Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра будівельних, дорожніх машин і будівництва

«Допустити до захисту»
зав. кафедри БДМБ
д-р техн. наук, професор
_____ В. Яцун
«____» _____ 2026 р.

Кваліфікаційна магістерська робота

на тему:

Вплив комплексу хімічних і мінеральних добавок на реологічні та фізико-механічні характеристики самоущільнювальних бетонних сумішей

Керівник кваліфікаційної магістерської роботи, доцент
_____ Скриннік І.О.
«____» _____ 2026 р.

Консультант з охорони праці, доцент
_____ Дарієнко В.В.
«____» _____ 2026 р.

Виконав студент гр. БІ-25 М
спеціальності G19 Будівництво та цивільна інженерія
_____ Артемошін О.О.
«____» _____ 2026 р.

Кропивницький – 2026 рік

Підписано КЕП
Центральноукраїнський національний технічний університет
АРТЕМОШІН ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ
Сертифікат: 21E4B79083A82E7F04000000E1BE3C012F160A08
Дійсний з 08.10.2026 16:04:29 по 09.10.2027 02:59:59

Центральноукраїнський національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення *ФБТЕ*

Кафедра, циклова комісія *Будівельні, дорожні машини і будівництво*

Освітньо-кваліфікаційний рівень *магістр*

Спеціальність *G19 Будівництво та цивільна інженерія*

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри БДМБ,

д.т.н., проф. Яцун В.В.

_____

«____» _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Артемошіну Олександру Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи)

Вплив комплексу хімічних і мінеральних добавок на реологічні та фізико-механічні характеристики самоущільнювальних бетонних сумішей

керівник проекту (роботи) *Скриннік І.О., доцент*

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від *«10» 08 2026 року № 24-13*

2. Строк подання студентом проекту (роботи) *25.11.2027 р.*

3. Вихідні дані до проекту (роботи): *нормативна та довідкова література за темою; результати опублікованих експериментальних досліджень реологічних і фізико-механічних властивостей самоущільнювальних бетонів з хімічними і мінеральними добавками; характеристики матеріалів.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Сучасні уявлення про склад і властивості СУБ; 2. Методи випробувань і матеріали; 3. Вплив комплексу добавок на реологічні властивості; 4. Фізико-механічні та експлуатаційні властивості, оптимізація складу; 5. Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу

Мультимедійна презентація (22 слайди), що ілюструє методику та результати досліджень

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	**Прізвище, ініціали та посада консультанта**	**Завдання видав (підпис, дата)**	**Завдання прийняв (підпис, дата)**
Розділи 1–4 (науково-дослідні)	доцент Скриннік І.О.		
Охорона праці	доцент Дарієнко В.В.		

7. Дата видачі завдання *01.09.2026 р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	**Назва етапів проекту (роботи)**	**Строк виконання етапів**	**Примітка**
1	Огляд літератури, аналіз стану проблеми (розділ 1)	01.09–20.09	
2	Систематизація методів випробувань і матеріалів (розділ 2)	21.09–05.10	
3	Аналіз впливу добавок на реологічні властивості (розділ 3)	06.10–25.10	
4	Аналіз фізико-механічних властивостей, оптимізація складу (розділ 4)	26.10–15.11	
5	Розроблення заходів з охорони праці (розділ 5)	16.11–20.11	
6	Оформлення пояснювальної записки та презентації	21.11–25.11	

Студент _____ *Артемошін О.О.*

(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ *Скриннік І.О.*

(підпис) (прізвище та ініціали)

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кількість аркушів	Примітка
				Документація загальна		
				Знову розроблена		
А4				Титульний аркуш	1	
А4				Завдання	2	
А4				Анотація	1	
А4				Abstract	1	
А4			СБС 25.G19.02 ПЗ	Пояснювальна записка	65	
				Зміст	2	
				Вступ	4	
				Розділ 1	10	
				Розділ 2	7	
				Розділ 3	11	
				Розділ 4	16	
				Розділ 5. Охорона праці	6	
				Загальні висновки	3	
				General conclusions	2	
				Список використаних джерел	4	
А4			СБС 25.G19.02 ІМ	Ілюстраційні матеріали (мультимедійна презентація)	22	

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	СБС 25.G19.02 ВД			
Розробив		Артемошін О.О.			Вплив комплексу добавок на властивості самоущільнювальних бетонних сумішей Відомість кваліфікаційної магістерської роботи	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірив		Скриннік І.О.				М	1	1
Реценз.						ЦНТУ гр. БІ-25 М		
Н. контр.		Дарієнко В.В.						
Затвердив		Яцун В.В.						

АНОТАЦІЯ

Артемошін О. О. Вплив комплексу хімічних і мінеральних добавок на реологічні та фізико-механічні характеристики самоущільнювальних бетонних сумішей. – Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю G19 «Будівництво та цивільна інженерія». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2026.

Робота присвячена встановленню закономірностей впливу комплексу хімічних (полікарбоксилатних суперпластифікаторів, модифікаторів в'язкості) і мінеральних (золи-винесення, мікрокремнезему, метакаоліну, золи рисового лушпиння, доменного шлаку, вапнякового порошку) добавок на властивості самоущільнювальних бетонів. Проаналізовано вимоги до самоущільнювальних сумішей, принципи підбору їхнього складу і механізми дії добавок. Методом абсолютних об'ємів показано роль об'єму порошку в зростанні розпливу сумішей із золою-винесенням, за розпливом конуса оцінено межу плинності сумішей. Отримано регресійні залежності розпливу і часу t500 від вмісту золи, модель відгуку другого порядку для приросту міцності від вмісту золи і мікрокремнезему, що виявила синергетичний ефект їхньої взаємодії, та визначено раціональну область дозування. Проаналізовано сумісність полікарбоксилатного суперпластифікатора з мінеральними добавками, збереження рухливості суміші в часі та адіабатичний розігрів бетону; отримано модель потреби в суперпластифікаторі для сумішей зі шлаком і цеолітом. Розраховано коефіцієнти ефективності мінеральних добавок за формулою Боломея для двох серій складів і встановлено зв'язок між проникністю для хлоридів і сорбційністю. Розроблено алгоритм і приклад підбору складу самоущільнювального бетону класу С30/37 з потрійним в'яжучим. Розроблено заходи з охорони праці під час виготовлення і укладання самоущільнювального бетону.

Пояснювальна записка містить 65 сторінок, 25 рисунків, 19 таблиць, 30 джерел.

Ключові слова: САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНИЙ БЕТОН, СУПЕРПЛАСТИФІКАТОР, ЗОЛА-ВИНЕСЕННЯ, МІКРОКРЕМНЕЗЕМ, РЕОЛОГІЯ, МЕЖА ПЛИННОСТІ, МІЦНІСТЬ, ПРОНИКНІСТЬ, ОХОРОНА ПРАЦІ.

