігаючих огороджувальних конструкцій;
- сумішей для улаштування стяжок та покриттів підлог;
- сумішей для штукатурення теплоізоляційними розчинами;
- гідроізоляційних сумішей для улаштування різних систем гідроізоляції;
- сумішей для зведення споруд 3D-принтером та ін.

Одним з компонентів, що широко застосовують в сухих

будівельних сумішах різного призначення є редисперговані полімерні порошки РПБ. При замішуванні сухої суміші у воді редисперговані полімерні порошки перетворюються в клейову полімерну дисперсію, яка при затвердінні розчину створює "гумові містки" в його порах і на границі з основою. Вони мають міцність при розриві не менше 5 МПа еластично армують цементний камінь, а також здатні не тільки суттєво збільшити адгезію розчинів до основи, але і значно згладити такі недоліки цементного каменю, як підвищену крихкість, низьку граничну розтяжність, схильність до утворення тріщин, малий опір динамічним навантаженням.

Склади досліджуваних СБС на основі РПБ з використанням РПП приведені в табл. 5.8.

Таблиця 5.8

Склади досліджуваних сумішей на основі РПБ

№	Тип полімеру	Склад сухої суміші, % мас			Вода замішування, %
		РПП	РПБ	Пісок	
1	-	0	50	50	12
2	Neolith P	2,5	50	47,5	12
3	4400	5,0	50	45	12
4	Dairen	2,5	50	47,5	12
5	DA 1400	5,0	50	45	12
6	ПВА	2,5	50	47,5	12

Вплив різних видів РПП на рухомість і міцність розчинових сумішей на основі РПБ наведені на рис. 5.10, 5.11, 5.12.

Склад РПБ був наступний: ПЦ-I – 35%, зола виносу – 15%, пісок фр. 0,16-0,63-50%, суперпластифікатор Melflux 2651F – 0,5% маси цементу.

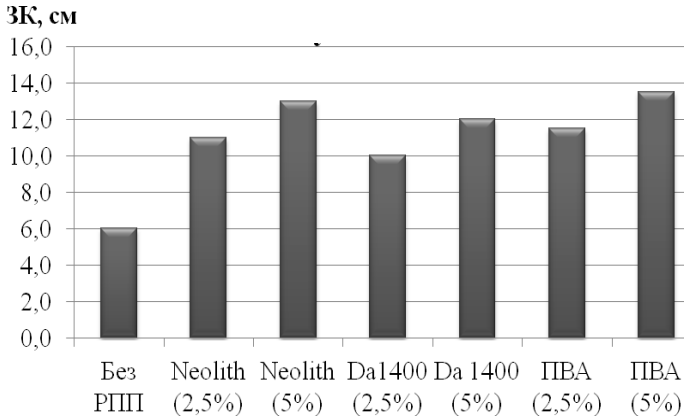


Рис. 5.10. Рухомість розчинів при використанні РПП

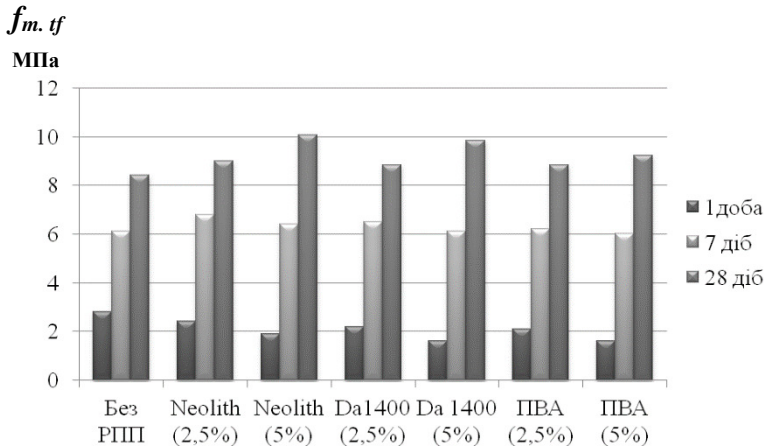


Рис. 5.11. Міцність розчинів на згин ($f_m, \text{тф}$) при використанні РПП

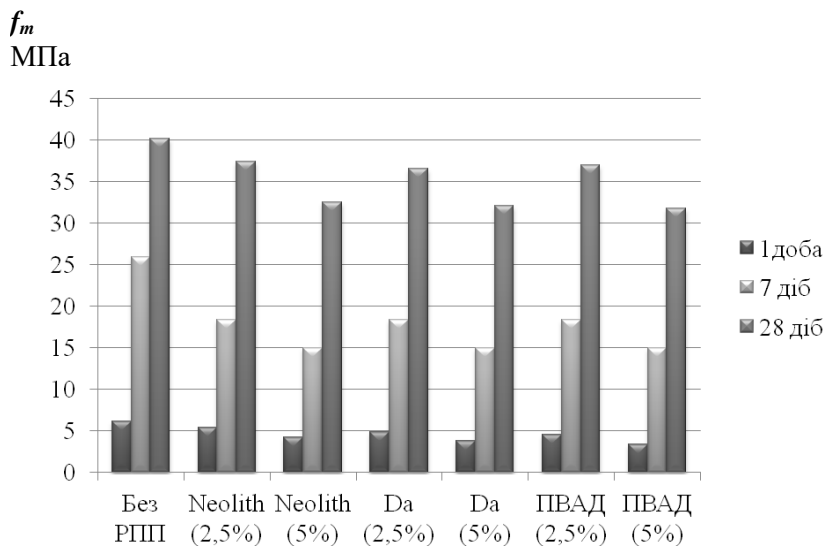


Рис. 5.12. Міцність розчинів на стиск (f_m) при використанні РПП

6. ВИСОКОМІЦНІ ФІБРОБЕТОНИ

6.1. Загальні відомості

З підвищенням міцності бетону росте і його крихкість, знижуються пластично-деформаційні властивості при короткочасному й тривалому навантаженні, що приводить практично до миттєвого руйнування бетону при досягненні ним граничного стану. Варіантом вирішення цієї задачі можна вважати дисперсне армування бетону фіброю, що дозволяє істотно підвищити його питому міцність особливо на розтяг і згин, тріщиностійкість, стійкість до ударних і вібраційних впливів, опір стиранню тощо.

До дисперсно-армованих бетонів або фібробетонів належить група композиційних матеріалів, що включають короткі відрізки різних волокон (фібри) у цементній матриці. В якості фібри можуть служити різні типи волокон зі сталі, скла, синтетичних матеріалів, азбесту, вуглецю та ін. (табл. 6.1).

Найбільш поширені фібробетони на портландцементі, армовані сталевим волокном – сталєфібробетони. Сталеве волокно звичайно представлене відрізками дроту, у тому числі з відпрацьованих канатів. Фібри можуть мати різний поперечний переріз – круглий, овальний й ін. розмірами від 0,2 до 1,6 мм і довжину від 10 до 160 мм. Поверхня фібр може бути профільована, оброблена травленням і, як виключення, гладкою. Кількість фібр, що вводяться в бетон, у більшості випадків коливається від 0,5 до 2% по об'єму. Введення в бетон сталевих фібр у кількості 1...1,5% по об'єму збільшує його міцність на розтяг до 100%, міцність на згин на 150...200%, міцність на стиск підвищується на 10...25%.

Наведені в літературі дані про вплив ступеня дисперсності армуючих волокон на міцність сталєфібробетону суперечливі. У роботах деяких авторів констатується істотне збільшення міцності сталєфібробетону при зменшенні діаметра армуючих волокон. При цьому доходять висновку про існування оптимального діаметру 0,3 мм. Відзначається також, що волокна діаметром 0,5 мм менш ефективні.

Таблиця 6.1

Застосування різних волокон у виробках з цементу

Тип волокна	Галузь застосування
Скло	Збірні панелі, облицювання стін, каналізаційні труби, тонкі бетонні покриття дахів, суха штукатурка для бетонних блоків
Сталь	Ніздрюваті бетонні елементи покриття, дорожні покриття, мостові настили, вогнетривкі матеріали, бетонні труби, злітно-посадочні смуги аеродромів, ємності високого тиску, вибухостійкі споруди, основи верстатів, портові споруди, облицювання тунелів, конструкції корабельного корпусу
Поліпропілен, нейлон	Фундаментні палі, попередньо напружені палі, лицевальні панелі, плавучі елементи для проходів і причалів у портах, дорожній ремонтний матеріал, привантажі для підводних труб
Азбест	Листи, полотно, труби, плити, вогнетривкі й ізоляційні матеріали, каналізаційні труби, гофровані і гладкі покрівельні листи, облицювання стін
Вуглецеві	Гофровані елементи перекриттів, одинарні і подвійні вигнуті мембранні структури, корпуси човнів, настили будівельних лісів
Поліамід	Аналогічно вуглецевим волокнам
Бамбук	Будівельні настили
Слюдяні луски	Частково заміщають азбест у цементних настилах, бетонних трубах; ремонтні матеріали
Рослинні волокна: кокосової пальми, сизала джуту, аквара, слонової трави	Дешеві покрівельні матеріали і лицевальні панелі

За іншими даними, найбільш раціональною є фібра діаметром 0,2...0,4 мм. Разом з тим відзначено, що міцнісні властивості матеріалу мало залежать від діаметру армуючих волокон. Запропоновано використовувати в якості характеристики фібрового армування величину:

$$K = \mu_o \frac{l}{d}, \quad (6.1)$$

де μ_o – коефіцієнт об'ємного армування; l – довжина фібри, мм; d – діаметр фібри, мм.

Експериментально встановлене, що однаковим значенням K , при інших рівних умовах, відповідають однакові значення міцності сталевібробетону незалежно від абсолютних значень діаметрів фібр. Це є наслідком збільшення коефіцієнта орієнтації K_{op} за рахунок збільшення довжини фібр і поліпшення умов їх анкеровки, зі збільшенням діаметру внаслідок надання їм періодичного профілю. На підставі проведених досліджень, рекомендується, для конструкцій, граничний стан яких лімітується несучою здатністю, застосовувати фібри діаметром 1,0...1,2 мм.

Відмінною рисою фібробетонів є підвищена структурна в'язкість, завдяки якій вони набувають значної стійкості при динамічних навантаженнях, у тому числі ударних. Висока ударна міцність – одна із найбільш важливих властивостей фібробетонів, що обумовило їх застосування у важких експлуатаційних умовах, коли підвищення довговічності конструкцій виправдовує порівняно високу вартість матеріалу.

Численні дослідження вітчизняних і закордонних учених, а також дані натурних випробувань конструкцій, переконливо показують, що завжди, незалежно від середньої густини матриці й виду застосовуваних волокон, ударостійкість бетону в результаті дисперсного армування зростає в кілька раз. При цьому відзначається, що ступінь підвищення опірності ударним та іншим динамічним впливам певним чином залежить від геометричних характеристик використовуваних волокон, їх кількості в суміші, дисперсності мінеральних компонентів у складі матриці, а також від технології виготовлення виробів. Одночасно встановлене, що при певному об'ємному насиченні

важкого бетону дисперсною арматурою (у межах $\mu_f=1...3\%$) застосування низькомодульних синтетичних волокон забезпечує одержання матеріалу, що не поступається за ударостійкістю сталеві фібробетону і при цьому більш економічно. Разом з тим, в стверджується, що найбільш ефективним видом фібри, для підвищення ударостійкості бетону, є високомодульні волокна. Це підтверджується результатами досліджень, згідно з якими введення до складу дрібнозернистого бетону капронових фібр із модулем пружності $E=4650$ МПа в кількості 1...2% за об'ємом приводить до збільшення ударостійкості матричного матеріалу в 2...5 раз, у той час як у ніздрюватому бетоні, стосовно якого капронові волокна є високомодульними, підвищення опірності поздовжньому удару при тому ж рівні армування може досягати 10 раз.

Ударну міцність (ударостійкість) пропонується оцінювати енергією, що затрачена на утворення тріщин:

$$A_{y\partial} = \frac{PgHn}{L_{mp}}, \quad (6.2)$$

де P – маса копра, що здійснює удар; g – прискорення вільного падіння; H – висота падіння копра; n – кількість ударів; L_{mp} – довжина утворених тріщин (усереднене значення за всіма гранями зразка).

