

РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ВЯЖУЧІ МАТЕРІАЛИ І БЕТОНИ ТА ЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ

УДК

ЕФЕКТИВНІ ВИСОКОМІЦНІ ШВИДКОТВЕРДНУЧІ БЕТОНИ

EFFECTIVE HIGH-STRENGTH RAPID HARDENING CONCRETE

Дворкін Л.Й., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0001-8759-6318 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Dvorkin L.I. doctor of techn.science, professor, ORCID: 0000-0001-8759-6318 (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

На кафедрі технології будівельних виробів і матеріалознавства виконано ряд досліджень щодо зниження ресурсо- та енергоємності виробництва високоміцних швидкотверднучих бетонів.

Встановлена можливість отримання бетонів з міцністю на стиск у віці 28 діб до 90 МПа і у віці 1 доба до 50% марочної на композиційних цементах, що містять 50% клінкеру, 12% доменного шлаку і 35% золи-виносу. До складу цементу входить комплексна добавка пропіленгліколю і суперпластифікатора.

Експериментально показано, що при отриманні високоміцних бетонів заміником мікрокремнезему як активної мінеральної добавки може слугувати метакаолін.

Розроблена технологія отримання високоміцних швидкотверднучих бетонів на основі активованих малоклінкерних цементів. Активація цементу, що включає 12% клінкеру досягається введенням комплексної добавки вапна і кремнефториду натрію.

Обґрунтована можливість отримання високоміцних самоущільнювальних і реакційно-порошкових золо- та шлаковмісних бетонів. Визначена ефективність дисперсного армування високоміцних бетонів сталевую та базальтовою фіброю.

The Department of Building Products Technology and Materials Science NUWEE has conducted a number of studies on reducing the resource and energy intensity of the production of high-strength rapid-hardening concrete.

It has been established that it is possible to obtain concrete with a compressive strength of up to 90 MPa at the age of 28 days and up to 50% of the 28 days strength at the age of 1 day using composite cements containing 50% clinker, 12% blast furnace slag and 35% fly ash. The cement contains a complex additive of propylene glycol and a superplasticizer.

It has been experimentally shown that metakaolin can serve as a substitute for microsilica as an active mineral additive when producing high-strength concrete.

A technology has been developed for producing high-strength rapid-hardening concrete based on activated low-clinker cements. Activation of cement containing 12% clinker is achieved by introducing a complex additive of lime and silicon sodium fluoride.

The possibility of obtaining high-strength self-compacting and reactive powder ash and slag-containing concretes has been substantiated. The effectiveness of dispersed reinforcement of high-strength concretes with steel and basalt fibers has been determined.

Актуальною проблемою сучасного будівництва є розвиток технології бетону і суттєве покращення його властивостей. На рішення цієї проблеми направлена технологія бетонів нового покоління, яка інтенсивно розвивається в розвинених країнах.

На кафедрі технології будівельних виробів і матеріалознавства НУВГП в останні роки виконано цикл досліджень, що стосується групи нового покоління бетонів, яка включає високоміцні швидкотверднучі бетони, самоущільнювальні та реакційно-порошкові бетони. Результати досліджень викладені в серії монографій в т.ч. виданих в найбільш відомих наукових видавництвах світу (рис. 1).

Метою наших досліджень було зниження ресурсо- та енергоємності виробництва високоміцних швидкотверднучих бетонів за рахунок застосування в складі цементу і бетонної суміші компонентів з техногенної сировини і різноманітних добавок.

Високоміцні бетони були отримані із застосуванням композиційних золо-, шлаковмісних цементів, активованих малоклінкерних шлакопортландцементів, а також при застосуванні відходів каменеподрібнення. Розроблений на кафедрі композиційний цемент має склад: клінкер – 50%, доменний шлак – 12%, зола-винссу – 35%, гіпсовий камінь - 4% і комплексну добавку, що містить інтенсифікатор помелу цементу, пропіленгліколь – 1,004%) і полікарбоксилатний суперпластифікатор Melflux-265/F 0/5-1%.

Залежно від В/Ц і питомої поверхні цементу досягнута міцність бетону на стиск у однодобовому віці до 50% 28-добової, а також підвищена міцність на розтяг. Для розроблених бетонів характерні підвищені значення співвідношення міцності на розтяг до міцності на стиск, що свідчить про їх підвищену тріщиностійкість.

Випробування показали для досліджених бетонів також високі показники водонепроникності та морозостійкості.