ABSTRACT

Artemoshin O. O. Influence of a complex of chemical and mineral admixtures on the rheological and physical-mechanical properties of self-compacting concrete mixes. – Master's qualification thesis, specialty G19 "Construction and Civil Engineering". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

The thesis establishes the regularities of the influence of a complex of chemical admixtures (polycarboxylate superplasticizers, viscosity modifying admixtures) and mineral additions (fly ash, silica fume, metakaolin, rice husk ash, ground granulated blast-furnace slag, limestone powder) on the properties of self-compacting concrete. The requirements for SCC, mix design principles and mechanisms of admixture action are analysed. The absolute volume method shows the role of powder volume in the increase of slump flow of fly ash mixes, and the yield stress of the mixes is estimated from the slump flow. Regression relationships of slump flow and t500 versus fly ash content and a second-order response model of the strength gain versus fly ash and silica fume content are obtained; the model reveals a synergistic interaction, and the rational dosage range is determined. The compatibility of polycarboxylate superplasticizer with mineral additions, slump retention and adiabatic temperature rise are analysed, and a model of superplasticizer demand for mixes with slag and zeolite is obtained. Efficiency factors of mineral additions are calculated with Bolomey's formula for two series of mixes, and a relationship between chloride penetrability and sorptivity is established. A mix design algorithm and an example of C30/37 SCC with a ternary binder are given. Occupational safety measures for SCC production and placing are developed.

The explanatory note contains 65 pages, 25 figures, 19 tables and 30 references.

Keywords: SELF-COMPACTING CONCRETE, SUPERPLASTICIZER, FLY ASH, SILICA FUME, RHEOLOGY, YIELD STRESS, STRENGTH, PERMEABILITY.

ЗМІСТ

ВСТУП 3
Розділ 1 СУЧАСНІ УЯВЛЕННЯ ПРО СКЛАД, СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНОГО БЕТОНУ 7
1.1 Визначення та історія розвитку самоущільнювального бетону 7
1.2 Вимоги до властивостей самоущільнювальної бетонної суміші 8
1.3 Принципи підбору складу самоущільнювальної суміші 10
1.4 Хімічні добавки для самоущільнювальних сумішей 12
1.5 Мінеральні добавки та їхня роль у структурі СУБ 13
1.6 Висновки до розділу 1 та задачі дослідження 16
Розділ 2 МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ І ХАРАКТЕРИСТИКА ВИКОРИСТАНИХ МАТЕРІАЛІВ 17
2.1 Методи випробувань самоущільнювальної бетонної суміші 17
2.2 Оцінювання реологічних параметрів за результатами розпливу 18
2.3 Методи випробувань затверділого бетону 19
2.4 Характеристика матеріалів у проаналізованих дослідженнях 20
2.5 Методика обробки даних 22
2.6 Висновки до розділу 2 23
Розділ 3 ВПЛИВ КОМПЛЕКСУ ДОБАВОК НА РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ СУМІШЕЙ 24
3.1 Вплив золи-винесення на розплив і в'язкість суміші 24
3.2 Вплив мікрокремнезему та потрійних комбінацій 26
3.3 Оцінка межі плинності сумішей 27
3.4 Вплив мінеральних добавок на кінетику гідратації 27
3.5 Вплив дозування суперпластифікатора і модифікаторів в'язкості 28
3.6 Сумісність суперпластифікатора з мінеральними добавками 29
3.7 Збереження рухливості суміші в часі 32

3.8 Узагальнення: напрямки впливу компонентів на реологію 32
3.9 Висновки до розділу 3 34
Розділ 4 ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ СУБ З КОМПЛЕКСОМ ДОБАВОК. ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ 35
4.1 Міцність на стиск бінарних і потрійних складів 35
4.2 Модель відгуку та раціональна область дозування золи і мікрокремнезему 37
4.3 Коефіцієнти ефективності мінеральних добавок 38
4.4 Проникність і довговічність 40
4.5 Вплив метакаоліну, золи рисового лушпиння, шлаку і вапнякового порошку 41
4.6 Шлак і природний цеоліт: кінетика міцності та коефіцієнти ефективності 44
4.7 Рання міцність і тепловиділення 45
4.8 Екологічна ефективність комплексу добавок 47
4.9 Алгоритм і приклад підбору складу СУБ з комплексом добавок 47
4.10 Висновки до розділу 4 50
Розділ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ 51
5.1 Особливості умов праці під час виготовлення та укладання СУБ 51
5.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів 51
5.3 Оцінка рівня шуму під час бетонування 53
5.4 Розрахунок повітрообміну у приміщенні дозування мінеральних добавок 54
5.5 Безпека під час роботи з хімічними добавками та електробезпека 55
5.6 Безпека в надзвичайних ситуаціях 55
5.7 Висновки до розділу 5 56
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 57
GENERAL CONCLUSIONS 60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 62

ВСТУП

Актуальність теми. Монолітне будівництво в Україні сьогодні працює в умовах нестачі кваліфікованих робітників, стиснених строків відновлення пошкоджених будівель і зростання вимог до довговічності конструкцій. Густоармовані колони, стіни укриттів, вузли каркасів і конструкції складної форми важко якісно забетонувати звичайною сумішшю: недостатнє вібрування залишає раковини, а надмірне – спричиняє розшарування. Самоущільнювальний бетон (СУБ, англ. self-compacting concrete) розв'язує цю проблему: суміш під дією власної ваги заповнює опалубку, обтікає арматуру і видаляє захоплене повітря без вібрування [1, 2].

Властивості СУБ визначаються не стільки цементом, скільки комплексом добавок. Полікарбоксилатні суперпластифікатори знижують межу плинності суміші, модифікатори в'язкості та тонкодисперсні мінеральні добавки забезпечують її стійкість до розшарування, а пуцоланові та латентно-гідравлічні добавки визначають кінетику тверднення, міцність і проникність бетону [3, 4]. Водночас дія окремих компонентів часто протилежна: мікрокремнезем підвищує міцність, але збільшує в'язкість і потребу в суперпластифікаторі; зола-винесення покращує розплив, але сповільнює ранню гідратацію [5]. Тому вибір раціонального комплексу хімічних і мінеральних добавок залишається практичною задачею, яку технолог розв'язує для конкретних матеріалів.

Для України ця задача має й економічний аспект. Зола-винесення ТЕС, доменний гранульований шлак і вапняковий порошок є доступними вторинними ресурсами, а заміна частини цементу ними зменшує вартість і вуглецевий слід бетону. Українські дослідники показали ефективність суперпластифікованих цементуючих систем з активними мінеральними добавками для СУБ [6, 7, 8], однак узагальнених кількісних залежностей «склад – реологія – міцність» для комплексу добавок у вітчизняній практиці недостатньо.

Отже, аналіз і узагальнення результатів сучасних досліджень впливу комплексу хімічних і мінеральних добавок на реологічні та фізико-механічні характеристики СУБ, отримання на їхній основі розрахункових залежностей і

рекомендацій щодо підбору складу є актуальним науково-практичним завданням.

Мета роботи – встановити закономірності впливу комплексу хімічних (суперпластифікаторів, модифікаторів в'язкості) і мінеральних (золи-винесення, мікрокремнезему, метакаоліну, золи рисового лушпиння, доменного шлаку, вапнякового порошку) добавок на реологічні та фізико-механічні характеристики самоущільнювальних бетонних сумішей і бетонів та розробити рекомендації щодо підбору їхнього складу.