Дисперсне армування високомодульними волокнами: сталевими, азбестовими, вуглецевими, скляними збільшує тріщиностійкість бетону. За результатами досліджень при введенні сталевих фібр $0,25 \times 25,4$ мм ($d \times l$) у кількості 2,3% за об'ємом навантаження в момент утворення першої тріщини подвоюється в порівнянні зі зразками з неармованого бетону, при кількості волокон 4% за об'ємом зростає приблизно в 3 рази. Також відзначається збільшення міцності в момент утворення тріщини в порівнянні з контрольними зразками на 35...80% в міру збільшення вмісту фібри від 1,25% до 2,5% за об'ємом.

У зв'язку із цим для конструкцій до яких пред'являються підвищені вимоги по тріщиностійкості, рекомендується застосовувати фіброву арматуру діаметром 0,2...0,5 мм.

Високомодульні волокна малого діаметру впливають на початкову ширину розкриття тріщин. Встановлено, що для фібр діаметром 0,3 мм. тріщини в момент їх утворення носили характер місцевих розривів шириною 1,5...3 мкм та довжиною 1...3 мкм. У випадку ж використання фібр діаметром 0,9 мм відразу утворювалися тріщини шириною 7...10 мкм.

За рахунок більш високої тріщиностійкості сталеві фібробетон відрізняється підвищеною в 1,5...2 рази морозо-, жаро- і вогнестійкістю, водонепроникністю. Цінними якостями сталеві фібробетону є підвищена зносостійкість, ударна і динамічна стійкість. Так, зносостійкість сталеві фібробетону збільшується на 30...50%, а опір удару в 10...12 разів.

Дисперсне армування забезпечує покращення порової структури бетону, його корозійну стійкість. Ступінь покращення зазначених характеристик суттєво залежить від геометричних параметрів армуючих волокон.

Введення в бетон фібрової арматури приводить до збільшення однорідності матеріалу й утворення більш дрібнопористої структури із замкненими порами. Ступінь цього впливу зростає зі зменшенням діаметра фібри і збільшенням їх кількісного вмісту до межі насичення, що визначається можливостями конкретної технології виготовлення фібробетону. Використання ж крупної фібри впливає на порову структуру бетону в значно меншій мірі. Враховуючи, що захисний шар на дисперсній арматурі відсутній, корозійна стійкість волокон у фібробетоні визначається переважно тріщиностійкістю й захисними властивостями дрібнозернистого бетону.

Рядом дослідників не рекомендується використовувати сталеву фібру діаметром понад 0,5 мм, якщо матеріал експлуатується в середовищі, агресивному щодо металу. Підвищення морозостійкості бетону також перебуває в прямій залежності від діаметра використовуваної фібри. В експериментах застосовувалося армування дрібнозернистого бетону відрізками сталевого дроту 0,3×25 мм і 0,7×70 мм. Об'ємний відсоток армування був прийнятий 1...2%. Морозостійкість бетону за рахунок дисперсного армування збільшилася в 7 разів.

Використання сталевібробетону спрощує технологію виготовлення конструкцій: суміщаються в єдиний процес приготування, армування, укладання та ущільнення сталевібробетонної суміші.

Узагальнений досвід застосування сталевібробетону показав, що найефективнішим є використання цього матеріалу в залізобетонних конструкціях для підвищення їх тріщиностійкості, в тонкостінних конструкціях, в спорудах, що працюють на ударні навантаження (хвильорізах, молах, в покриттях аеродромів, автомобільних доріг, фортифікаційних спорудах, в сейсмостійких конструкціях, палях, трубах, резервуарах, які піддаються впливу агресивного середовища).

При значних прольотах і навантаженнях у конструкціях доцільне об'єднання фібрового і стержневого армування, тобто застосування комбінованого армування.

Сталевими, як і неметалічними волокнами, армують, як правило, дрібнозернисті бетони або цементний камінь. Дисперсне армування ефективно запобігає розвитку волосяних тріщин тільки при відстані між волокнами не більше 10...12 мм. Для розрахунку коефіцієнта відстані між волокнами (S) для дисперсно-армованих композитів запропонований ряд формул. Найбільш проста з них наведена нижче:

$$S = \sum V_l / V_f, \quad (6.3)$$

де V_l – об'єм одного волокна; V_f – об'ємний відсоток волокна.

Зі зменшенням значення коефіцієнта S збільшується міцність композитів при розтягу і згині.

Встановлено, що при виробництві сталевібробетонних паль економія бетону досягає 14%, зниження витрат сталі на 10%, трудозатрат на 17%. Застосування сталевібробетону дозволило підвищити тріщиностійкість конструкцій в 1,5 рази. Разом з тим, важливою проблемою при використанні сталевібробетону є можливість утворення так званих “іжаків” та нерівномірного розподілу сталевібробетону, що вимагає необхідності спеціальних пристосувань для рівномірної подачі фібри в бетонну суміш.

Проблему підвищеного “комкування” у структурі бетону сталевібробетону вирішується шляхом застосування фрезерованої

фібри, конфігурація якої, її розміри й технічні характеристики забезпечують її ефективну роботу в дисперсно-армованому бетоні.

Одним з ефективних різновидів мінеральних волокон для дисперсного армування бетонів є **базальтове волокно**. Воно характеризується високою міцністю 1600...3600 МПа. Основними особливостями фібробазальтобетону є його висока міцність при всіх видах напружених станів і здатність витримувати значні деформації в пружному стані. При цьому відносна деформація цементного каменю без утворення тріщин досягає 0,7...0,9%, що в 35-45 разів перевищує граничне видовження неармованого каменю. Значне збільшення деформативності і міцності цементного каменю відбувається за рахунок усунення базальтовими волокнами впливу концентрації напружень в місцях, ослаблених структурними дефектами (раковинами, мікротріщинами). Базальтове волокно хімічно інертне, не вступає в реакцію з солями або фарбниками, тому бетони, армовані базальтовими волокнами, застосовують при будівництві морських споруд, і в архітектурному і декоративному бетонах.

У дорожніх покриттях волокно захищає бетон і арматуру від проникнення агресивних речовин, а також підвищує залишкову міцність і стійкість до заморожування-відтавання, підвищує шорсткість поверхні. Разом з тим, у лужному середовищі тверднучого портландцементу поверхня волокна руйнується з утворенням раковин. Встановлено, що міцність базальтових волокон в лужному середовищі портландцементу може зменшуватися на 5...10% тільки в перші 3...6 місяців, а руйнування поверхні волокон відбувається на глибину не більше 4 мкм. За рахунок утворених раковин міцність зчеплення цементного каменю і волокна збільшується, що зумовлює зростання міцності самого виробу. При використанні волокон діаметром понад 100 мкм їх міцність не змінюється. У зв'язку з цим, при дисперсному армуванні бетону на портландцементях необхідно використовувати модифіковану лугостійку базальтову фібру.

6.2. Вплив сталеві фібри на міцнісні властивості фібробетонів

На даний час запропонована велика кількість видів сталеві фібри, які відрізняються геометричними параметрами та властивостями металу, з якого вони виготовлені. Найпоширенішими є різні види фібри із низьковуглецевої сталі трьох основних типів: пряма, хвилеподібна та анкерна, із загнутими або сплющеними кінцями (рис. 6.1).

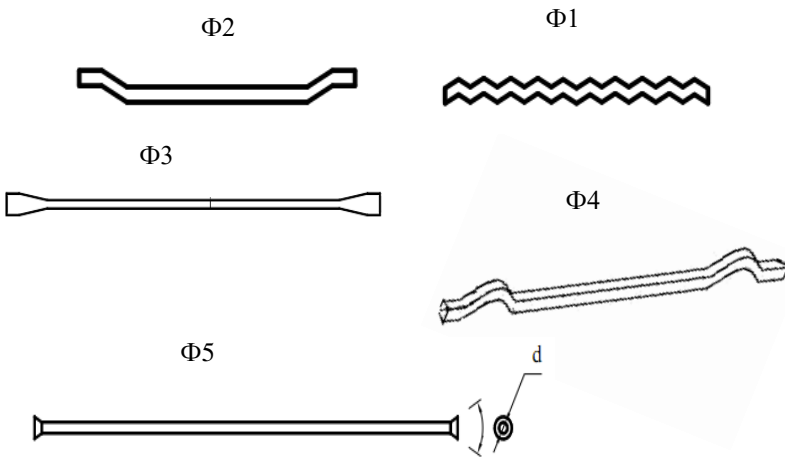


Рис. 6.1. Основні види сталеві фібри

Основні характеристики цих видів фібри наведені в табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Види фібри: основні характеристики

Основні показники	Вид фібри				
	Хвилеподібна Ф1 60/1	Анкерна із загнутими кінцями Ф2 60/1	Анкерна із сплющеними кінцями Ф3 50/1	Анкерна із загнутими кінцями Ф4 33/0,85/0,75	Прямолінійна фібра з анкерами у вигляді конусів Ф5 54/1
Довжина (L), мм	60,0±6,0	60,0±6,0	50±5,0	33,0±3,0	54,0±4,0
Діаметр (d), мм	1,0±0,1	1,0±0,1	1,0±0,1	0,9*	1,0±0,03
$\Lambda=L/d$	60	60	50	37	54
Тимчасовий опір розриву, МПа не менше	1335	1335	1335	1260	1100
Довжина загнутого/ сплющеного кінця, мм	-	5,0 ± 0,1	4,0 ± 0,1	2,5 ± 0,1	2,0 ± 0,1
Висота хвилі/ загнутого кінця, мм	4,5 ± 0,1	5,0 ± 0,1	-	5,0 ± 0,1	-

* Еквівалентний діаметр.

На рис. 6.2-6.4 наведені графічні залежності, що отримані відповідними розрахунками по моделях, які характеризують залежність міцності бетону на розтяг при згині ($f_{c,tf}$) і стиску (f_{cm}) у віці 1, 7 та 28 діб від B/C при використанні різних видів сталеві фібри.

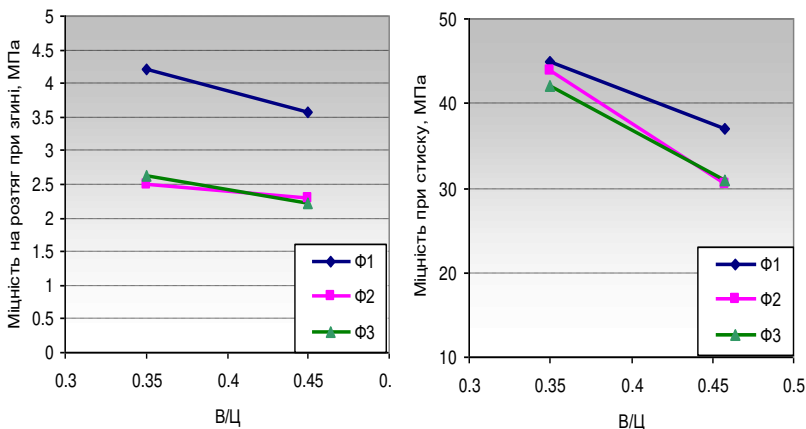


Рис. 6.2. Розрахункові залежності міцності на розтяг при згині та стиску сталевібробетону у віці 1 доба від В/Ц

Аналіз математичних моделей та графічних залежностей дозволяє зробити висновок, що найвищі значення міцності як при стиску і, особливо, при згині досягаються при використанні фібри хвилястого профілю Φ1. Це, очевидно, можна пояснити збільшеною поверхнею зчеплення такої фібри з розчином у порівнянні із анкерною фіброю.

Збільшення водоцементного відношення приводить до зменшення міцності у всі строки, причому більшою мірою міцності при стиску.

Розглядаючи кінетику зростання міцності у часі (рис. 6.5), можна відзначити, що її значення у віці 1 доба складає близько 50% від 28-добового значення, а у віці 7 діб – близько 80%.