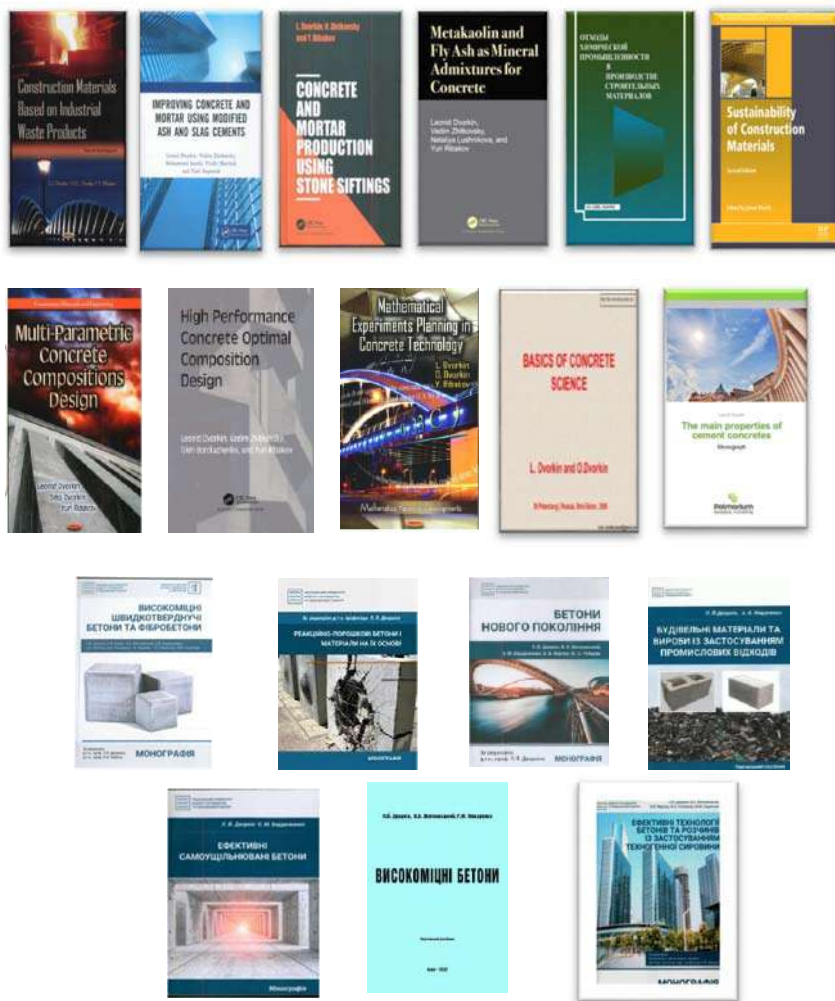


Рис. 1. Монографії з проблем ефективності високоміцних бетонів

Комплексна добавка у складі цементу виконує роль поліфункціонального модифікатора і дозволяє отримати бетонні суміші на цементах різної дисперсності в широкому діапазоні легкоукладальності (рис.2) і знизити В/Ц до значень, необхідних для високоміцних бетонів (рис.3).

Експериментально-статистичні моделі дозволили отримати необхідні залежності і запроектувати склад бетонних сумішей з заданою міцністю і легкоукладальністю. На основі отриманих моделей побудовані необхідні номограми. (рис. 2-4).

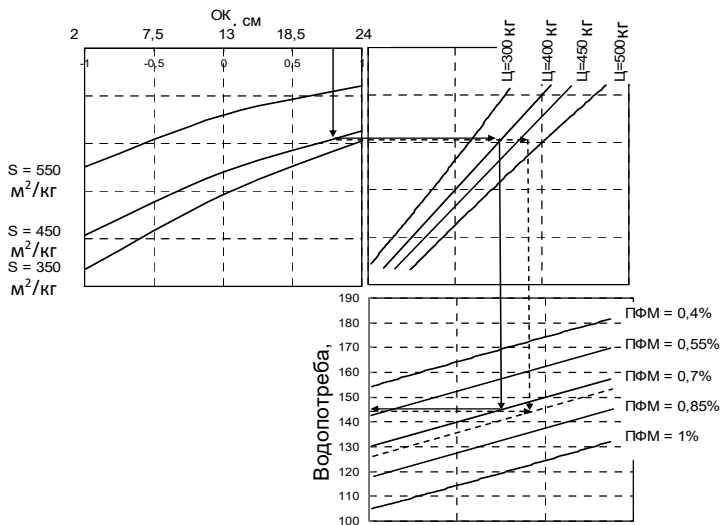


Рис. 2. Номограма визначення водопотреби бетонних сумішей на основі золовмісних КЦ

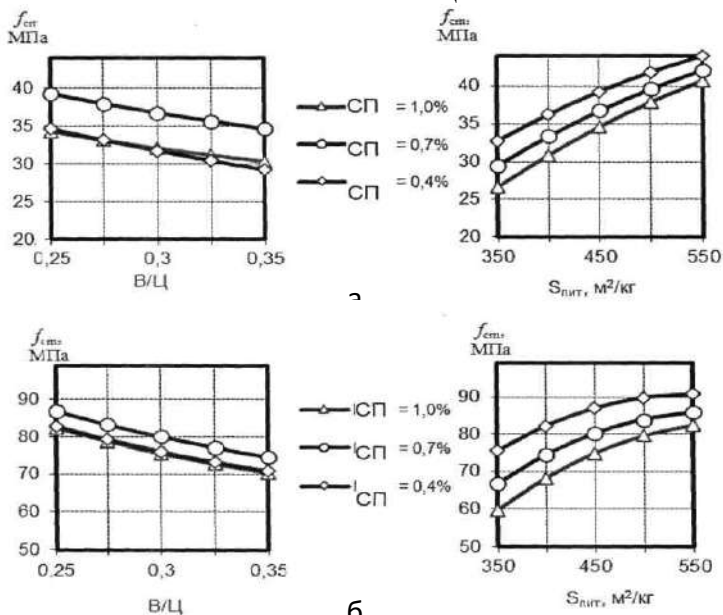


Рис. 3. Залежності міцності бетону на стиск у віці 1(а) та 28 діб (б)