Для досягнення мети поставлено такі **завдання**:

– проаналізувати сучасні уявлення про склад, структуру й вимоги до СУБ і роль хімічних та мінеральних добавок;

– систематизувати методи випробувань СУБ і характеристики мінеральних добавок, що застосовуються в проаналізованих дослідженнях;

– кількісно оцінити вплив добавок на розплив, межу плинності та в'язкість суміші, зокрема через об'ємні параметри тіста;

– оцінити вплив бінарних і потрійних комбінацій добавок на міцність, проникність і усадку бетону, побудувати модель відгуку та визначити раціональну область дозування;

– визначити коефіцієнти ефективності мінеральних добавок і запропонувати алгоритм та приклад підбору складу СУБ;

– розробити заходи з охорони праці під час виготовлення та укладання СУБ.

Об'єкт дослідження – процеси формування реологічних властивостей самоущільнювальних бетонних сумішей і структури бетону, модифікованих комплексом хімічних і мінеральних добавок.

Предмет дослідження – закономірності впливу виду і дозування хімічних та мінеральних добавок на розплив, межу плинності, в'язкість, міцність і проникність самоущільнювального бетону.

Методи дослідження. Аналіз і узагальнення науково-технічної літератури та нормативних документів; статистична обробка опублікованих

експериментальних даних (лінійна регресія, поліноміальна модель відгуку другого порядку); метод абсолютних об'ємів для аналізу складу; розрахунок межі плинності за розпливом конуса; розрахунок коефіцієнтів ефективності мінеральних добавок за формулою Боломея; обчислення мовою Python.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в такому:

– методом абсолютних об'ємів показано, що збільшення розпливу суміші із золою-винесенням (з 660 до 744 мм) пов'язане зі зростанням об'єму порошку на 17 % і зменшенням відношення В/П за об'ємом з 1,10 до 0,94; отримано лінійну залежність розпливу від вмісту золи $D = 661 + 2{,}15 \cdot FA$ ($R^2 = 0{,}99$);

– за даними розпливу оцінено межу плинності сумішей і встановлено, що комплекс «30 % золи + 7,5 % мікрокремнезему» знижує її з 31,7 до 16,2 Па при одночасному зростанні стійкості суміші;

– побудовано модель відгуку другого порядку для приросту міцності від вмісту золи і мікрокремнезему ($R^2 = 0{,}95$), яка виявила позитивний ефект їхньої взаємодії, та визначено раціональну область дозування: зола 23–30 %, мікрокремнезем 7,5–10 % маси в'яжучого;

– визначено коефіцієнти ефективності мінеральних добавок у двох серіях СУБ: для золи-винесення 1,09–1,20, для мікрокремнезему 1,59–1,80, для шлаку і цеоліту – 0,65–0,92 у 28 діб і 0,97–1,56 у 180 діб;

– отримано лінійну модель потреби в суперпластифікаторі для сумішей зі шлаком і цеолітом $ПК = 0{,}98 + 0{,}085 \cdot Ц - 0{,}003 \cdot ГШ$ ($R^2 = 0{,}95$) і кількісно оцінено вплив добавок на дозу насичення ПК і збереження рухливості суміші.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробленому алгоритмі підбору складу СУБ з комплексом добавок, рекомендованих діапазонах дозування і прикладі розрахунку складу класу С30/37, які можуть використовуватися технологами бетонних заводів і будівельних організацій.

Апробація результатів. Основні результати роботи представлено на міжнародній науково-технічній онлайн-конференції «Наука, інженерія та технології: сучасні виклики й перспективи» (Центральноукраїнський

національний технічний університет, м. Кропивницький, 24–25 листопада 2026 р.).

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків українською та англійською мовами і списку використаних джерел. Загальний обсяг – 65 сторінок, у тому числі 25 рисунків, 19 таблиць; список використаних джерел містить 30 найменувань.

Розділ 1
СУЧАСНІ УЯВЛЕННЯ ПРО СКЛАД, СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНОГО БЕТОНУ

1.1 Визначення та історія розвитку самоущільнювального бетону

Самоущільнювальним називають бетон, суміш якого під дією власної ваги розтікається, заповнює опалубку, обтікає арматуру і ущільнюється без вібрування, зберігаючи однорідність [2]. Ідею такого бетону висунув професор Токійського університету Х. Окамура в 1986 році. Її поштовхом стало скорочення кількості кваліфікованих робітників у будівництві Японії і пов'язане з цим погіршення якості ущільнення монолітних конструкцій. Перший прототип СУБ виготовлено 1988 року [1].

Протягом 1990-х років СУБ поширився у збірному та монолітному будівництві Японії, а з кінця десятиліття – у Європі. Першим європейським документом стали «Специфікація і настанови з самоущільнювального бетону» EFNARC (2002), які вперше встановили типові діапазони складу та критерії прийняття сумішей за десятьма методами випробувань [9]. У 2005 році п'ять європейських організацій (BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, EFNARC) видали спільні «Європейські настанови з самоущільнювального бетону» [2], а згодом вимоги до СУБ увійшли до стандарту EN 206, гармонізованого в Україні як ДСТУ EN 206:2018 [10].

В Україні дослідження СУБ ведуться, зокрема, в Національному університеті «Львівська політехніка», де розроблено суперпластифіковані цементуючі системи «портландцемент – активні мінеральні добавки – мікронаповнювачі – суперпластифікатор – прискорювачі тверднення» для бетонування в різних температурних умовах [6, 7], а також досліджено тріщиностійкість і усадку високоміцних СУБ з різними мінеральними модифікаторами [8].

Ще раніше, у 2008 році, у Львівській політехніці було показано, що самоущільнювальні бетони разом з високоміцними, фібробетонами і бетонами з

реактивних порошків належать до групи високофункціональних бетонів (High Performance Concrete), а основою їх отримання є багатокомпонентні в'яжучі та комплексні модифікатори на основі полікарбоксилатів [11]. Логічним розвитком цього напряму є надвисокоміцний фібробетон (UHPC) з міцністю 100–220 МПа, суміш якого, як правило, також самоущільнювальна. Для таких бетонів уже розробляють власні розрахункові моделі конструкцій: наприклад, для продавлювання двобічно армованих плит з UHPC показано, що несуча здатність зростає зі збільшенням міцності бетону, товщини плити і коефіцієнта армування [12]. Отже, керування реологією суміші за допомогою добавок відкриває шлях до матеріалів, які змінюють і підходи до проєктування конструкцій.

Основні переваги та обмеження СУБ, узагальнені за [1, 2, 9], наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Переваги та обмеження самоущільнювального бетону

Переваги	**Обмеження**
бетонування без вібрування, якісне заповнення густоармованих і складних конструкцій	вища вартість 1 м³ через більшу витрату порошку і хімічних добавок
зменшення трудомісткості та кількості робітників на укладанні	висока чутливість до коливань вологості заповнювачів і дозування добавок
зниження шуму і усунення вібраційного навантаження на працівників	підвищений тиск суміші на опалубку
якісна поверхня без раковин, можливість архітектурного бетону	потреба в ретельному догляді через схильність до пластичної усадки
скорочення тривалості бетонування	потреба в кваліфікованому лабораторному контролі на заводі

1.2 Вимоги до властивостей самоущільнювальної бетонної суміші

Придатність суміші до самоущільнення описують чотирма характеристиками: здатністю до заповнення (розплив), в'язкістю (швидкістю течії), здатністю проходити крізь арматуру та стійкістю до розшарування [2]. Для кожної з них встановлено класи, наведені в табл. 1.2. Методи випробувань регламентовано серією EN 12350 (частини 8–12) [13], а їхній вибір і критерії прийняття вперше систематизовано в настановах EFNARC [9].