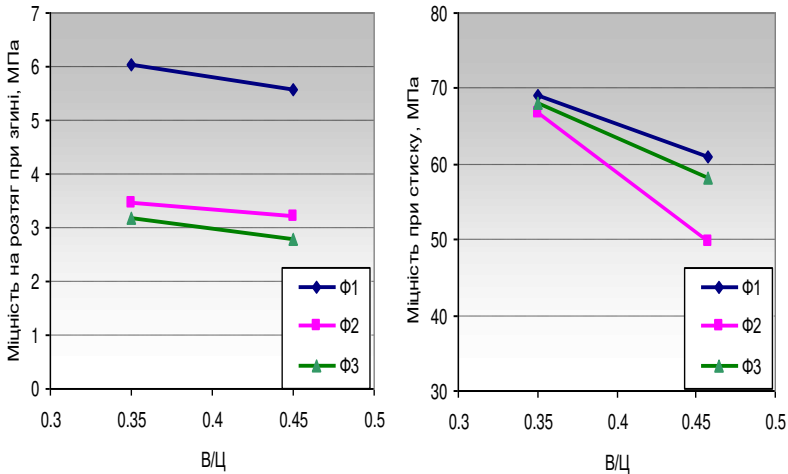


Рис. 6.3. Розрахункові залежності міцності на розтяг при згині та стиску сталевібробетону у віці 7 днів від В/Ц

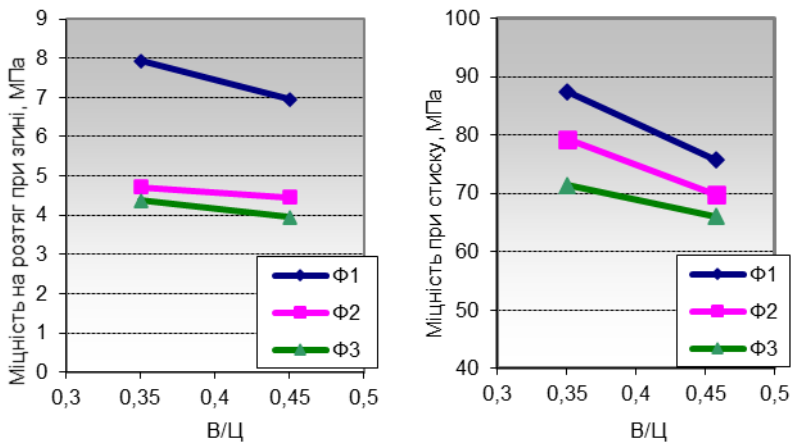


Рис. 6.4. Розрахункові залежності міцності на розтяг при згині та стиску сталевібробетону у віці 28 днів від В/Ц

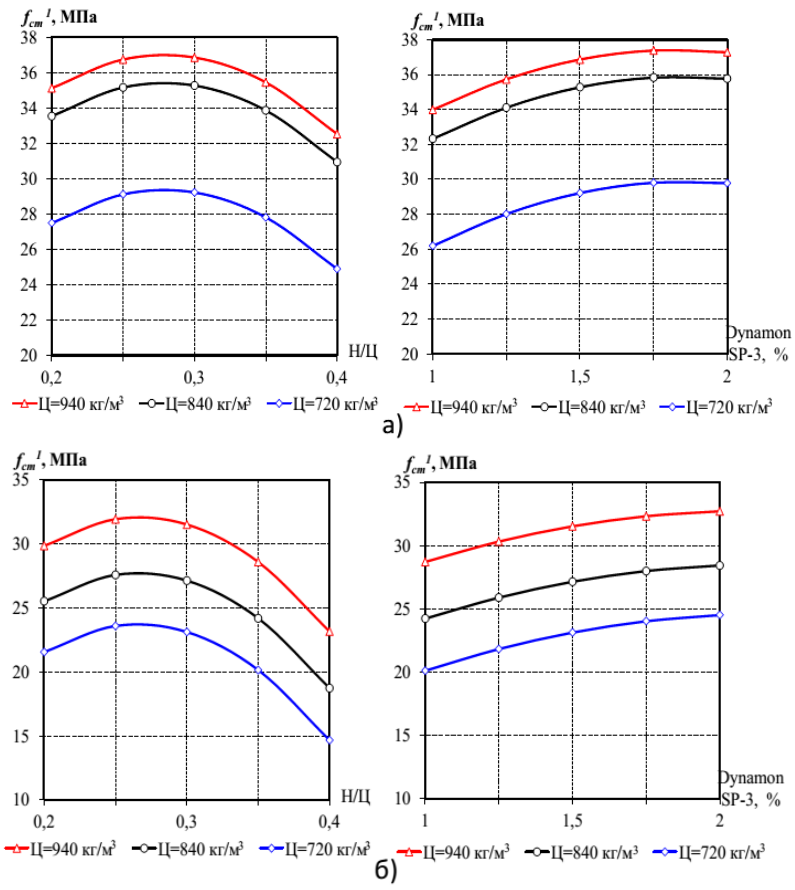


Рис. 6.5. Вплив технологічних факторів на міцність при стиску РПБ у віці 1 доба: а) РПБ із застосуванням золи виносу ТЕС; б) РПБ із застосуванням доменного гранульованого шлаку

Порівняльні діаграми міцності для зразків з використанням всіх видів фібри та без неї наведено на рис. 6.6.

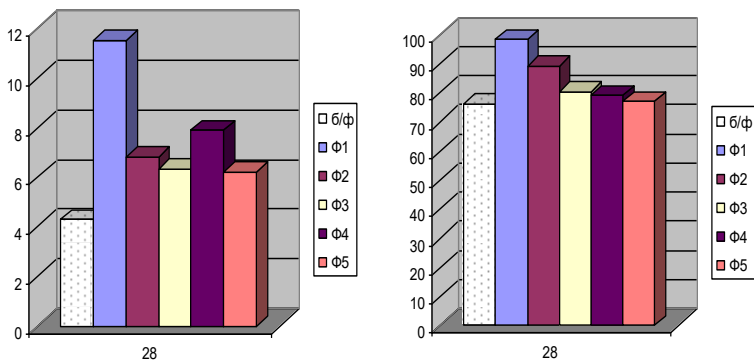


Рис. 6.6. Вплив виду фібри на значення міцності на розтяг при згині та стиску дрібнозернистого сталевібробетону у віці 28 діб ($\mu = 0,5\%$)

б/ф – без фібри

Основний ефект від дисперсного армування бетонів проявляється у збільшенні співвідношення $f_{c,tf}/f_{cm}$. Це можна явно прослідкувати з рис. 6.7, на якому відображені коефіцієнти ефективності дисперсного армування різними видами фібри для дрібнозернистого бетону. За одиницю прийняте співвідношення $f_{c,tf}/f_{cm}$ для дрібнозернистого фібробетону з використанням фібри Ф1. Для всіх видів фібри коефіцієнт ефективності є більший ніж для бетону, не армованого фіброю.

З підвищенням об'ємної концентрації дисперсного армування фізико- механічні характеристики фібробетону зростають до певного рівня, після досягнення якого характеристики починають знижуватись. Тому існує певне співвідношення об'ємів волокна й матриці, при яких фізико-механічні характеристики фібробетону будуть мати максимальне значення.

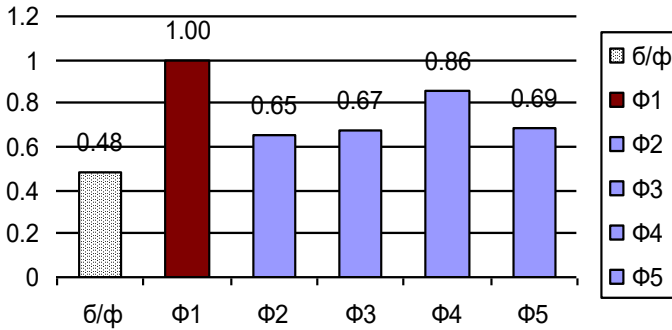


Рис. 6.7. Значення коефіцієнта ефективності підвищення співвідношення $f_{c,tf}/f_{cm}$ дисперсного армування при використанні різних видів фібр для дрібнозернистого бетону

Встановлено, що в інтервалі мінімального й максимального відсотка армування (μ_{\min} – μ_{\max}) має місце характерна точка, що відповідає моменту утворення фіброцементного каркаса (μ_k), до і після якої поведінка композита та його властивості суттєво відрізняються (рис. 6.8).

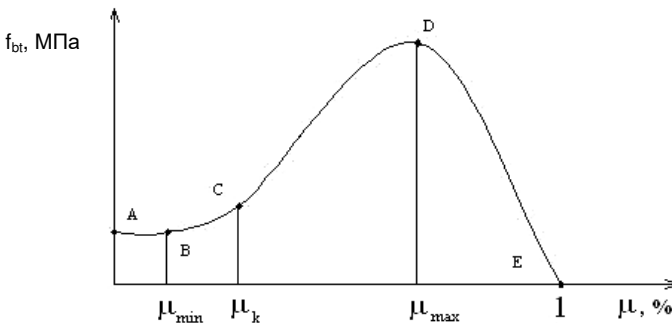


Рис. 6.8. Характер зміни міцності фібробетону залежно від об'ємної концентрації волокон

Ділянка *AB* характеризує фібробетонну суміш, коли волокна віддалені один від одного на значні відстані (“зона розсіяного армування”), міцність фібробетону характеризується

міцністю матриці й практично не відрізняється від неї. Ділянка *BC* характеризує такий стан матеріалу, коли при розтріскуванні матриці волокна здатні сприймати навантаження й забезпечувати несучу здатність фібробетону. Точка *C* є моментом злиття контактних зон “фібра – матриця” і утворення фіброцементного каркаса. На ділянці *CD* має місце подальше, причому більш інтенсивне, підвищення міцності фібробетону, що є результатом ущільнення цементного каменю між волокнами. Точка *D* відповідає максимальній міцності фібробетону.

Згідно отриманих даних збільшення вмісту фібри від 80 до 100 кг/м³ призводить до збільшення міцності на розтяг при згині в середньому на 40%, подальше ж збільшення кількості дисперсної арматури суттєво не впливає на міцність дрібнозернистого сталеві фібробетону на розтяг при згині. Збільшення вмісту дисперсної арматури вище оптимальної концентрації призводить до зниження міцності, що обумовлено зменшенням товщини матричного шару настільки, що матеріал проявляє схильність до розшарування навіть при невеликих навантаженнях.

Особливу увагу потрібно приділяти стадії приготування фібробетону.

Введення фібри в бетонну суміш можна здійснювати двома основними способами.

1. Спочатку готується бетонна суміш, потім у неї поступово вводиться фібра, що супроводжується перемішуванням протягом 3...5 хв. до її рівномірного розподілення в суміші (класичний спосіб).

2. Приготування сухої суміші (заповнювачі, в'язуче, фібра), подача води й добавок у працюючий змішувач, змішування всіх компонентів протягом 3...5хв і вивантаження (сухий спосіб).

Порівняння двох способів приготування фібробетонної суміші показує, що і класичний, і “сухий” способи приготування дають співставні результати з незначним переважанням класичного способу (в основному для високорухомих сумішей).

6.3. Особливості структури, деформативність та морозостійкість фібробетонів

Низький водовміст високоміцних фібробетонних сумішей, інтенсивна гідратація та тверднення обумовлюють відповідні особливості порової структури бетонів.

При вивченні якісних особливостей порової структури бетонів розповсюджений метод, оснований на аналізі кінетики водонасичення. Цей метод оснований на емпірично встановленому взаємозв'язку параметрів експоненціальної функції, що характеризує водопоглинання бетонів в часі з інтегральними та диференціальними параметрами пористості бетону.

Встановлено, що криві, які характеризують зміну водопоглинання важкого бетону по мірі збільшення тривалості тверднення задовільно апроксимуються функціями, що мають наступний загальний вид:

$$W_{\tau} = W_{max} \left[1 - e^{-(\lambda \tau)^{\alpha}} \right], \quad (6.4)$$

де W_{τ} – водопоглинання зразка за час τ ; W_{max} – максимальне водопоглинання; λ – коефіцієнт, що характеризує середній розмір капілярів; α – коефіцієнт однорідності розмірів капілярів.

Для розрахунку коефіцієнтів λ та α залежно від значень W_{τ} , W_{max} та τ в ДСТУ Б В.2.7-170:2008 запропоновані відповідні номограми.

Повний об'єм пор бетону знаходиться за формулою:

$$P_n = \left(\frac{\rho_{\delta} - \rho_0}{\rho_{\delta}} \right), \quad (6.5)$$

де ρ_{δ} – густина подрібненого в порошок бетону, кг/м³;
 ρ_0 – середня густина сухого бетону, кг/м³.

Об'єм відкритих капілярних пор можна знайти за умовою:

$$P_0 = W_0, \quad (6.6)$$

де W_0 – об'ємне водопоглинання зразків, %.

Кінетику водопоглинання визначають шляхом дискретного зважування попередньо висушених зразків в процесі їхнього водопоглинання до постійної маси.