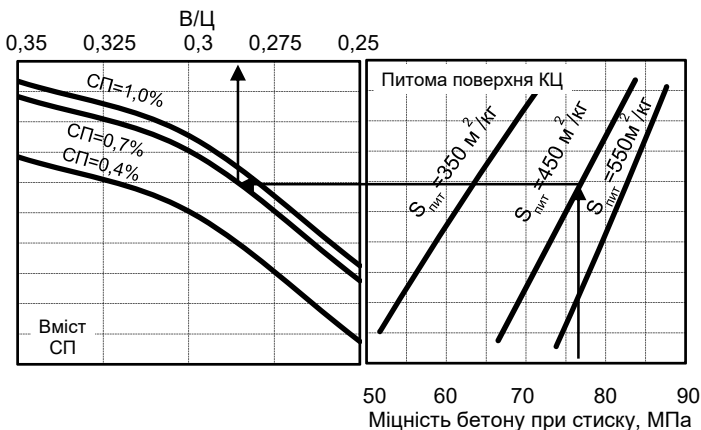


Рис. 4. Номограма визначення міцності бетонів на основі золівмісних КЦ у віці 28 діб

Порівняльні дослідження суперпластифікаторів різного типу показали переваги суперпластифікаторів поліакрилатного і полікарбоксилатного типів, що мають високі пластифікуючі і водоредукуючі ефекти.

Експериментально показана також доцільність раціонального поєднання суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу з пластифікуючими добавками інших видів і створення комплексних добавок, що характеризуються високим водоредукуючим ефектом і разом з тим більш низькою вартістю.

Важливим компонентом високоміцних бетонів є високоактивна мінеральна добавка. Доведено багатьма дослідженнями і практикою, що найбільш активною мінеральною добавкою є мікрокремнезем - вискодисперсний порошок аморфного кремнезему. Але в Україну мікрокремнезем імпортується, є складності при його транспортуванні і дозуванні. Нашими дослідженнями показано, що заміником мікрокремнезему може слугувати метакеолін - продукт помірного випалу каолінових глин - природні родовища яких поширені в т.ч. і в Західній Україні. При вмісті метакеолінової добавки 15% від маси цементу вже через 12 годин досягається міцність бетону на стиск до 50 МПа при 28 добовій міцності 90 МПа, (Рис. 5).

Найбільш дорогим та енергоємним компонентом портландцементу є його напівфабрикат - цементний клінкер. Виробництво клінкера також супроводжується підвищеними викидами вуглекислого газу в атмосферу. Діючим стандартом України, гармонізованим з Європейськими нормами ЕМ 197-1, передбачено виробництво шлакопортландцементу ШПЦ з вмістом клінкеру 5-20%. Такі цементи поки не надто популярні серед виробників через відносно низьку активність і повільний набір міцності.