Таблиця 1.2

Класи самоущільнювальних бетонних сумішей за [2, 10]

Характеристика	**Клас**	**Критерій**
Розплив конуса	SF1 / SF2 / SF3	550–650 / 660–750 / 760–850 мм
В'язкість за t_{500}	VS1 / VS2	≤ 2 с / > 2 с
В'язкість за V-лійкою	VF1 / VF2	≤ 8 с / 9–25 с
Здатність проходити крізь арматуру (L-скриня)	PA1 / PA2	$H_2/H_1 \geq 0{,}80$ з 2 / 3 стрижнями
Стійкість до розшарування (ситовий тест)	SR1 / SR2	≤ 20 % / ≤ 15 %

Клас SF1 застосовують для слабкоармованих конструкцій, що бетонуються зверху (плити, фундаменти), SF2 – для більшості звичайних стін і колон, SF3 – для густоармованих і вертикальних конструкцій складної форми [2]. Клас VS2/VF2 означає вищу в'язкість, яка зменшує тиск на опалубку та ризик розшарування, але може погіршити якість поверхні.

З погляду реології СУБ – в'язкопластичне тіло, течію якого наближено описують моделлю Бінгама:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma}, \tag{1.1}$$

де τ – напруження зсуву, Па; τ_0 – межа плинності, Па; μ – пластична в'язкість, Па·с; $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, $с^{-1}$.

Для СУБ межа плинності має бути дуже малою (порядку десятків паскалів), щоб суміш розтікалася під власною вагою, тоді як в'язкість має залишатися достатньою, щоб крупний заповнювач не осідав і не відставав від розчину біля арматури [1, 14]. Тобто СУБ поєднує дві протилежні вимоги – високу текучість і високу зв'язність. На рис. 1.1 схематично показано відмінність кривих течії звичайної суміші та СУБ.

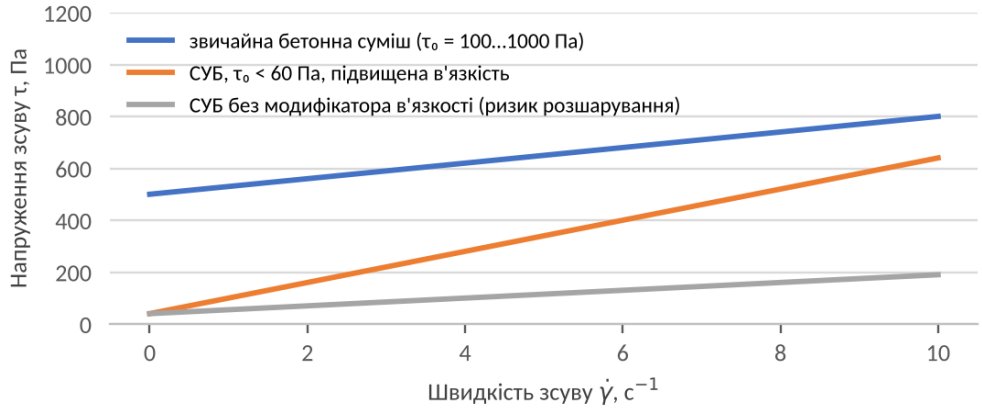

Рис. 1.1 Криві течії звичайної бетонної суміші та СУБ (схема складено автором за [1, 14])

Якщо межу плинності знижено лише суперпластифікатором без підвищення в'язкості, суміш добре розтікається, але розшаровується (пунктирна лінія на рис. 1.1). Тому другим обов'язковим компонентом СУБ є підвищений вміст тонкодисперсного порошку або модифікатор в'язкості.

1.3 Принципи підбору складу самоущільнювальної суміші

Х. Окамура сформулював три принципи складу СУБ: обмеження вмісту крупного заповнювача, зниження відношення води до порошку і застосування суперпластифікатора [1]. Обмеження крупного заповнювача зменшує тертя і контакти між зернами, які спричиняють блокування суміші біля арматури; зниження В/П підвищує в'язкість тіста і стійкість до розшарування; суперпластифікатор повертає текучість, втрачену через низький вміст води. Типові діапазони складу за європейськими настановами наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Типові діапазони складу СУБ за [2]

Компонент	**Діапазон**
Порошок (цемент + мінеральні добавки < 0,125 мм), кг/м³	380–600
Тісто, л/м³	300–380
Вода, кг/м³	150–210
Крупний заповнювач, % об'єму	28–35
Відношення вода/порошок за об'ємом	0,85–1,10
Пісок, % об'єму розчину	40–50

Для ілюстрації автором розраховано об'ємний склад контрольної суміші з дослідження [4] (450 кг цементу, 157,5 кг води, 929 кг піску, 858 кг щебеню на 1 м³) методом абсолютних об'ємів (рис. 1.2). Об'єм тіста становить 325 л/м³, крупний заповнювач – 32 % об'єму, В/П за об'ємом – 1,10, тобто суміш відповідає табл. 1.3.

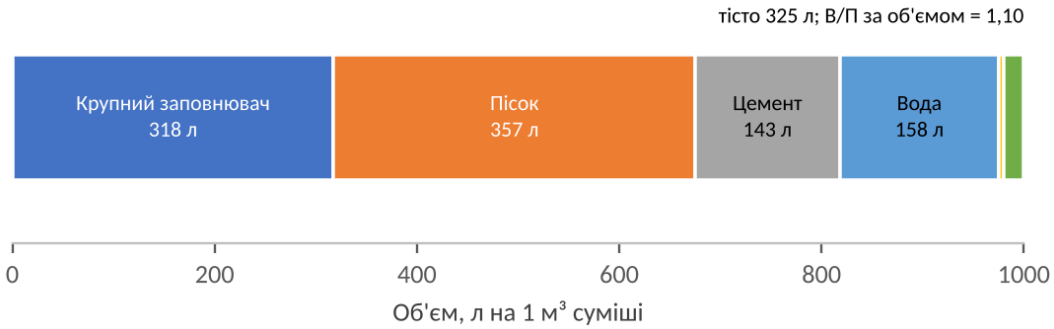

Рис. 1.2 Об'ємний склад 1 м³ контрольної СУБ (розрахунок автора за даними [4])

За способом забезпечення стійкості розрізняють три типи СУБ [1, 2]: порошковий (стійкість досягається високим вмістом порошку і низьким В/П), з модифікатором в'язкості (VMA, англ. viscosity modifying admixture; вміст порошку менший, стійкість дає VMA) та комбінований. Порошковий тип найпоширеніший у Європі та Японії; його недоліками є висока витрата цементу і чутливість до вологості піску. Тому саме мінеральні добавки, які частково замінюють цемент у складі порошку, є ключем до економічного СУБ.