Величину об'ємного водопоглинання розраховують за формулою:

$$W_0 = W_m \rho_0 = \frac{m_{24} - m_0}{m_{24} - m_{24}^6}, \quad (6.7)$$

де W_m – водопоглинання по масі, m_0 та m_{24} – маса зразка до занурення у воду та через 24 год. після занурення, визначена на повітрі, m_{24}^6 – маса зразка через 24 год. після занурення у воду, ρ_0 – середня густина зразка бетону.

Розрахункові та експериментальні значення параметрів порової структури сталевібробетонів приведені в табл. 6.3, 6.4, кінетика зміни його водопоглинання – на рис. 6.9

Таблиця 6.3

Склади фібробетонних бетонних сумішей

№	В/Ц	Витрата основних компонентів, кг/м ³				Фібра, кг/м ³	Вид та вміст пластифікатора, %
		Вода	Цемент	Пісок	Щебінь		
Важкий фібробетон							
1	0,46	230	500	655	1252	–	–
2	0,48	238	500	655	1252	60	–
3	0,36	178	500	655	1252	60	C-3 (1%)
4	0,27	135	500	655	1252	60	Melflux (0,5%)
Дрібнозернистий фібробетон							
5	0,53	263	500	837	1023	–	–
6	0,50	248	500	837	1023	100	-
7	0,38	188	500	837	1023	100	C-3 (1%)
8	0,32	161	500	837	1023	100	Melflux (0,5%)

Аналіз даних, приведених в табл. 6.4 і на рис. 6.9 показує, що як варто було очікувати, зменшення водовмісту та водоцементного відношення бетонних сумішей призвело до суттєвого зменшення водопоглинання як характеристики відкритої капілярної пористості.

Теоретично цей висновок слідує з аналізу формули капілярної пористості бетону:

$$P_{\text{kap}}^{\beta} = \frac{B - 0,5\alpha C}{1000}, \quad (6.8)$$

де α – ступінь гідратації цементу, C – витрата цементу, кг/м^3 .

Спостерігається також чітка кореляція вказаних вище характеристик та параметрів порової структури λ та α . Зменшення показника середнього розміру пор супроводжується зростанням впорядкованості структури, про що свідчить збільшення величини α .

Кінетику росту водопоглинання для всіх видів бетону можна описати логарифмічними залежностями. Дрібнозернистий фібробетон володіє дещо меншими показниками середнього розміру пор λ при практично однакових значеннях показників однорідності (табл. 6.4).

Особливості порової структури, склад та структура цементного каменю, його об'ємна концентрація відображаються на деформативних властивостях бетонів. Г.К. Пауерсом було показано, що модуль пружності цементного каменю E_{κ} пов'язаний з об'ємом пор виразом:

$$E_{\kappa} = (1 - V_n)^3 E_{\text{г.к.}}, \quad (6.9)$$

де $E_{\text{г.к.}}$ – модуль пружності гелево-кристалічної фази цементного каменю.

Розрахункові значення модулів пружності сталеві фібробетонів E_{fb} можна визначати, виходячи з передумови, що вони пропорційні вмісту в них матриці й сталевій фібри (за об'ємом) з відповідними їм модулями пружності:

$$E_{fb} = E_b (1 - \mu_{fv} 10^{-3}) + E_s \mu_{fv} 10^{-3}, \quad (6.10)$$

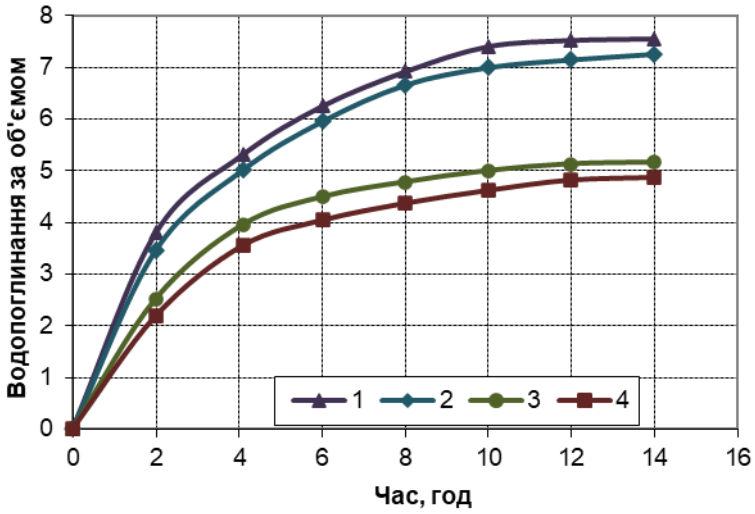
де E_b – модуль пружності бетону, E_s – модуль пружності сталеві фібри, μ_{fv} – об'ємний вміст фібри.

Таблиця 6.4

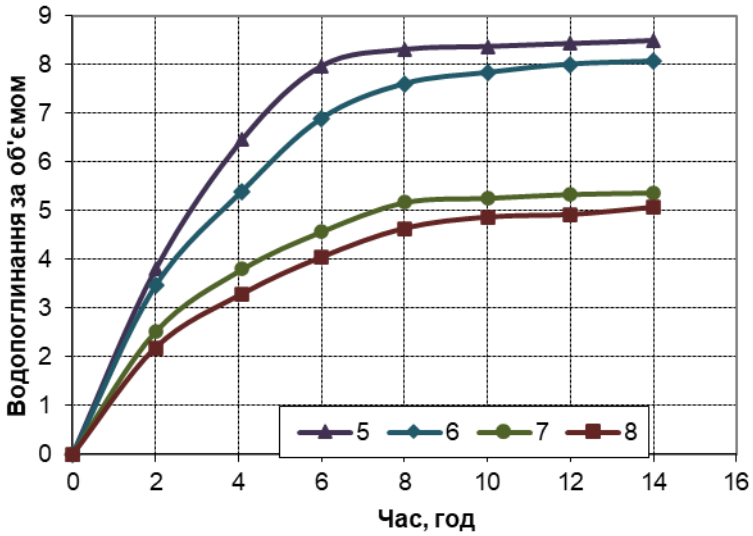
Параметри порової структури бетонів

№ складів	Водоцементне відношення	Водовміст, кг/м ³	Загальна пористість, % (I_{0})	Відкрита капілярна пористість, % (W_{0})	Показник середнього розміру пор λ	Показник однорідності пор α	Фібра, кг/м ³	Вид та вміст пластифікатора, %
Важкий бетон								
1	0,46	230	11,6	7,5	1,61	0,78	-	-
2	0,48	238	11,8	7,4	1,55	0,81	60	-
3	0,36	178	9,7	5,1	1,46	0,85	60	C-3 (1%)
4	0,27	135	9,9	4,9	1,41	0,88	60	Melflux (0,5%)
Дрібнозернистий бетон								
5	0,53	263	12,4	8,5	1,65	0,75	-	-
6	0,50	248	12,1	8,1	1,53	0,82	100	-
7	0,38	188	9,3	5,5	1,43	0,87	100	C-3 (1%)
8	0,32	161	9,5	5,3	1,39	0,89	100	Melflux (0,5%)

Примітки: 1. Номери складів бетону відповідають табл. 6.3.;
2. Температура води при випробуванні бетону на водопоглинання $t=20^{\circ}\text{C}$.



а



б

Рис. 6.9. Кінетика зміни водопоглинання важких (а) та дрібнозернистих (б) бетонів (номери кривих відповідають складам, приведеним в табл. 6.3

Модуль пружності бетонів тісно пов'язаний з його деформативністю та відповідно з тріщиностійкістю. Для характеристики деформативності бетонів запропоновані різні критерії. Одним з найбільш простих є відношення границі міцності при розтягу або згині до величини статистичного або динамічного модуля пружності ($E_{дин}$). Експериментально показано, що відношення міцності бетону на розтяг при розколюванні ($f_{c.m.}$) до $E_{дин}$, так звана “умовна розтяжність”, близько до величини граничної деформації при розтягу, пряме визначення якої достатньо трудомістке. Співвідношення між значеннями E_{σ} та $E_{дин}$ для бетонів знаходиться в інтервалі 0,87-0,95. Менші значення $E_{\sigma}/E_{дин}$ характерні для бетонів з границею міцності при стиску менше 25 МПа.

Враховуючи високий рівень кореляції модуля пружності бетону з міцністю при стиску для оцінки деформативності та тріщиностійкості бетону може бути використано і безпосередньо відношення міцності бетону на розтяг до міцності на стиск ($f_{c,t}/f_{cm}$).

Це відношення, як відомо, збільшується по мірі підвищення однорідності структури бетону і зменшення кількості різних дефектів, що сприяють концентрації напружень. Суттєво зростає це співвідношення для фібробетонів із дисперсним армуванням. Всі фактори, що сприяють зчепленню цементного каменю із заповнювачами та фіброю, найбільш сильно впливають на міцність фібробетону при розтягу.

Тріщиностійкість бетонів і фібробетонів в значній мірі визначається також усадочними деформаціями. А.Е. Десов запропонував як один з критеріїв тріщиностійкості цементного каменю так званий модуль T :

$$T = f_p / \varepsilon_{yc}, \quad (6.11)$$

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

Модуль T при співставних витратах цементного тіста та незмінних заповнювачах може слугувати, очевидно, і для порівняльної характеристики тріщиностійкості бетонів.

На усадці бетонів позначаються багаточисленні фактори,

вирішальним з яких є витрата води. При незмінній витраті води в суміші величина ε_{yc} мало залежить від витрати цементу та C/W . В той же час відома позитивна роль дисперсного армування структури бетону в плані зменшення усадочних деформацій.

Значення усадочних деформацій і модуля тріщиностійкості бетонів і фібробетонів для складів, вказаних у табл. 6.3, наведені у табл. 6.5.

Таблиця 6.5

Значення усадочних деформацій ε_{yc} і модуля тріщиностійкості бетонів

№ п.п. складів бетону	Значення ε_{yc} та модуля Т для бетонів у віці					
	28 діб			90 діб		
	ε_{yc}	f_p , МПа	f_p/ε_{yc}	ε_{yc}	f_p , МПа	f_p/ε_{yc}
1	6,2	3,5	0,56	6,5	3,6	0,55
2	5,8	7,9	1,36	6,2	7,9	1,27
3	5,5	10,8	1,97	5,7	11	1,93
4	4,4	12,1	2,75	4,6	12,4	2,70
5	7,2	4,6	0,64	7,8	4,4	0,56
6	7,06	11,6	1,64	7,45	11,7	1,57
7	5,95	14,3	2,40	6,25	14,5	2,32
8	5,00	16,2	3,24	5,2	16,3	3,13

Граничні усадочні деформації бетонів, що досягаються до 60-добового віку (рис. 6.10) в залежності від складу коливається в інтервалі від 5,2 до 7,8 ($\times 10^{-4}$). Найбільш низькі значення усадки характерні для важкого фібробетону з крупністю заповнювача до 20 мм, з мінімальним вмістом води (135 л/м³), і суперпластифікатора. При постійному водовмісті усадочні деформації дещо збільшуються із збільшенням суперпластифікатора. До 7 добового віку усадка сягає до 30-40% граничних значень, 28 діб – 50%, 90 діб – 85-95%.

Залежно від типу фібри й відсотку армування деформації усадки сталеві фібробетонів можуть бути як рівні, так і більше або менше деформацій бетонної матриці.

Зменшення усадочних деформацій має місце при підвищеному вмісті фібри.

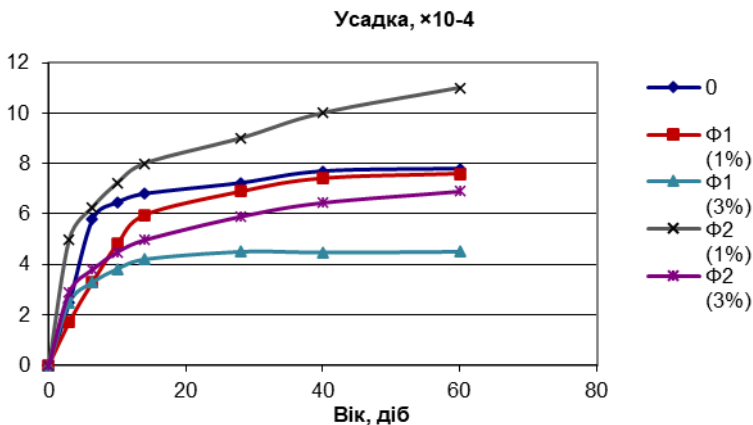


Рис. 6.10. Криві усадочних деформацій дрібнозернистого фібробетону із вмістом фібри з використанням фібри типу Ф1 та Ф2

У табл. 6.5 приведені для досліджуваних складів бетонів та фібробетонів значення усадочних деформацій і модуля тріщиностійкості у віці 28 та 60 діб, з яких слідує, що всі склади з мінімальною величиною ε_{yc} , мають максимальне значення модуля Т.