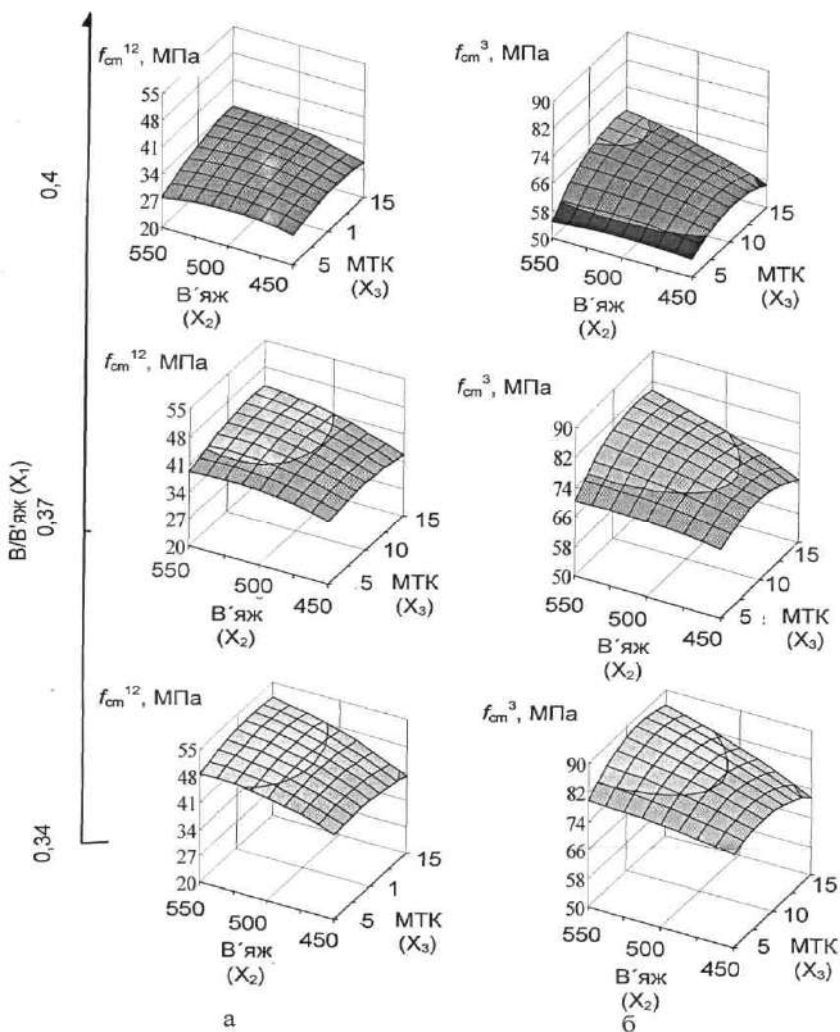


Рис. 5. Міцність бетонів на стиск залежно від витрат в'язучого ($B'яж$) і метакаліну (МТК) у віці: а – 12 год; б – 3 доби

На кафедрі розроблена технологія активізації малоклінкерних шлакопортландцементів (МШПЦ) і на їх основі отримання високоміцних бетонів. Дослідження проведені на в'язучому наступного складу: портландцементний клінкер – 12%, доменний гранульований шлак – 88%, фосфогіпс у перерахунку на SO_3 – 4,5%.

Введення до складу МШПЦ комплексної добавки Na_2SiF_6 та вапна дозволяє суттєво в результаті комплексної лужної активізації покращити властивості в'язучого і майже вдвічі збільшити його міцність як при нормальному твердінні, так і при тепловолігисній обробці. (Рис. 6).

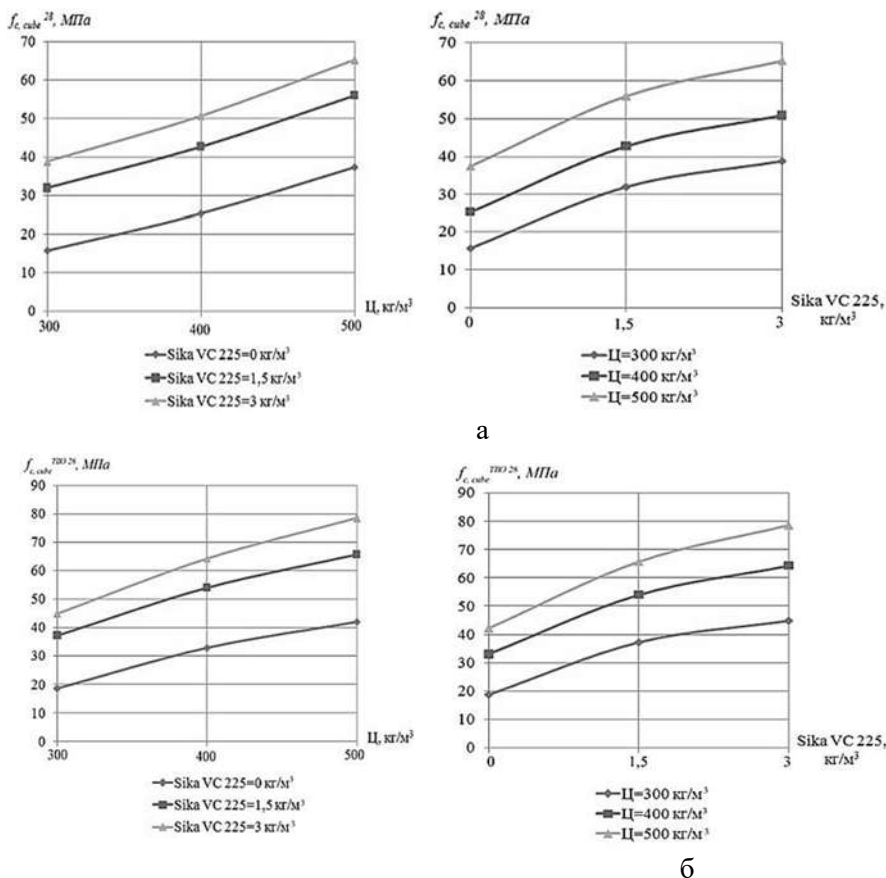


Рис. 6. Вплив технологічних факторів на міцність бетону, виготовленого на основі активованого МШПЦ: (а) – у віці 28 діб; (б) – після тепловолігисної обробки

При застосуванні полікарбоксилатного суперпластифікатора на малоклінкерному активному в'язучому міцність бетону при нормальному твердінні досягає майже 70 МПа, а при пропарюванні до 80 МПа.