Окрім рецептурних, існують і технологічні способи впливу на реологію. Одеські дослідники запропонували інтенсивну роздільну технологію, у якій цементно-водну суспензію з суперпластифікатором спочатку піддають високошвидкісному механоактиваційному перемішуванню, а потім змішують із заповнювачами. Таке перемішування зменшує ефективну в'язкість суспензії до 30 разів, збільшує вміст хімічно зв'язаної води в цементному камені марочного віку з 13,1 до 17,9 %, підвищує міцність бетону в першу добу в 1,8–2 рази, а у 28 діб – на 25–30 % і дає змогу замінити до 40 % цементу меленим кварцовим піском [15]. Для СУБ, у якому вміст порошку великий, такий прийом є резервом зменшення витрати цементу без втрати текучості.

1.4 Хімічні добавки для самоущільнювальних сумішей

Класифікацію добавок, що входять до комплексу для СУБ, наведено на рис. 1.3.

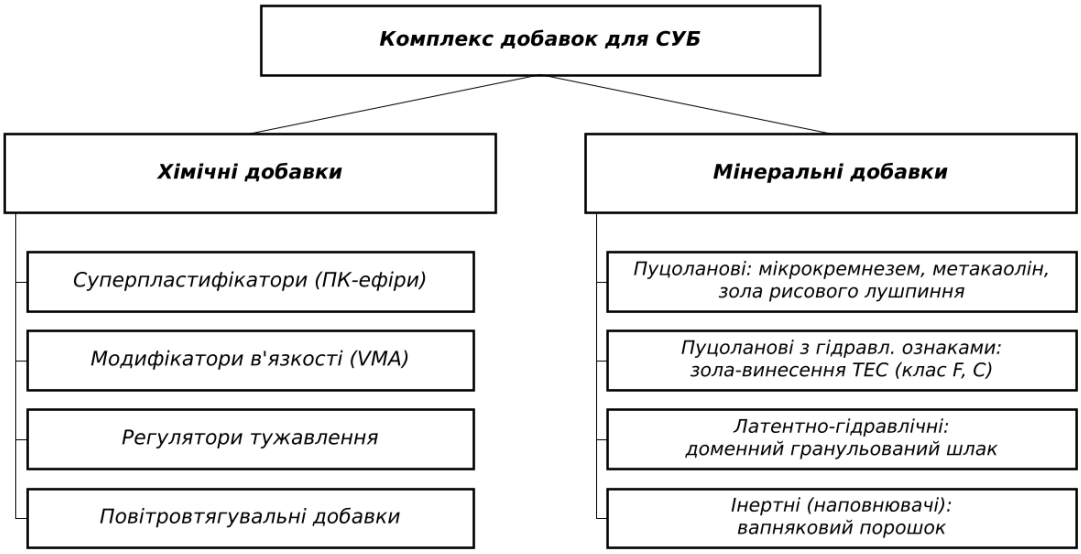

Рис. 1.3 Класифікація добавок для самоущільнювального бетону (складено автором)

Суперпластифікатори. Створення СУБ стало можливим завдяки полікарбоксилатним суперпластифікаторам (ПК). Молекула ПК – це гребенеподібний полімер з аніонним основним ланцюгом, який адсорбується на позитивно заряджених ділянках частинок цементу, і бічними поліетерними ланцюгами, які створюють стеричний (просторовий) бар'єр між частинками. На відміну від нафталінсульфонатів, дія яких ґрунтується переважно на електростатичному відштовхуванні, ПК діють за менших дозувань і довше зберігають рухливість суміші [3, 16].

Еволюцію пластифікаторів зручно розглядати за поколіннями [11]. Лігносульфонати (перше покоління) утворюють на зернах цементу «змащувальний шар» і мають слабкий пластифікувальний ефект; нафталін- і меламінформальдегідні суперпластифікатори (друге покоління) діють електростатично і чутливі до передозування; полікарбоксилати діють стерично. За даними [11], полікарбоксилати мають найбільший водоредукувальний ефект (25–40 %), утворюють на частинках цементу адсорбційний шар товщиною

близько 16 нм, що втричі більше, ніж для нафталінформальдегідних добавок, а при дозуванні 0,5–1,0 % відтягують початок і кінець тужавлення на 40–60 і 70–90 хв. Саме тому для СУБ придатні насамперед полікарбоксилатні суперпластифікатори та їхні ефіри.

Дослідження впливу дозування ПК на реологію цементного тіста [16] показало, що статична межа плинності знижується з 1313 Па без добавки до 793 Па при 0,1 % і до 120–126 Па при 0,2–0,3 % маси в'яжучого, а пластична в'язкість – з 5,56 до 3,61–4,35 Па·с. Подальше підвищення дозування понад 0,4 % майже не змінює межу плинності – настає насичення адсорбції. Важливо, що зі збільшенням тривалості витримування межа плинності знову зростає через структуроутворення, тому для збереження розпливу під час транспортування використовують ПК із уповільненою адсорбцією або двостадійне введення.

Модифікатори в'язкості (VMA). Це водорозчинні полімери природного (велановий, діутановий, гуаровий гуми, похідні крохмалю), напівсинтетичного (ефіри целюлози) або синтетичного (поліакриламід, поліакрилати) походження [3]. Механізм їхньої дії полягає у зв'язуванні води водневими зв'язками, адсорбції на частинках з утворенням містків та переплетенні ланцюгів у просторову сітку. Наслідком є зменшення водовідділення і розшарування. Огляд [3] наголошує, що пластична в'язкість чутливіша до VMA, ніж межа плинності, а ефіри целюлози можуть конкурувати з ПК за адсорбцію і знижувати його ефективність. Ефіри целюлози і поліакриламід, як правило, зменшують міцність на стиск, тому дозування VMA має бути мінімально необхідним.

Інші хімічні добавки. До комплексу можуть входити регулятори тужавлення (для зимового бетонування – прискорювачі [6]), повітровтягувальні добавки для морозостійких бетонів та добавки, що зменшують усадку.

1.5 Мінеральні добавки та їхня роль у структурі СУБ

Мінеральні добавки в СУБ виконують одночасно три функції: збільшують об'єм тонкодисперсної фази (фізична роль наповнювача), змінюють гранулометрію і форму частинок порошку (реологічна роль) та взаємодіють з

продуктами гідратації цементу (хімічна роль). Характеристики основних добавок наведено в табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Характеристики мінеральних добавок для СУБ (узагальнено автором за [4, 5, 17, 18])

Добавка	**Густина, г/см³**	**Розмір частинок**	**Активність**	**Основний вплив**
Зола-винесення (клас F)	2,0–2,2	1–100 мкм, сферичні	пуцоланова, повільна	покращує розплив, знижує тепловиділення, підвищує пізню міцність
Мікрокремнезем	2,1–2,3	< 1 мкм	висока пуцоланова	ущільнює структуру, підвищує міцність і стійкість, збільшує в'язкість
Метакаолін	2,5–2,6	1–5 мкм, пластинчасті	висока пуцоланова	підвищує ранню міцність, зменшує проникність, збільшує водопотребу
Зола рисового лушпиння	2,0–2,2	пориста	пуцоланова	підвищує міцність, збільшує водопотребу

Продовження таблиці 1.4

Добавка	Густина, г/см³	Розмір частинок	Активність	Основний вплив
Доменний шлак	2,8–2,9	5–30 мкм	латентно-гідравлічна	знижує тепловиділення, підвищує стійкість до агресивних середовищ
Вапняковий порошок	2,7	3–50 мкм	практично інертна	наповнювач, прискорює ранню гідратацію, утворює карбоалюмінати

Зола-винесення завдяки сферичній формі частинок діє як «кулькові підшипники» і зменшує тертя між зернами, тому покращує розплив при тому самому вмісті води. Її пуцоланова реакція повільна, тож внесок у міцність проявляється переважно після 28 діб [4].