Відповідно до сучасних уявлень бетонознавства морозостійкість бетону визначається комплексом факторів, і в першу чергу, їхньою капілярною пористістю, а також співвідношенням об'ємів відкритих капілярних та закритих повітряних пор. Суттєве значення поряд з хіміко-мінералогічним складом цементного клінкера має вид і вміст мінеральних добавок. Для фібробетонів, разом з тим, велике значення має характер і вид дисперсного армування. Фіброві волокна, підвищуючи міцність на розтяг бетону, дозволяють краще протидіяти напруженням, що виникають в процесі замерзання води в капілярах.

Для сталеві фібробетонів характерними є достатньо високі значення морозостійкості, на що впливають як характеристик порової структури бетону, так і характер і ступінь дисперсного

армування. Значення марки за морозостійкості для таких бетонів зазвичай коливаються від F100 до F600, а для високоміцних бетонів може досягати F1000 і більше.

Як критерій морозостійкості може використовуватися коефіцієнт морозостійкості K_F , який представляє собою відношення міцності при стиску основних зразків через певну кількість циклів перемінного заморожування і відтавання та міцності контрольних зразків. В табл. 6.6 представлені число циклів, що відповідає марці a_s , h_j , t_{njysd} за морозостійкістю та значення коефіцієнта морозостійкості.

Таблиця 6.6

№	B/C	Фібра, кг/м ³	Вид та вміст пласти- фікатора, %	Число циклів за третім методом	Марка за моро- зостійкістю	Коефіцієнт моро- зостійкості
Важкий фібробетон						
1	0,46	–	–	8	300	0,95
2	0,48	60	–	15	500	0,98
3	0,36	60	C-3 (1%)	19	600	0,94
4	0,27	60	Melflux (0,5%)	27	800	1,01
Дрібнозернистий фібробетон						
5	0,53	–	–	8	300	0,96
6	0,50	100	-	15	500	0,98
7	0,38	100	C-3 (1%)	19	600	0,96
8	0,32	100	Melflux (0,5%)	27	800	0,99

6.4. Вплив орієнтування сталеві фібри на міцність фібробетону

Створення орієнтованої структури фібри в сталеві фібробетоні, при якій фібра спрямована уздовж діючих у виробі розтягуючих навантажень є важливою технічною і науковою задачею. Така орієнтація дозволяє підвищити міцність при розтягуванні в 2-4 рази. На даний момент існує ряд способів створення орієнтованої структури фібри, більшість з яких, в залежності від використаних методів можна звести до наступних: стиснення фібри опалубкою, роликів пресування, роздільне, пошарове укладання фібри і бетонної суміші, механічна орієнтація фібри, що досягається пропусканням суміші через спеціальні сітки, набрызк фібри в суміш з великою швидкістю, інтенсивне вібрування суміші, при якому фібра займає горизонтальне положення, формування виробів при дії магнітного поля.

Ф.Н. Рабиновичем відзначено, що при вібрації сталеві фібробетонної суміші фібра повинна займати горизонтальне положення. Однак, проведені дослідження показали, що при тривалій інтенсивній вібрації відбувається розшарування сталеві фібробетонної суміші, внаслідок чого фібра опускаються в нижню частину виробу. Таким чином, даним способом орієнтації потрібно користуватися з певною обережністю. Рекомендується при виготовленні тонкостінних конструкцій (менш 2 см) використовувати набрызг фібробетонної суміші, який дозволяє здійснювати спрямований розподіл волокон, а при товщині 3-5 см – застосовувати звичайні методи формування. Запатентовано спосіб набрызгу фібри з високою швидкістю під кутом до бетонної суміші. Однак, такі способи пов'язані із застосуванням унікального дорогого устаткування і вимагають модернізації всього технологічного процесу.

Дослідженнями встановлено позитивний вплив на фізико-механічні характеристики фібробетону орієнтування сталеві фібри перпендикулярно робочому навантаженню, яке досягається віброущільненням високорухомих бетонних сумішей та підсилюється при дії магнітного поля (рис. 6.11).

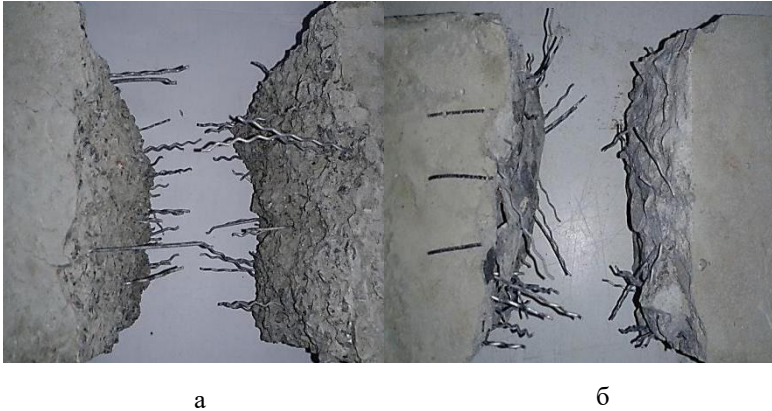


Рис. 6.11. Вигляд перерізу зруйнованого зразка із орієнтованою (а) та не орієнтованою (б) фіброю

Момент сили, що необхідний для орієнтування фібри в суміші розраховують за формулою:

$$M = \tau_0 \times d \times l^2 / 6, \quad (6.12)$$

де d – діаметр фібри, l – довжина фібри, τ_0 – граничне напруження зсуву суміші.

Потужність, яка поглинається сталевібробетонною сумішшю при вібруванні під дією магнітного поля залежить від циклічної характеристики поля (ω), коефіцієнту армування (μ), середньої густини суміші (ρ) та її в'язкості (η), насиченої намагніченості сталі (J):

$$W = \frac{\rho (BJd^2) \mu \omega}{2\pi (ln)^2}. \quad (6.13)$$

Граничне напруження зсуву (τ_0) і в'язкість суміші (η) знижуються при збільшенні її рухомості.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що збільшення рухомості бетонної суміші, при всіх інших рівних умовах, призводить до збільшення міцності при згині дрібнозернистого сталевібробетону в середньому на 40%, що пов'язано із збільшенням кількості фібри розташованої перпендикулярно робочому навантаженню при випробуваннях.

Також до деякого підсилення ефекту орієнтування сталльної фібри призводить формування виробів шляхом віброущільнення при дії магнітного поля. При цьому приріст міцності складає в середньому 5-10%, проте ключовим фактором залишається саме рухомість бетонної суміші (табл. 6.7).

Таблиця 6.7

Вплив орієнтування фібри на міцнісні характеристики дрібнозернистого сталєфібробетону з вмістом фібри 60 кг/м³

№	В/Ц	Рухомість суміші (OK), см	Міцність на розтяг при згині у віці 1 доба $f_{c.tf}^1$, МПа		Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб $f_{c.tf}^7$, МПа		Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб $f_{c.tf}^{28}$, МПа	
			Без магнітного поля	З магнітним полем	Без магнітного поля	З магнітним полем	Без магнітного поля	З магнітним полем
			1	0,30	7	4,17	4,54	6,94
2	0,30	14	4,56	4,97	7,60	8,33	9,58	10,25
3	0,30	21	5,79	6,31	9,65	10,58	12,17	13,02

6.6. Реакційно-порошкові бетони із композиційним дисперсним армуванням

Ступінь позитивних змін властивостей бетону при його дисперсному армуванні і характеристик конструкцій на його основі головним чином визначається видом і властивостями використовуваних волокон, співвідношенням і ступенем взаємодії між ними. Тісний взаємозв'язок армуючих волокон з бетонною матрицею, крім її власної активності, забезпечується величиною поверхні розділу, яка, в свою чергу, залежить від ступеня насичення бетону волокнами, їх геометричних характеристик і поверхневої енергії.

Таблиця 6.8

Вплив орієнтування фібри на міцнісні характеристики дрібнозернистого сталевібробетону з вмістом фібри 100 кг/м³

№	В/Ц	Рухомість суміші (ОК), см	Міцність на розтяг при згині у віці 1 доба $f_{c,tf}^1$, МПа		Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб $f_{c,tf}^7$, МПа		Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб $f_{c,tf}^{28}$, МПа	
			Без магнітного поля	З магнітним полем	Без магнітного поля	З магнітним полем	Без магнітного поля	З магнітним полем
1	0,30	7	5,94	6,29	11,95	12,43	13,91	14,60
2	0,30	14	6,25	6,62	12,57	13,07	14,63	15,37
3	0,30	21	8,37	8,87	16,85	17,52	19,61	20,59

З теоретичних передумов, можна припустити, що найбільшого позитивного ефекту в плані покращення структури і властивостей вібробетонів можна досягти в результаті композиційного дисперсного армування при оптимальному поєднанні двох і більше видів фібр різного складу, з різними розмірами, міцністю і пружно-пластичними характеристиками. Метою композиційного армування є створення такого матеріалу, який зберігаючи позитивні особливості, виключав би недоліки, що мають місце у варіанті моноармування.

Перевагами композиційного дисперсного армування (поліармування) можуть бути:

- забезпечення більшої однорідності структури вібробетону, що в свою чергу створює передумови для досягнення більших значень міцності, ніж у випадку моноармування;
- уникнення або суттєве зменшення розшарування вібробетонної суміші в процесі її приготування, транспортування та укладання;
- цілеспрямоване регулювання комплексу фізико-механічних властивостей вібробетону в більш широких межах, ніж при моноармуванні;

- можливість покращення показників довговічності та експлуатаційних характеристик фібробетону.

Для визначення властивостей полідисперсноармованого реакційно-порошкового фібро бетону (РПФБ) у НУВГП були виконані необхідні експерименти. Для виготовлення зразків застосовували суміш з В/Ц=0,27. Необхідна рухомість суміші 23...25 см досягалася за рахунок введення добавки суперпластифікатора Дупатон SP3.

Використовували сталеву мікрофібру Ф5 в кількостях 120 і 200 кг/м³ бетону. Для отримання поліармованої композиції використовували базальтову фібру довжиною 12 і 24 мм та поліпропіленову фібру довжиною 12 та 18 мм. При цьому вміст базальтової фібри змінювався в межах від 0 до 6 кг/м³, а поліпропіленової – від 0 до 2 кг/м³.

В табл. 6.8 представлені результати визначення міцності РПФБ на основі сталевोї та базальтової фібри при різних комбінаціях полідисперсного армування.

Як слідує з даних табл. 6.9, введення базальтової фібри позитивно впливає перш за все на міцність на розтяг при згині. Міцність $f_{c,tf}$ РПФБ контрольного складу при витраті сталевої фібри 120 кг/м³ становила 21,6 МПа, а максимальне її значення для композиційного фібробетону з базальтовою фіброю становило 26,0 МПа (при витраті 4 кг/м³ та довжині волокон 12 мм). Середнє збільшення міцності на розтяг при згині в залежності від довжини волокна та його вмісту склало від 7 до 20%.

При витраті сталевої фібри 200 кг/м³ міцність $f_{c,tf}$ фібробетону контрольного складу склала 27,9 МПа, а максимальне її значення для композиційного фібробетону становило 31,3 МПа (при витраті базальтової фібри 4 кг/м³ та довжині волокон 12 мм). Таким чином, максимальне зростання міцності склало 12%. Менше зростання міцності в цьому випадку очевидно можна пояснити досягненням значень загального об'ємного вмісту волокон, що відповідає максимально можливому.