Застосування композиції полікарбоксилатних суперпластифікатора і високоактивної мінеральної добавки дозволяє в якості заповнювача високоміцних дрібнозернистих бетонів використовувати відсіві подрібнення граніту (Табл. 1).

Вплив добавок на отримання високоміцних дрібнозернистих бетонів на гранітних відсівах

№ д.т.	Суперпластифікатор, %	Мінеральна добавка, %	В/Ц	ОК, см	Міцність при стиску (МПа) ц 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

Виконано комплекс досліджень з розробки технології самоущільнювальних бетонів з застосуванням золи-виносу. При оптимальній витраті і дисперсності золи-виносу вона чинить позитивний вплив на розшаровуваність і міцність самоущільнювальних бетонів (рис. 7,8). Для підвищення співвідношення міцності на розтяг до міцності на стиск самоущільнювальних бетонів та покращення інших їх властивостей досліджені бетони з добавкою полівінілацетатної дисперсії.

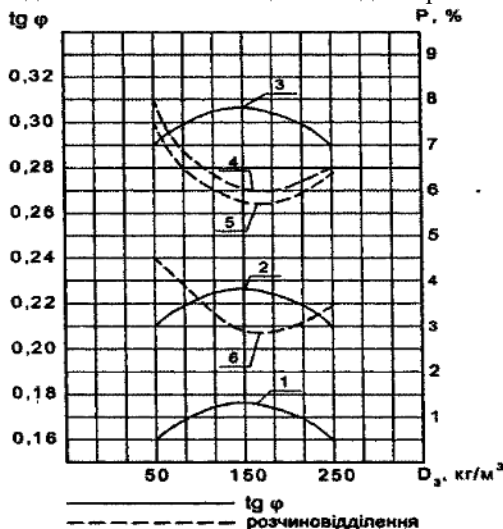


Рис. 7. Вплив витрати і дисперсності золи на розчиновідділення (Р) самоущільнюваних золовмісних бетонних сумішей: (В/Ц=0,4; В=180 кг/м³; r₀=0,41 і S: 1,4 – 4900; 2,5 – 3900; 3,6 – 2900 см²/Г)

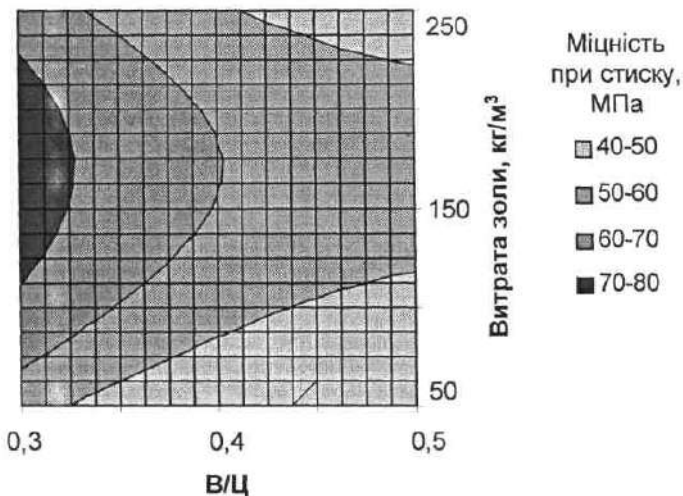


Рис. 8. Діаграма міцності самоущільнюваних золовмісних бетонів при $V = 180 \text{ кг/м}^3$, $r_n = 0,41$

При 10% добавці ПВАД міцність на згин самоущільнювальних цементно-золевих бетонів зростає майже у 3 рази, знижується також водовідділення, підвищується період життєздатності бетонної суміші, знижується стирання (Рис. 9, 10).

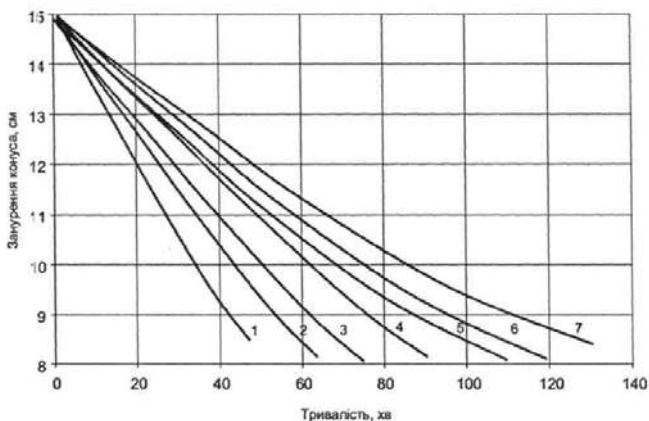


Рис. 9. Вплив добавки ФМ на втрату рухомості самоущільнюваних бетонних сумішей: 1 – СП - 0.5% маси цементу; 2 – СП - 3%; 3 – СП - 0.25%; ПВАД - 0.25%; 4 – без добавок; 5 – СП - 1.5%; ПВАД - 1.5%; 6 – ПВАД - 0.5%; 7 – ПВАД - 3%