Мікрокремнезем має частинки приблизно у 100 разів менші за частинки цементу. Вони заповнюють простір між зернами цементу і слугують центрами кристалізації, тому прискорюють гідратацію і ущільнюють перехідну зону між заповнювачем і цементним каменем [5]. Висока питома поверхня збільшує водопотребу і в'язкість суміші.

Метакаолін і **зола рисового лушпиння** – високоактивні пуцолани. Їхня ефективність для СУБ доведена в роботах [17, 19].

Доменний шлак і **вапняковий порошок** найчастіше використовують разом: шлак забезпечує пізню міцність, а вапняк – ранню гідратацію та утворення моно- і гемікарбоалюмінатів [18, 20].

Узагальнення понад сорока публікацій в огляді [21] дає таку загальну картину впливу мінеральних добавок на реологію СУБ: зола-винесення завдяки ефекту «кулькових підшипників» підвищує текучість і зменшує потребу в суперпластифікаторі; доменний шлак покращує реологію завдяки ефекту заповнення і повільнішій реакції; мікрокремнезем і метакаолін через велику питому поверхню підвищують і межу плинності, і пластичну в'язкість, збільшуючи потребу у воді та суперпластифікаторі; вапняковий порошок збільшує розплив і зменшує в'язкість. Автори огляду наголошують, що результати різних досліджень часто суперечать один одному, оскільки залежать

від виду цементу, суперпластифікатора і класу золи, тому кожен склад потребує власного підбору [21]. Звіт Університету Південної Флориди для дорожнього департаменту штату [22] додає, що пуцоланові добавки в більшості сумішей уповільнюють тужавлення, найбільшу ранню міцність дає метакаолін, а найкращу сульфатостійкість – мікрокремнезем.

1.6 Висновки до розділу 1 та задачі дослідження

1. СУБ є в'язкопластичною системою, яка має поєднувати низьку межу плинності (десятки паскалів) і достатню пластичну в'язкість. Ці протилежні вимоги задовольняються лише комплексом добавок: суперпластифікатор знижує межу плинності, а тонкодисперсні мінеральні добавки або VMA забезпечують стійкість суміші.

2. Вимоги до суміші сформульовано в класах SF, VS/VF, PA і SR (EN 206, Європейські настанови), а типовий склад передбачає 380–600 кг/м³ порошку, 300–380 л/м³ тіста і 28–35 % крупного заповнювача.

3. Мінеральні добавки відрізняються механізмом дії (фізичний, пуцолановий, латентно-гідравлічний), тому їхні комбінації можуть давати синергетичний ефект. Кількісних узагальнень такого ефекту для комплексу добавок недостатньо.

Звідси випливають задачі роботи: систематизувати методи випробувань і матеріали (розділ 2), кількісно оцінити вплив добавок на реологію (розділ 3) та на фізико-механічні й експлуатаційні властивості з визначенням раціонального складу (розділ 4).

Розділ 2
МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ І ХАРАКТЕРИСТИКА ВИКОРИСТАНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1 Методи випробувань самоущільнювальної бетонної суміші

Властивості СУБ у свіжому стані визначають стандартизованими методами серії EN 12350 [9, 13], схеми основних приладів показано на рис. 2.1.

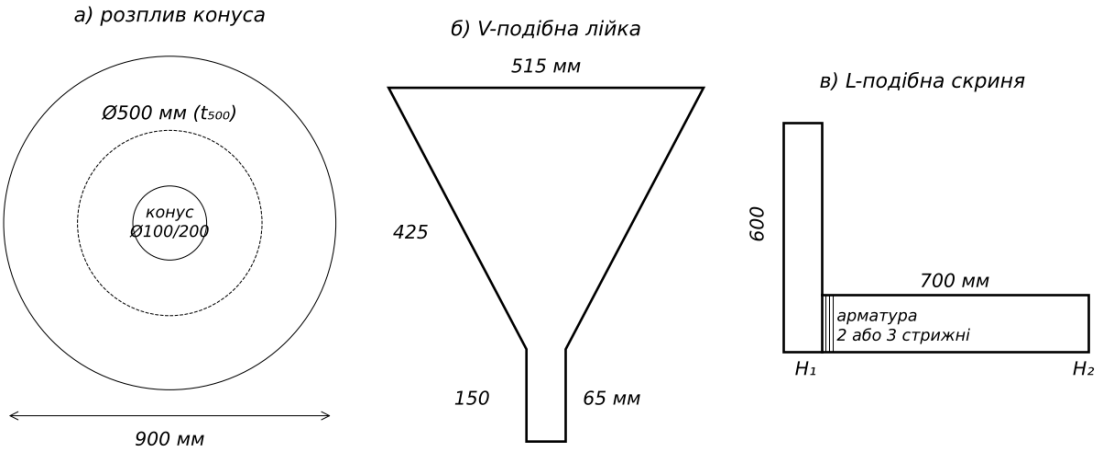

Рис. 2.1 Схеми приладів для випробування СУБ: а – розплив конуса; б – V-подібна лійка; в – L-подібна скриня (складено автором за [2, 13])

Розплив конуса (slump-flow) [13]. Конус Абрамса (висота 300 мм, діаметри 100 і 200 мм) встановлюють на рівну плиту розміром не менше 900×900 мм, заповнюють сумішшю без ущільнення і піднімають. Вимірюють діаметр розпливу D у двох перпендикулярних напрямках і час t_{500}, за який суміш досягає кола діаметром 500 мм. Розплив характеризує здатність до заповнення, t_{500} – в'язкість. Одночасно візуально оцінюють, чи не утворюється по краю розпливу кільце розчину без щебеню.

V-подібна лійка [9]. Лійку об'ємом близько 10 л заповнюють сумішшю, відкривають нижній отвір 65×75 мм і вимірюють час витікання t_v. Він характеризує в'язкість і здатність суміші проходити крізь звуження. Повторне випробування через 5 хв виявляє схильність до розшарування.

L-подібна скриня [9]. Суміш з вертикальної частини після відкриття засувки протікає крізь ряд з двох або трьох стрижнів у горизонтальну частину.

Відношення висот суміші на кінці і на початку горизонтальної частини H_2/H_1 характеризує здатність проходити крізь арматуру; за $H_2/H_1 \geq 0{,}80$ суміш відповідає класу PA1 або PA2.

Окрім того, застосовують випробування J-кільцем (частина 12) і ситовий тест на розшарування (частина 11) [2].