Таблиця 6.9

Міцність фіробетонних зразків з різним вмістом та співвідношенням сталевोї та базальтової фібри

Витрата сталевої фібри, кг/м ³	Витрата базальтової фібри, кг/м ³	Загальний вміст волокон за об'ємом, μ , %	Частка базальтової фібри в загальному об'ємі армування n	Міцність при стиску у віці 7 діб f_{cm}^7 , МПа	Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб $f_{c,tf}^7$, МПа
Базальтова фібра ($l = 12$ мм)					
120	0	1,54	0,00	96,8	21,6
	2	1,61	0,05	97,8	25,4
	4	1,69	0,09	100,7	26,0
	6	1,76	0,13	99,3	21,4
200	0	2,56	0,00	113,6	27,9
	2	2,64	0,03	113,1	31,1
	4	2,72	0,06	117,6	31,3
	6	2,79	0,08	111,2	24,2
Базальтова фібра ($l = 24$ мм)					
120	0	1,54	0,00	96,8	21,6
	2	1,61	0,05	100,8	23,1
	4	1,69	0,09	94,7	20,2
	6	1,76	0,13	94,2	13,7
200	0	2,56	0,00	113,6	27,9
	2	2,64	0,03	116,6	28,2
	4	2,72	0,06	107,3	25,1
	6	2,79	0,08	104,9	16,6

Використання базальтової фібри з довжиною волокон 24 мм в цілому показало гірші результати. Зафіксоване збільшення $f_{c,tf}^7$ на 7% лише при вмісті цих волокон 2 кг/м³ (при витраті сталевोї

фібри 120 кг/м³). При збільшенні вмісту базальтової фібри зафіксоване максимальне падіння міцності на 40%.

Зменшення міцності фібробетону, що спостерігається при збільшенні довжини використовуваних волокон обумовлено, ймовірно, зменшенням процентного вмісту волокна в площині перетину руйнування і зниженням міцності зчеплення на границі «волокно - цементна матриця». Крім того, волокна довжиною 24 мм гірше розподіляються в масиві фібробетону, що позначається в подальшому на особливостях його структури.

Аналіз характеру руйнування композиційного РПФБ, армованого базальтовими волокнами довжиною 12 мм, свідчить, що руйнування бетону відбувається з участю волокон в роботі цементної матриці.

Розглядаючи вплив частки базальтової фібри в загальному об'ємі армування (рис. 6.12) варто відзначити, що її оптимальний вміст складає 2 кг/м³ ($n=0.07$) при витраті сталевих фібри 120 кг/м³ і 2...4 кг/м³ ($n=0.05...0.09$) при витраті сталевих фібри 200 кг/м³. Подальше збільшення вмісту базальтової фібри призводить до збільшення питомої поверхні дисперсної арматури, що в свою чергу обумовлює збільшення кількості води, необхідної для отримання бетонних сумішей із заданою рухомістю.

Міцність при стиску композиційних РПФБ, очікувано мало залежить від вмісту базальтової фібри. Для різних композицій зафіксоване коливання значення міцності в середньому в межах 2...3%.

Для порівняння результатів, одержаних при використанні базальтової фібри були проведені досліди з використанням поліпропіленової фібри, яка входить до групи низькомодульних волокон. Як видно з результатів, наведених в табл. 6.10, при різних комбінаціях витрат сталевих та поліпропіленових фібри в цілому спостерігається погіршення значень міцності на розтяг при згині у порівнянні із контрольними зразками. Лише при використанні поліпропіленової фібри довжиною 12 мм та її вмісті 1 кг/м³ зниження міцності $f_{c,tf}$ ⁷ композиційного РПФБ майже не спостерігалось. В усіх інших випадках введення до складу композиції поліпропіленової фібри погіршувало значення міцності на розтяг при згині в середньому від 5 до 40%.

Міцність при стиску практично не змінювалась при різних варіантах композицій у досліджуваних межах.

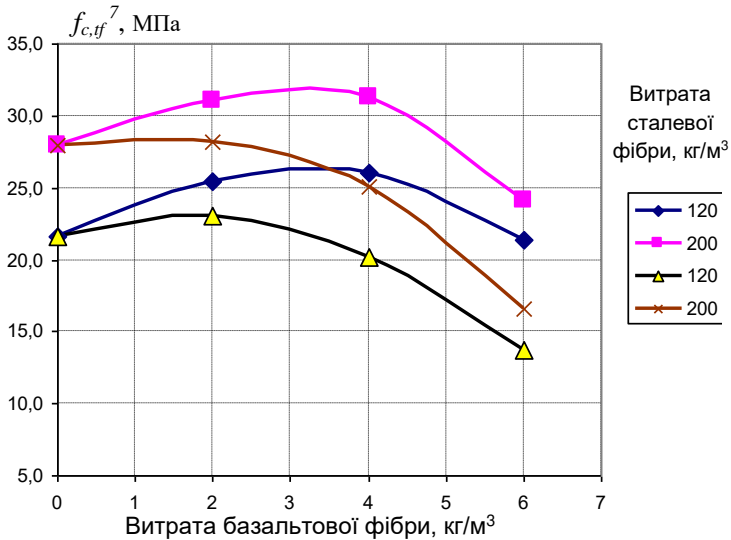


Рис. 6.12. Залежності міцності на розтяг при згині полідисперсно армованих РПФБ

Аналізуючи отримані результати, наведені в табл. 6.9 і 6.10 можна зробити висновок, що використання в якості компонента композиційного армування поліпропіленової фібри дає дещо гірший ефект у порівнянні з базальтовими волокнами. Це в першу чергу можна пов'язати із гіршим розподіленням в структурі бетону поліпропіленових волокон, що не сприяє рівномірному розподіленню сталевих волокон. Дослідження структури зруйнованих зразків фібробетонів з використанням поліпропіленової фібри показало ознаки її неоднорідності, в окремих зонах спостерігались комки волокон, такі суміші при приготуванні та формуванні були більше схильні до розшарування. Також огляд характеру руйнування зразків композиційного РПФБ із поліпропіленовою фіброю вказував на гіршу адгезію поліпропілену з цементною матрицею, внаслідок

чого при руйнуванні зразків спостерігалось висмикування окремих волокон.

Таблиця 6.10

Міцність зразків РПФБ з різним вмістом та співвідношенням сталеві та поліпропіленові фібри

Витрата сталеві фібри, кг/м ³	Витрата поліпропіленові фібри, кг/м ³	Загальний вміст волокон за об'ємом, μ , %	Частка поліпропіленові фібри в загальному об'ємі армування n	Міцність при стиску у віці 7 діб f_{cm}^7 , МПа	Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб f_{ctf}^7 , МПа
Поліпропіленова фібра ($l = 12$ мм)					
80	0	1,03	0,00	96,8	21,6
	1	1,14	0,10	96,3	21,2
	2	1,25	0,18	96,9	19,7
120	0	1,54	0,00	100,2	27,9
	1	1,65	0,07	102,3	26,7
	2	1,76	0,13	101,0	25,4
Поліпропіленова фібра ($l = 18$ мм)					
80	0	1,03	0,00	96,8	21,6
	1	1,14	0,03	94,8	20,6
	2	1,25	0,06	94,4	18,1
120	0	1,54	0,00	100,2	27,9
	1	1,65	0,07	101,0	22,3
	2	1,76	0,13	98,9	16,4

Всі вказані вище недоліки були практично відсутні у випадку використання базальтової фібри для композиційного дисперсного армування. Очевидно, що базальтова фібра, яка за густиною та пружними характеристиками ближча до бетонної матриці ніж поліпропіленова, при оптимальній витраті та співвідношенні із сталеві фіброю утворює своєрідний несучий каркас, який утримує сталеві фібру, попереджає розшарування суміші та сприяє рівномірному розподіленню дисперсної арматури в структурі бетону. Все це, відповідно, позначається на міцнісних характеристиках фібробетонів.

6.7. Реакційно-порошкові бетони з дисперсним армуванням сталевими сітками

Збільшення значень деформативних властивостей бетону, а саме границі міцності на розтяг при згині та граничних деформацій бетону можна досягнути, якщо використовувати в якості дисперсного армуючого компонента, сталеві сітки, які розташовують в бетоні перпендикулярно діючим навантаженням (паралельно виникаючим розтягуючим напруженням).

Використовували реакційно-порошковий бетон наступного складу, кг/м³: портландцемент ПЦ 500 I – 700; мелений пісок ($S_{\text{пит}}=250$ кг/м²) – 360; пісок (0,16...1,25 мм) – 1130; СП Дунамон SP3 – 1,5%. В/Ц суміші склав 0,28, рухомість 25 см. В якості дисперсного армуючого компонента (аналога фібри) використовували сталеві сітки, виготовлені із сталі Ст.3 із квадратними комірками діаметром стержнів 0,8 мм та кроком 10 мм. У форму для зразка розміром 16×9×4 см укладали 10 сіток з відстанями між ними 4 мм. Далі виготовляли бетонну суміш для реакційно-порошкового бетону класу В80 і укладали її у форму. Заформований зразок твердів в нормальних умовах протягом 28 діб. Після цього зразок піддавали випробуванню на розтяг при згині за трьохточковою схемою (рис. 6.13).

За результатами випробування побудована діаграма навантаження – деформація (рис. 6.14). Як видно, на діаграмі спостерігається суттєво виражене "плато" сталості навантаження при постійному зростанні деформації (прогину). Очевидно, це свідчить про наявність високих деформативно-пластичних властивостей у випробуваного зразка.

Для оцінки отриманого результату було виготовлено зразки аналогічних розмірів на РПБ та дрібнозернистому бетоні ДЗБ, а також з різним вмістом сіток і сталеві фібри (табл. 6.11).



Рис. 6.13. Випробування зразків на розтяг при згині за триточковою схемою

Таблиця 6.11

Дисперсне армування досліджуваних зразків

Зразки (маркування)	РПБ	ДЗБ	С-3	С-5	С-10	Ф	ФД	С-5Ф
Бетон (матриця)*	РПБ	ДЗБ	РПБ	РПБ	РПБ	РПБ	ДЗБ	РПБ
К-сть сіток	–	–	3	5	10	–	–	5
Вміст сталі сіток, кг/м ³	–	–	46	70	140	–	–	–
Вміст сталеві фібри, кг/м ³	–	–	–	–	–	140	140	70

* ДЗБ – дрібнозернистий бетон; РПБ – реакційно-порошковий бетон

Як показали результати випробувань, зразки без дисперсної арматури (рис. 6.15) показали досить низькі значення

граничних деформацій (близько 0,6 мм, з деякою перевагою реакційно-порошкового бетону). Характер руйнування – крихкий, що відображено майже прямими лініями на діаграмі та спостерігалось візуально під час випробування.

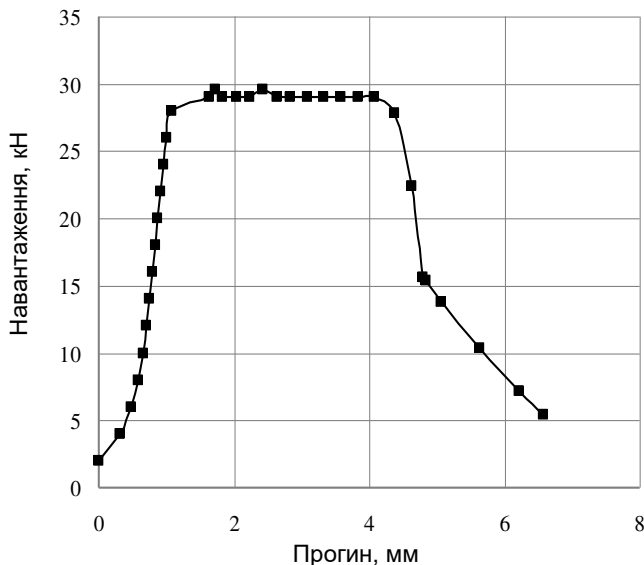


Рис. 6.14. Діаграма навантаження-деформація для зразка РПБ з 10 сітками

Введення до складу реакційно-порошкового та дрібнозернистого бетонів сталеві фібри призводить до очікуваного зростання міцності на розтяг при згині, але головне – з'являються низхідні гілки на кривих деформацій (рис. 6.16). Це свідчить про покращення деформативних властивостей бетонів за рахунок дисперсного армування фіброю.