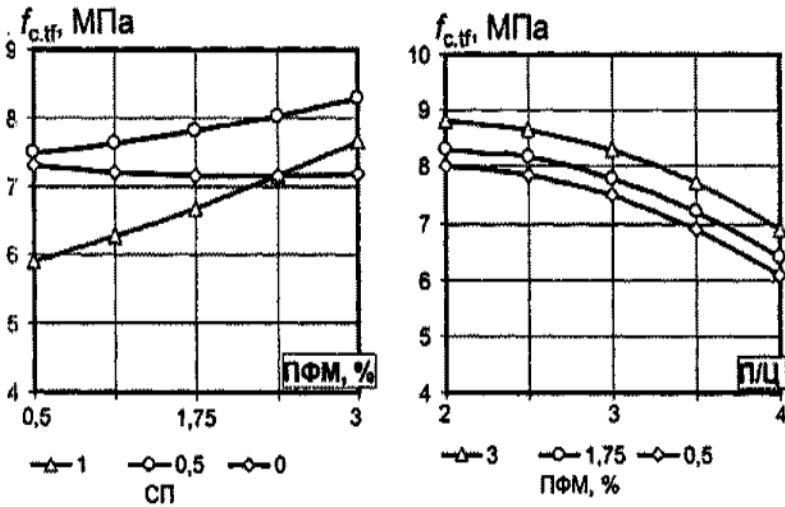


Рис. 10. Залежності міцності при згині (f_c , t_f , МПа) самоущільнюваних бетонів із добавкою ПФМ від досліджуваних факторів: вмісту ПФМ, % маси цементу (ПФМ, %); масової частки СП у складі ПФМ (СП); масового співвідношення піску і цементу (П/Ц)

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). У складі РПБ в якості заповнювача використовуються дрібні порошки.

У наших дослідженнях в якості заповнювача РПБ використовували дрібний пісок фракції 0,16-1,25 мм. Була перевірена ефективність різних видів суперпластифікаторів і показана доцільність застосування полікарбоксилатних та поліакрилатних пластифікаторів, які при В/Ц=0,18-0,20 дозволяють отримати РПБ з міцністю на стиск в 28 діб до 150 МПа. Також проведені випробування різних видів активних мінеральних добавок і показана можливість виготовлення з застосуванням полікарбоксилатних суперпластифікаторів і таких мінеральних добавок як мікрокремнезем і метакаолін РПБ з міцністю на стиск до 130 МПа і вище. (Рис. 11).