Критерії прийняття для основних методів у першій європейській специфікації [9] та їх відповідність класам Європейських настанов [2] порівняно в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Критерії прийняття самоущільнювальної суміші (складено автором за [2, 9])

Метод	**EFNARC 2002**	**Європейські настанови 2005**
Розплив конуса, мм	650–800	класи SF1 550–650, SF2 660–750, SF3 760–850
Час t_{500}, с	2–5	VS1 ≤ 2; VS2 > 2
V-лійка, с	6–12	VF1 ≤ 8; VF2 9–25
Приріст часу V-лійки через 5 хв, с	0…+3	–
L-скриня, H_2/H_1	0,8–1,0	PA1, PA2 ≥ 0,80
J-кільце, мм	0–10	–
Ситовий тест, %	0–15	SR1 ≤ 20; SR2 ≤ 15

Порівняння показує, що специфікація 2002 року задавала один «коридор» придатності, а настанови 2005 року перейшли до класів, які призначають залежно від виду конструкції. Наприклад, суміш із розпливом 680 мм і t_{500} = 1,8 с за EFNARC 2002 не пройшла б критерій $t_{500} \geq 2$ с, а за настановами 2005 року вона є повноцінною сумішшю класів SF2 і VS1. Для типового складу EFNARC 2002 рекомендує В/П за об'ємом 0,80–1,10, порошку 400–600 кг/м³ (160–240 л/м³), крупного заповнювача 28–35 % об'єму і води не більше 200 л/м³ [9], що узгоджується з табл. 1.3.

2.2 Оцінювання реологічних параметрів за результатами розпливу

Межу плинності і в'язкість точно вимірюють ротаційними віскозиметрами, однак на виробництві такі прилади рідко доступні. Н. Руссель і Ф. Куссо показали, що в режимі «розтікання», коли товщина шару суміші мала порівняно

з діаметром, межу плинності можна оцінити за кінцевим діаметром розпливу [23]:

$$\tau_0 = 225 \cdot \rho \cdot g \cdot \Omega^2 / (128 \cdot \pi^2 \cdot R^5), \quad (2.1)$$

де ρ – густина суміші, кг/м³; g = 9,81 м/с² – прискорення вільного падіння; Ω – об'єм суміші в конусі (для конуса Абрамса $\Omega = 5{,}5 \cdot 10^{-3}$ м³); R – радіус розпливу, м.

Автором за формулою (2.1) побудовано залежність τ_0 від діаметра розпливу (рис. 2.2). Для класу SF1 межа плинності становить 34–79 Па, для SF2 – 16–32 Па, для SF3 – 9–15 Па. Результат узгоджується з критерієм Окамури (τ_0 < 60 Па) [1]: межу 60 Па перевищують лише суміші з розпливом менше приблизно 580 мм. Вплив густини суміші в практичному діапазоні 2250–2350 кг/м³ не перевищує 5 %. Формулою (2.1) у розділі 3 скористаємося для оцінки межі плинності сумішей з різними добавками.

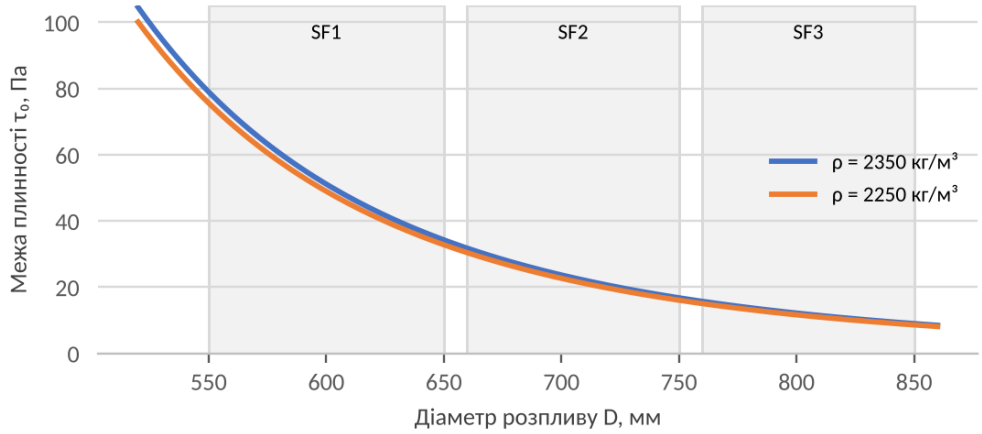

Рис. 2.2 Залежність межі плинності від діаметра розпливу (розрахунок автора за формулою (2.1))

Для оцінки в'язкості використовують t_{500} і t_v: чим вони більші, тим вища пластична в'язкість. Пряма кількісна відповідність між ними залежить від складу суміші, тому в роботі їх використано як порівняльні показники.

2.3 Методи випробувань затверділого бетону

Міцність на стиск визначають на кубах 150 мм або циліндрах за EN 12390-3; міцність на розтяг при розколюванні – на циліндрах, на розтяг при згині – на

призмах. Експлуатаційні властивості в проаналізованих дослідженнях оцінено такими показниками:

– водопоглинання і пористість (вимірювання маси насичених і висушених зразків);

– початкова сорбційність – швидкість капілярного всмоктування води, мм/√хв [4];

– проникність для хлорид-іонів за прискореним методом (RCPT): заряд, що пройшов через диск бетону за 6 год при напрузі 60 В; заряд понад 4000 Кл відповідає високій проникності, 2000–4000 Кл – помірній, 1000–2000 Кл – низькій, 100–1000 Кл – дуже низькій [4];

– швидкість проходження ультразвуку, км/с (чим вища, тим щільніша структура);

– усадка при висиханні, мм/м [8];

– тепловиділення під час гідратації за ізотермічною калориметрією [5, 18].

2.4 Характеристика матеріалів у проаналізованих дослідженнях

Для узагальнення відібрано одинадцять досліджень, виконаних за порівнянними методиками з контрольним складом без добавок (табл. 2.2). Перевагу надано роботам з відкритими числовими даними. Дані про склади і властивості взято безпосередньо з джерел; власні обчислення автора позначено окремо.

Таблиця 2.2

Характеристика проаналізованих досліджень

Джерело	Об'єкт	Змінні параметри	Основні показники
Padavala et al., 2025 [4]	СУБ, в'яжуче 450 кг/м³, В/В 0,35	зола 0–40 %, мікрокремнезем 0–10 % і їх комбінації (10 складів)	розплив, t_{500}, V-лійка, L-скриня, міцність 28–180 діб, сорбційність, RCPT, ультразвук
Begentayev et al., 2025 [5]	розчин з ПК	мікрокремнезем і зола 5–15 %	реологія, калориметрія
Wang et al., 2026 [16]	цементне тісто	дозування ПК 0–0,8 %	межа плинності, в'язкість, міцність