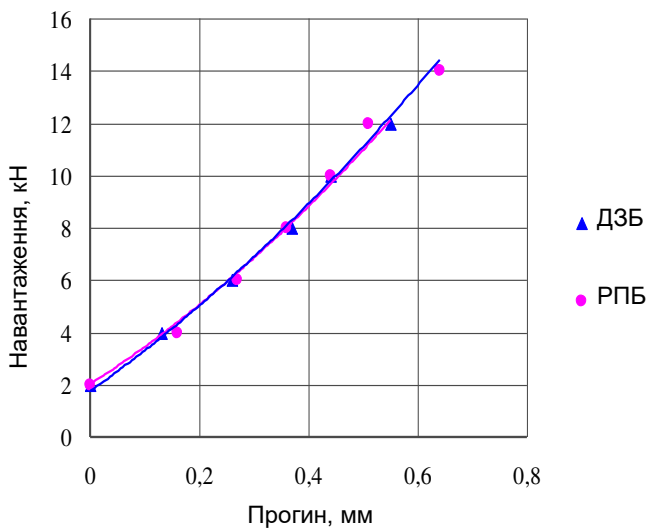


Рис. 6.15. Діаграма навантаження-деформація для зразків з дрібнозернистого та реакційно-порошкового бетону

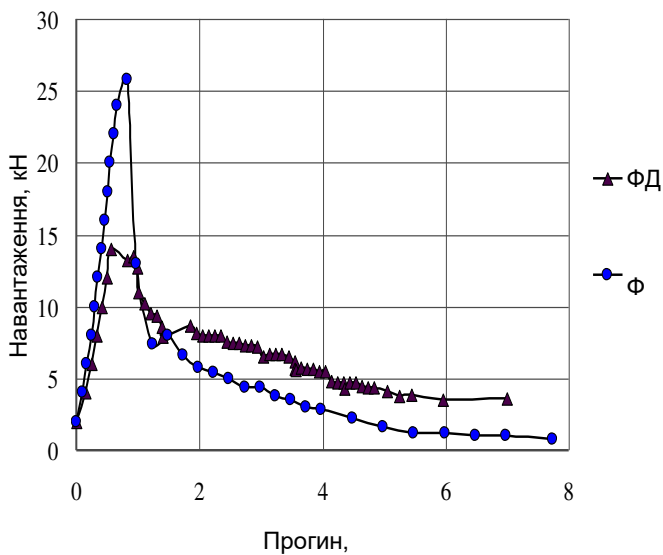


Рис. 6.16. Діаграма навантаження-деформація для зразків з дрібнозернистого та реакційно-порошкового фібробетону

Найкращі результати в плані забезпечення високих деформативних властивостей бетонів показали зразки, що містили в собі арматуру у вигляді сіток (рис. 6.17). Максимальне руйнуюче навантаження зафіксовано у зразка, що містив 10 сіток і для нього ж характерне яскраво виражене "плато" сталості навантаження при постійному зростанні деформації.

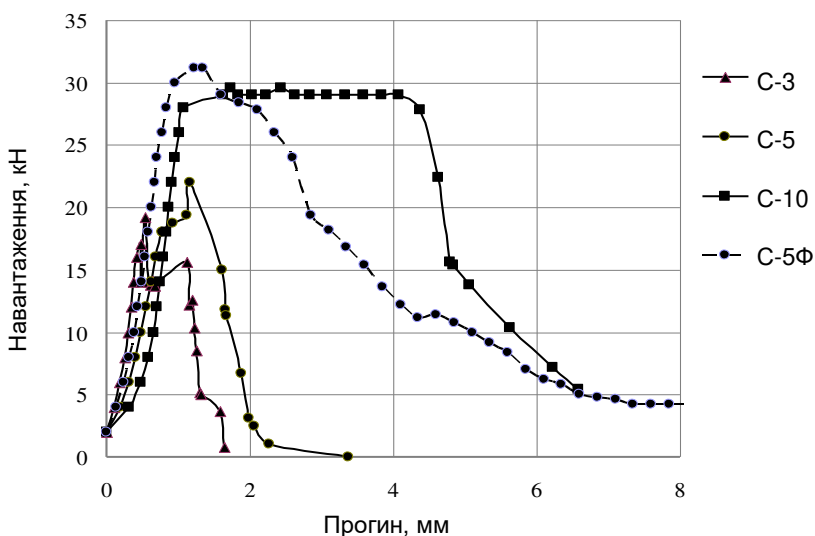


Рис. 6.17. Діаграманавантаження-деформація для зразків РПБ з різним вмістом сіток

Позитивний ефект збільшення деформативності бетону завдяки використанню сталевих сіток в якості аналога упорядкованої дисперсної арматури досягається наступним чином. Сталеві сітки у масі бетону виступають аналогами фібри але, на відміну від неї, мають дві суттєві переваги: забезпечують можливість спільної роботи всього об'єму сталі при виникаючих напруженнях а також характеризуються правильною орієнтацією

відносно діючим зовнішнім навантаженням. В результаті стає можливим суттєво підвищити міцність на розтяг при згині бетону та збільшити його пластичні деформації.

За результатами додаткових досліджень встановлено, що оптимальними параметрами дисперсного армування сітками є наступні: діаметр стержнів сітки 0,8...1,2 мм; крок сітки 10...15 мм; відстань між окремими сітками 3...10 мм; вміст сіток в бетоні (за масою) 75...200 кг/м³.

Діаметр стержнів сіток приймається аналогічно до найбільш поширених діаметрів сталеві фібри. При діаметрі менше 0,8 мм необхідно збільшувати кількість сіток в перерізі виробу або конструкції, а при діаметрі понад 1,2 мм – збільшується загальна витрата сталі на об'єм бетону. Зменшення кроку сітки менше 10 мм збільшує витрату сталі і ускладнює процес формування виробу, а збільшення понад 15 мм знижує ефективність роботи армуючого компонента.

Зменшення відстані між окремими сітками менше 3 мм ускладнює процес їх фіксації в опалубці або формі, а також погіршує рівномірність розподілу бетонної суміші. Збільшення відстані понад 10 мм призводить до появи ефекту "шаруватості" конструкції або виробу, що погіршує деформативні властивості.

Вміст сіток за масою приймається відповідно до найбільш поширених витрат сталеві фібри в бетоні. Зменшення вмісту нижче 75 кг/м³ не забезпечує необхідних значень деформативних властивостей, а збільшення понад 200 кг/м³ приводить до суттєвого зростання вартості конструкції без відповідного збільшення деформативності.

Для виявлення ефективності дисперсного армування сітками порівнюємо результати випробування зразка С-10 з 10 сітками і аналогічного за складом бетону зразком Ф з витратою фібри 140 кг/м³, що відповідає витраті сталі в зразку С-10.

Як видно з наведеної нижче діаграми (рис. 6.18), зразок С-10 має міцність на розтяг при згині 32 МПа, що на 30% більше ніж у зразка, виготовленого із використанням фібри (25 МПа). Крім того, суттєво збільшуються пластичні деформації, що зростають майже в 5 раз (4...4,5 мм проти 0,5...1 мм), що відображено на діаграмі навантаження-деформація.

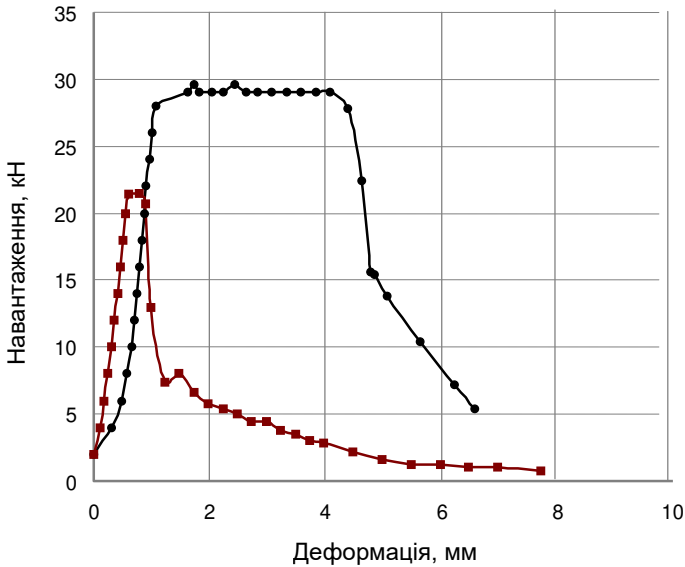


Рис. 6.18. Діаграма навантаження-деформація
 1 – реакційно-порошковий бетон з 10 сітками;
 2 – реакційно-порошковий фібробетон

6.7. Проектування складів високоміцних фібробетонів

Для розрахунків складів високоміцних фібробетонів в НУВГП запропонована методика, що передбачає використання експериментально-статистичних моделей і номограм на їх основі. Нижче наведений приклад реалізації розробленої методики.

На першому етапі був реалізований трьохрівневий трьохфакторний, близький до D – оптимального, план. Умови планування експерименту наведені в табл. 6.12 в якості крупного заповнювача щебеню 5...20 мм із використанням хвилястої фібри Ф1.

Таблиця 6.12

Умови планування експерименту при визначенні параметрів складів сталевібробетону

№	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал
	Код	Натуральний вид	-1	0	+1	
1	X_1	Витрата цементу, кг/м ³ (Ц)	450	500	550	50
2	X_2	B/C	0,35	0,4	0,45	0,1
3	X_3	Витрата фібри, кг/м ³ (Ф)	0	20	40	20

На основі отриманої експериментально-статистичної моделі побудовано номограму міцності сталевібробетону (рис. 6.19). Дана номограма в сукупності з комплексом отриманих моделей (табл. 6.13) може бути використана для проектування складів вібробетонів з комплексом заданих властивостей.

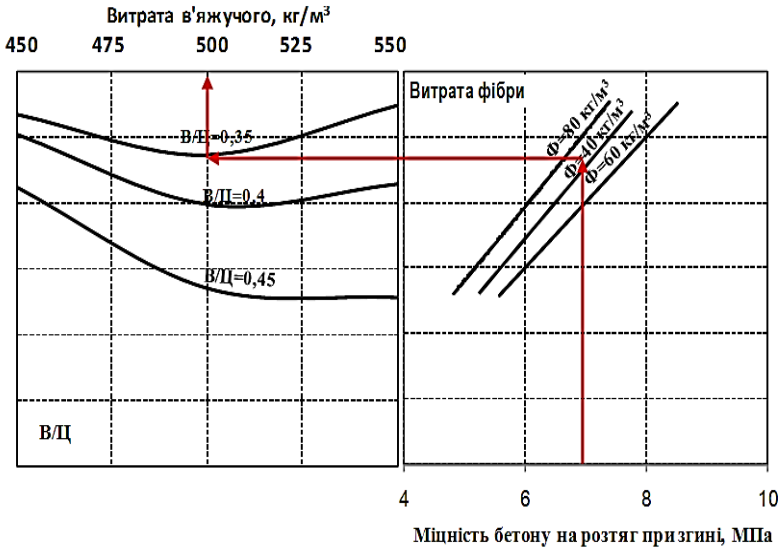


Рис. 6.19. Номограма міцності сталевібробетону на розтяг при згині у віці 28 діб

Таблиця 6.13

Математичні моделі міцнісних параметрів сталевібробетону

Вихідний параметр		Математичні моделі
Витрата Melflux, %		$y=0,21-0,081X_1-0,315X_2+0,099X_3+0,27X_1^2+0,14X_2^2-0,04X_3^2+0,012X_1X_2-0,012X_1X_3-0,034X_2X_3$
Міцність при стиску у віці:	3 доби	$y=35,46-0,26X_1-7,7X_2-0,14X_3+4,171X_1^2+1,47X_2^2+0,671X_3^2-8,363X_1X_2-0,388X_1X_3+0,213X_2X_3$
	7 діб	$y=46,20-3,9X_1-8,4X_2+0,42X_3+8,618X_1^2+0,418X_2^2-0,682X_3^2-4,850X_1X_2-1,40X_1X_3+0,575X_2X_3$
	28 діб	$y=60,6+0,72X_1-16,5X_2-4,8X_3+11,748X_1^2+2,29X_2^2+0,498X_3^2-6,70X_1X_2+1,80X_1X_3-2,70X_2X_3$
Міцність на розтяг при згині у віці:	3 доби	$y=2,74+0,1X_1-0,22X_2+0,63X_3+0,171X_1^2-0,129X_2^2-0,279X_3^2-0,625X_1X_2+0,275X_1X_3+0,12X_2X_3$
	7 діб	$y=3,27-0,1X_1-0,41X_2+1,15X_3+0,365X_1^2-0,106X_2^2-0,194X_3^2-0,450X_1X_2-0,075X_1X_3-0,225X_2X_3$
	28 діб	$y=4,05-0,15X_1-0,44X_2+1,67X_3+0,532X_1^2-0,282X_2^2-0,368X_3^2-0,388X_1X_2-0,087X_1X_3-0,213X_2X_3$

Залежно від конкретних умов визначальними параметрами складу сталевібробетону можуть бути або водоцементне відношення або витрати фібри. При проектуванні складів за табл. 6.14 визначаємо бажаний діапазон в якому може знаходитись склад фібробетону із заданими значеннями міцності на стиск і розтяг при згині.