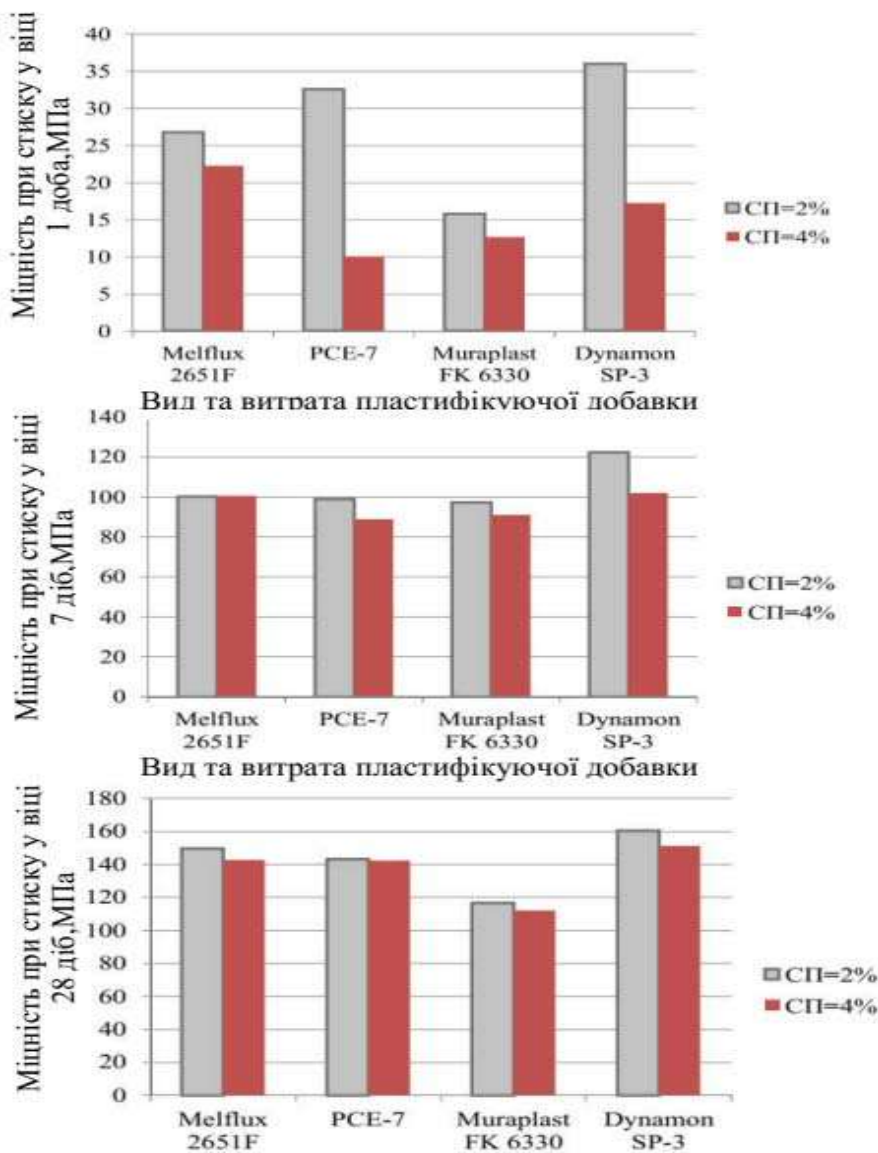


Рис. 11. Порівняльний вплив суперпластифікаторів на міцність РПБ у різному віці твердіння

Була виконана серія досліджень з метою визначення впливу теплової обробки на міцність РПБ з використанням різних мінеральних добавок. Показана можливість отримання достатньо високої міцності бетону після пропарювання, а також після витримування у гарячій воді вже через 2 години.

Таблиця 2

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	Витрата води, л/м ³	В/Ц	Роз- плив см	Міцність бетону у віці дів, МПа					
							f_{cf}^1	f_{cm}^1	f_{cf}^7	f_{cm}^7	f_{cf}^{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

Показана також можливість використання РПБ як напівфабрикату для виготовлення сухих будівельних сумішей різного призначення.

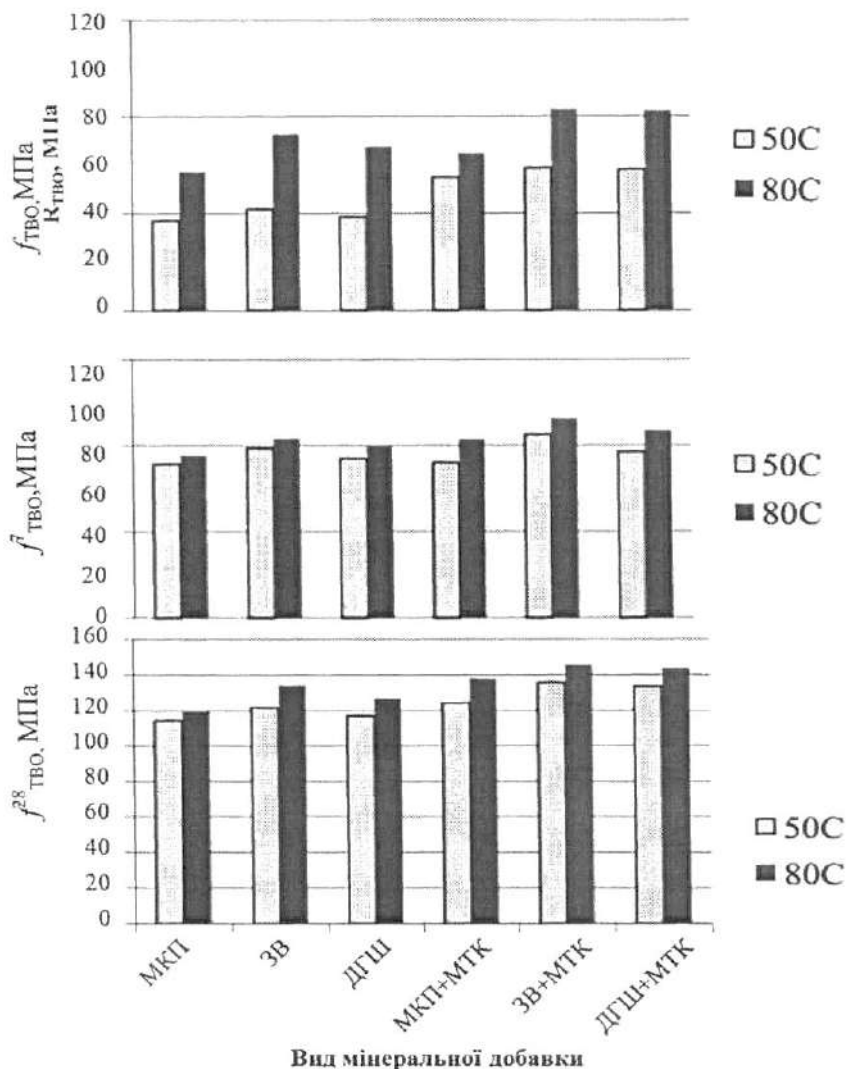


Рис. 12. Вплив температури витримання у воді та виду мінеральних добавок на міцність РПБ при стиску через 2 год. ($f_{\text{ТВО}}$), 7 дб ($f^7_{\text{ТВО}}$) та 28 дб ($f^{28}_{\text{ТВО}}$)

Для покращення деформативних властивостей бетону ефективно дисперсне армування фіброю, що, як відомо дозволяє підвищити питому міцність на розтяг і згин, тріщиностійкість, стійкість до ударних і вібраційних впливів, опір стиранню тощо. В наших дослідженнях розглянуто вплив різних видів сталевих фібри. Найвищі значення міцності досягаються

при застосуванні фібри хвилястого профілю (Φ_1). Згідно отриманих даних введення анкерної фібри збільшує міцність на розтяг при згині досліджених бетонів до 3 разів, оптимальний вміст сталеві фібри становить до 100 кг/м^3 (рис. 13).

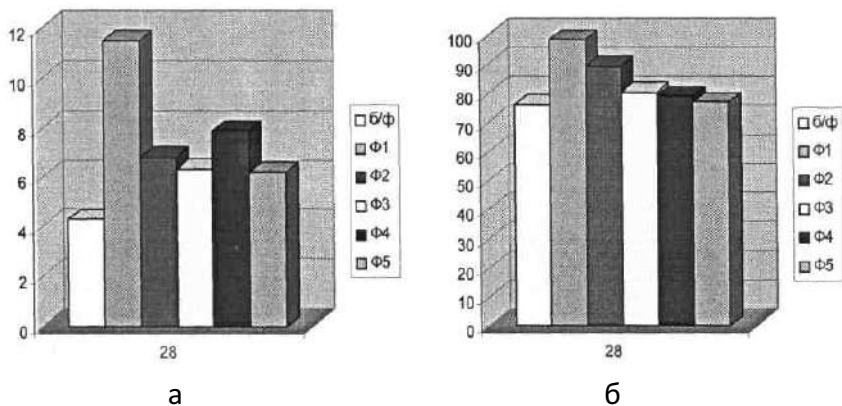


Рис.13. Вплив виду фібри на значення міцності на розтяг при згині (а) та стиску (б) дрібнозернистого сталевібробетону у віці 28 діб ($\mu=0,5\%$) б/ф – без фібри

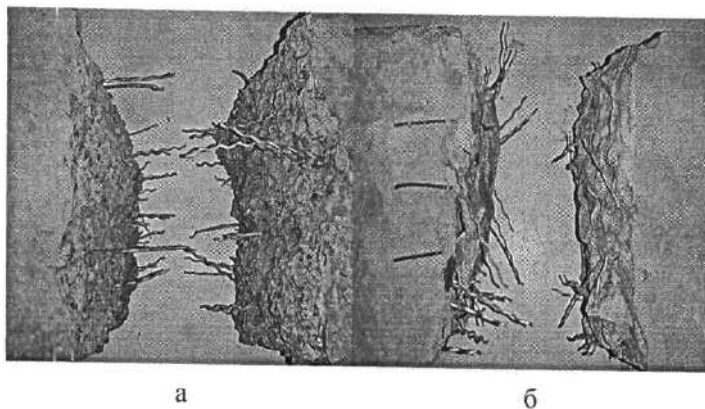


Рис.14. Вигляд перерізу зруйнованого зразка із орієнтованою (а) та не орієнтованою (б) фіброю

Позитивний ефект на фізико-механічні властивості фібробетонів здійснює орієнтування сталеві фібри перпендикулярно робочому навантаженню під

дією магнітного поля (рис. 14), а також композиційне дисперсне армування сталевую і базальтовою фіброю.



Рис. 15. Рекомендації з проектування залізобетонних конструкцій фортифікаційних споруд

Найбільш високі деформативні властивості характерні для дисперсно-армованих реакційно-порошкових бетонів. Лабораторні випробування показали також їх підвищену динамічну стійкість. Близький за складом фібробетон Дисон, що розроблений в Німеччині, використовується у захисних бетонних елементах проти динамічних впливів, таких як вибухи, бомбардування, ударів або землетрусів. Дослідні конструкції, що були виготовлені з високоміцних бетонів та фібробетонів були успішно випробувані на військовому полігоні. За участю центрального проектного інституту Міністерства оборони розроблені Рекомендації з проектування залізобетонних конструкцій фортифікаційних споруд (рис. 15).

Вплив технологічних параметрів на властивості досліджених бетонів досліджений за допомогою

експериментально-статистичного моделювання. Отриманий комплекс математичних моделей дозволив розробити методи проектування оптимальних складів всіх досліджених високоміцних бетонів і отримати кількісні залежності для прогнозування їх властивостей.

1. Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Марчук В.В., Степасюк Ю.О., Скрипник М.М. Ефективні технології бетонів та розчинів із застосуванням техногенної сировини. Рівне: НУВГП, 2017. – 424 с.

2. Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Макаренко Р.М. Високоміцні бетони. Київ: Каравела, 2021. – 218 с.

3. Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Бордюженко О.М., Марчук В.В., Рубцова Ю.О. Бетони нового покоління. Рівне: НУВГП, 2021. – 316 с.

4. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л. Основи бетонознавства. К.: Основа, 2017.– 616 с. 5. Дворкін Л.Й. Основи матеріалознавства і технології будівельних виробів. К.: «Кондор», 2024.– 800 с.