Таблиця 6.14

Орієнтовні значення міцнісних характеристик
сталевібробетону у віці 28 діб

Витрата фібри, кг/м ³	<i>B/C</i>	<i>f_{c,ф}</i> , МПа	<i>f_{cm}</i> , МПа
20...40	0,35...0,4	6,02...7,51	65,8...72,2
	0,4...0,45	5,13...6,02	44,6...65,8
40...60	0,35...0,4	7...7,75	60,6...79,3
	0,4...0,45	5,3...7	46,3...60,6
60...80	0,35...0,4	7...7,75	65,8...83,9
	0,4...0,45	5,3...7	48,8...65,8

Прийнявши певні витрати фібри або значення водоцементного відношення по номограмі наведеній на рис. 6.19 визначаємо основні параметри складу бетонної суміші, які будуть забезпечувати задану міцність бетону на розтяг при згині.

Переводимо отримані значення параметрів складу бетонної суміші в кодований вигляд використовуючи формули (6.14-6.16):

$$X_1 = \frac{(C - 500)}{50}; \quad (6.14)$$

$$X_2 = \frac{(B/C - 0,4)}{0,05}; \quad (6.15)$$

$$X_3 = \frac{(\Phi - 60)}{20}. \quad (6.16)$$

Підставивши отримані значення в рівняння (табл. 6.13), перевіряємо забезпеченість необхідної міцності бетону при стиску у віці 28 діб.

Розраховуємо при заданому водоцементному відношенні і витраті цементу витрати води за формулою:

$$B = C \cdot V / C. \quad (6.17)$$

Підставляємо переведені в кодований вигляд значення витрати цементу, фібри та водоцементного відношення в рівняння (табл. 6.13), і визначаємо витрату суперпластифікатора полікарбоксилатного типу, яка забезпечить необхідну рухомість бетонної суміші 16-18 см. При необхідності забезпечення іншої

рухомості бетонної суміші вміст суперпластифікатора уточнюється експериментально.

При розрахованих значеннях витрати цементу та води за відомими методиками визначаємо витрати заповнювачів за формулами (6.18, 6.19).

$$\text{Щ} = \frac{1000}{\alpha \frac{V_{\text{щ}}^n}{\rho_{\text{нщ}}} + \frac{1}{\rho_{\text{щ}}}}; \quad (6.18)$$

$$\Pi = \left(1000 - \left(\frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{ц}}} + B + \frac{\text{Щ}}{\rho_{\text{щ}}} \right) \right) \rho_n. \quad (6.19)$$

де α – коефіцієнт розсуву зерен, $V_{\text{щ}}^n$ – пустотність щебеню, $\rho_{\text{нщ}}$ – насипна густина щебеню, $\rho_{\text{щ}}$ – істинна густина щебеню, ρ_n – істинна густина піску.

Приклад.

Розрахувати склад високоміцного сталевібробетону з 28-добовою міцністю на стиск 75 МПа та міцністю на розтяг при згині 7 МПа. Насипна густина щебеню $\rho_{\text{нщ}} = 1,65 \text{ г/см}^3$, істинна густина щебеню $\rho_{\text{щ}} = 2,85 \text{ г/см}^3$, істинна густина піску $\rho_n = 2,65 \text{ г/см}^3$.

1. За табл. 6.13 визначаємо діапазон $B/\text{Ц}$ та витрати фібри, в якому може знаходитись склад фібробетону із заданими значеннями міцності на стиск і розтяг при згині. В даному випадку – це витрати сталевібробетону 40...60 кг/м³ та водоцементне відношення 0,35...0,4.

2. За номограмою, наведеною на рис. 6.19, задавшись з позицій економії мінімальною витратою фібри 40 кг/м³, визначаємо необхідну витрату цементу і водоцементне відношення, які б забезпечували виконання поставленої вимоги що до міцності фібробетону на розтяг при згині.

3. Переводимо отримані значення ($\text{Ц}=500 \text{ кг/м}^3$, $B/\text{Ц}=0,35$, $\Phi=40 \text{ кг/м}^3$) в кодовий вигляд:

$$X_1 = \frac{(Ц - 500)}{50} = \frac{500 - 500}{50} = 0;$$

$$X_2 = \frac{(B/Ц - 0,4)}{0,05} = \frac{0,35 - 0,4}{0,05};$$

$$X_3 = \frac{(\Phi - 60)}{20} = \frac{40 - 60}{20} = -1.$$

4. Підставляємо отримані значення в рівняння з табл. 2.12 та перевіряємо чи забезпечується необхідна міцність бетону при стиску у віці 28 діб 75 МПа.

$$f_{cm} = 60,6 + 0,72 \cdot 0 - 16,5 \cdot (-1) + 4,8 \cdot (-1) + 11,748 \cdot (0)^2 +$$

$$+ 2,2 \cdot (-1)^2 + 0,4 \cdot (-1)^2 - 6,70 \cdot 0 \cdot (-1) + 1,80 \cdot 0 \cdot (-1) +$$

$$+ 2,70 \cdot (-1) \cdot (-1) = 77,6 \text{ МПа.}$$

Умова виконується $77,6 \geq 75$ МПа.

5. Розраховуємо, при заданому водоцементному відношенні і витраті цементу, витрати води за формулою:

$$B = Ц \cdot B/Ц = 500 \cdot 0,35 = 175 \text{ л/м}^3.$$

6. Підставляємо переведені в кодований вигляд значення витрати цементу ($X_1=0$), фібри ($X_3=-1$) та водоцементного відношення ($X_2=-1$) в рівняння з табл. 2.12, і визначаємо витрату суперпластифікатора полікарбоксилатного типу Melflux, яка забезпечить необхідну рухомість бетонної суміші 16-18 см.

$$СП = 0,21 - 0,081 \cdot 0 - 0,315 \cdot (-1) + 0,099 \cdot (-1) + 0,27 \cdot 0^2 +$$

$$+ 0,14 \cdot (-1)^2 + 0,04 \cdot (-1)^2 + 0,012 \cdot 0 \cdot (-1) -$$

$$- 0,012 \cdot 0 \cdot (-1) - 0,034 \cdot (-1) \cdot (-1) = 0,57\% \text{ від маси цементу.}$$

7. При знайдених значеннях витрати цементу та води, за відомими методиками по формулах (6.18-6.19) визначаємо витрати заповнювачів.

$$Ц = \frac{1000}{\alpha \frac{V_{ц}^n}{\rho_{ц}} + \frac{1}{\rho_{ц}}} = \frac{1000}{1,5 \frac{0,42}{1,65} + \frac{1}{2,85}} = 1370 \text{ кг/м}^3;$$

$$П = \left(1000 - \left(\frac{500}{3,1} + 175 + \frac{1370}{2,85} \right) \right) 2,65 = 389 \text{ кг/м}^3.$$

Отриманий за розрахунками бетон має наступний склад: цемент – 500 кг/м³, вода – 175 л/м³, щебінь – 1370 кг/м³, пісок –

389 кг/м³. Витрата суперпластифікатора Melflux складає 0,57% від маси цементу, витрата сталюї фібри 40 кг/м³.

Розрахований склад фібробетону необхідно перевірити експериментально.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахвердов И.Н. Высокопрочный бетон. - М.: Стройиздат, 1961. – 163 с.
2. Ахвердов И.Н. Теоретические основы бетоноведения. - М.: Вища школа, 1991 – 188 с.
3. Баженов Ю.М. Бетоноведение. – М.: Изд-во АСВ, 2015. – 144 с.
4. Баженов Ю.М., Вознесенский В.А. Перспективы применения математических методов в технологии сборного железобетона. - М.: Стройиздат.– 192 с.
5. Баженов Ю.М., Горчаков Г.И., Алимов Л.А., Воронин В.В. Получение бетона заданных свойств. - М.: Стройиздат, 1978 – 54 с.
6. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. - М.: Стройиздат, 1998 - 768с.
7. Батяновский Э.И. Особо плотный бетон сухого формования.- Минск: "Стринко", 2003.- 224 с.
8. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон.- М.: Стройиздат, 1971. – 208 с.
9. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона.- М.: Стройиздат, 1962.- 96 с.
10. Большаков В.И., Дворкин Л.И. Строительное материаловедение. Днепропетровск: РВА "Дніпро-VAL", 2004.- 677 с.
11. Вагнер Г.Р. Физико-химия процессов активации цементных дисперсий.- Киев: Наукова думка, 1980.- 200 с.
12. Вознесенский В.А., Выровой В.Н., Керш В.Я. и др. Современные методы оптимизации композиционных материалов. -К.: Будівельник, 1983. – 144 с.
13. Глекель Ф.Д. Физико-химические основы применения добавок к минеральным вяжущим.- Ташкент:"Фан", 1975.- 123 с.
14. Глуховский В.Д., Кривенко П.В., Румына Г.В. Производство бетонов и конструкций на основе шлакощелочных вяжущих.- К.: Наук. думка, 1984.-300с.

15. Гоц В. І., Павлюк В. В., Шилюк П. С. Бетони і будівельні розчини: підручник / К. : Основа, 2016. 568 с.
16. Грушко И.М., Ильин А.Г., Чихладзе Э.Д. Повышение прочности и выносливости бетона. - Харьков: Вища школа, 1986. – 149 с.
17. Дворкин Л. И., Дворкин О.Л. Специальные бетоны. – М.: Инфра-Инженерия, 2012. – 368 с.
18. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Испытания бетонов и растворов. Проектирование их составов. – М.: Инфра-Инженерия, 2014. – 432 с.
19. Дворкін Л.Й., Гоц В.І., Дворкін О.Л. Випробування бетонів та будівельних розчинів. Проектування їх складів. - К.: Основа, 2014. - 304 с.
20. Дворкин Л.И., Житковский В.В., Марчук В.В. Сухие строительные смеси с применением дисперсных отходов промышленности. – М.: Инфра-Инженерия, 2019. – 312 с.
21. Кириенко И.А. Расчет состава высокопрочных и обычных бетонов и растворов. – Киев: Госстройиздат, 1961. – 145 с.
22. Конструкційні матеріали нового покоління та технології їх впровадження у будівництво / Р.Ф. Рунова, В.І. Гоц, М.А. Саницький та ін. – К.: УВПК «ЕксОб». - 2008. - 360 с. ISBN 966-7769-70-3.
23. Модифіковані композиційні цементы: навч. посіб. / М. А. Саницький, Х. С. Соболев, Т. Є. Марків ; Нац. ун-т «Львів. політехніка». — Л. : Вид-во Львів. політехніки, 2010. — 132 с. ISBN 978-966-553-950-6.
24. Саницький М.А.. Кропивницька Т.П., Гев'юк І.М. Швидкотверднучі клінкер-ефективні цементы та бетони: Монографія – Львів: Видавництво ТОВ «Простір0М», 2021. - 206 с.
25. Химические и минеральные добавки в бетон (Под ред. О.В.Ушерова-Маршака.- Х-в: Колорит, 2005.- 280 с.
26. Aitcin, P.C.: High Performance Concrete, E and FN. Spon, London, 1998. – 591 p.
27. Dewar J.D. Computer Modelling of Concrete Mixture. – London, New York: E&FN Spon, 1999. – 256 p.
28. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Mathematical Experiments

- Planning in Concrete Technology. Nova Science Publishers , New York, USA, 2012. p. 172.
29. Dvorkin L, Nwoubani S., Dvorkin O. Construction Materials. Nova Science Publishers, New York, USA, 2010.– 409 p.
 30. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Multi-Parametric Concrete Compositions Design. Nova Science Publishers, New York, USA, 2013, p. 223.
 31. Dvorkin L., Dvorkin O., Basics of concrete science. Amazon, (Kindle edition) 382 p.,2011/(e-book).
 32. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Construction materials Based on Industrial Waste Products. Nova science publishers, 2016, hh.242.
 33. L. Dvorkin, V. Bolshakov. Structure and Properties of Building Materials. Trans Tech Publication Ltd, Zurich, 2016, p. 220.
 34. L. Dvorkin, V. Zhitkovsky, Y. Ribakov. Concrete and montar production using stone sifting. CRC Press Taylor and Francis Group, London, New York, 2018, p.159.
 35. Lea's Chemistry of cement and concrete, eq.by Peter C.Hewlett, 1998.- 1008 c.
 36. Neville A.M.Wlasciwosci betonu, wudanie 4, Krakow, 2000.- 874 s.
 37. Locher F. Cement. Principle of production and use.- Verlad Ban; Technic, CmBH, 2003.- 540 p.