Продовження таблиці 2.2

Джерело	Об'єкт	Змінні параметри	Основні показники
Gill, Siddique, 2017–2019 [17, 19]	СУБ	метакаолін 5–15 %, зола рисового лушпиння 10–30 %	міцність до 365 діб, довговічність
Thongsanitgarn et al., 2026 [18]	цементний камінь	шлак і вапняк, разом 30 %	тепловиділення, міцність
Троян, Кіндрась, 2021 [8]	високоміцний СУБ, В/Ц 0,3	4 модифікатори по 10 %	усадка, міцність, тріщиностійкість
Bayat et al., 2020 [20]	СУБ, в'яжуче 450 кг/м³, В/В 0,4	шлак 20–40 %, цеоліт 5–15 % і їх комбінації (10 складів)	потреба в ПК, розплив, t_{500}, V-лійка, міцність 7–180 діб
Nayak et al., 2022 [24]	цементне тісто	мікрокремнезем 10 %, зола 30 %, шлак 50 %; В/В 0,40–0,60	доза насичення ПК (конус Марша)
Саницький та ін., 2008 [11]	бетон, ПЦ І-500	вид пластифікатора, комплексний модифікатор	збереження рухливості, міцність 3–28 діб
Zayed et al., 2016 [22]	паста, розчин, бетон	зола, мікрокремнезем, шлак, метакаолін	тепловиділення, адіабатичний розігрів, сульфатостійкість
Барабаш та ін., 2022 [15]	цементно-водні композиції, бетон	механоактивація цементу з суперпластифікатором	в'язкість, зв'язана вода, міцність

Найбільш повним є дослідження [4], у якому всі склади мали однакову масу в'яжучого (450 кг/м³), води (157,5 кг/м³), заповнювачів і ПК (1,2 % маси в'яжучого, 5,4 кг/м³). Цемент – портландцемент класу 53 за індійським стандартом (близький до CEM I 52,5), зола-винесення класу F густиною 2,20 г/см³ з Віджаявадської ТЕС, ущільнений мікрокремнезем густиною 2,10 г/см³ з вмістом аморфного SiO_2 понад 90 %, щебінь гранітний фракцій 20 і 12 мм у співвідношенні 60:40, пісок річковий. Склади наведено в табл. 2.3. У роботі прийнято такі позначення складів: К – контрольний; ЗВ – із золою-винесенням, МК – з мікрокремнеземом, число після літер – вміст добавки у відсотках маси в'яжучого (наприклад, ЗВ30МК7,5 – 30 % золи і 7,5 % мікрокремнезему).

Таблиця 2.3

Склади СУБ у дослідженні [4], кг/м³ (позначення – автора)

Склад	Цемент	Зола	Мікро-кремнезем	Зола, %	МК, %	ПК
К	450,0	0	0	0	0	5,4
ЗВ20	360,0	90,0	0	20	0	5,4

Продовження таблиці 2.3

Склад	Цемент	Зола	Мікро-кремнезем	Зола, %	МК, %	ПК
ЗВ30	315,0	135,0	0	30	0	5,4
ЗВ40	270,0	180,0	0	40	0	5,4
МК5	427,5	0	22,5	0	5	5,4
МК7,5	416,25	0	33,75	0	7,5	5,4
МК10	405,0	0	45,0	0	10	5,4
ЗВ30МК5	292,5	135,0	22,5	30	5	5,4
ЗВ30МК7,5	281,25	135,0	33,75	30	7,5	5,4
ЗВ30МК10	270,0	135,0	45,0	30	10	5,4

Слід зазначити, що в методиці [4] водов'яжуче відношення в одному місці вказано 0,35, в іншому – 0,40; за масами компонентів (157,5/450) воно дорівнює 0,35, і саме це значення використано в розрахунках автора. Таку перевірку первинних даних автор вважає обов'язковою під час використання опублікованих результатів.

2.5 Методика обробки даних

Опубліковані дані оброблено в такому порядку:

– перевірка внутрішньої узгодженості (маси компонентів, відношення, відсотки до контрольного складу);

– розрахунок об'ємних параметрів складу методом абсолютних об'ємів;

– оцінка межі плинності за формулою (2.1);

– побудова регресійних залежностей методом найменших квадратів з оцінкою коефіцієнта детермінації R^2;

– побудова моделі відгуку другого порядку і пошук максимуму в області експериментальних даних;

– розрахунок коефіцієнтів ефективності мінеральних добавок за формулою Боломея (розділ 4).

Розрахунки виконано мовою Python (бібліотеки NumPy, Matplotlib).

2.6 Висновки до розділу 2

1. Властивості самоущільнювальної суміші оцінюють за розпливом конуса і t_{500}, часом витікання з V-лійки, відношенням висот у L-скрині та ситовим тестом за EN 12350-8…12; затверділого бетону – за міцністю, сорбційністю, проникністю для хлоридів, усадкою.

2. Межу плинності суміші можна наближено оцінити за діаметром розпливу (формула Русселя–Куссо); для класу SF2 вона становить 16–32 Па.

3. Для узагальнення відібрано одинадцять досліджень з відкритими даними; основою кількісного аналізу є дві серії по десять складів СУБ з однаковою масою в'яжучого – із золою і мікрокремнеземом [4] та зі шлаком і цеолітом [20], у яких перевірено узгодженість первинних даних.

Розділ 3

ВПЛИВ КОМПЛЕКСУ ДОБАВОК НА РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ САМОУЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ СУМІШЕЙ

3.1 Вплив золи-винесення на розплив і в'язкість суміші

У дослідженні [4] заміна 20, 30 і 40 % цементу золою-винесенням за незмінних масах води та ПК збільшила розплив конуса з 660 до 705, 730 і 744 мм, а час t_{500} зменшився з 3,6 до 3,2, 2,9 і 2,7 с. Автором виконано регресійну обробку цих даних (рис. 3.1). Отримано залежності:

$$D = 661 + 2{,}15 \cdot FA,\ R^2 = 0{,}99, \tag{3.1}$$

$$t_{500} = 3{,}61 - 0{,}023 \cdot FA,\ R^2 = 0{,}99, \tag{3.2}$$

де D – розплив конуса, мм; t_{500} – час розпливу до 500 мм, с; FA – вміст золи-винесення, % маси в'яжучого.

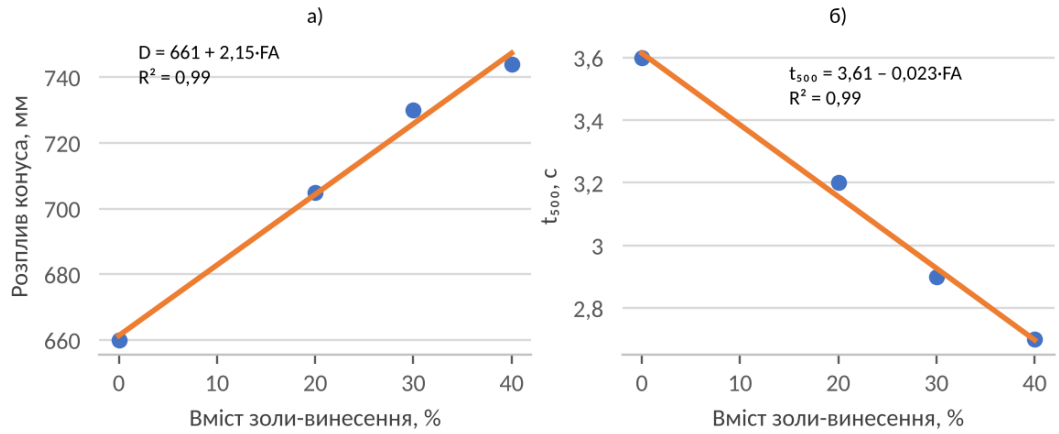

Рис. 3.1 Залежність розпливу конуса (а) і часу t_{500} (б) від вмісту золи-винесення (регресія автора за даними [4])

Отже, кожні 10 % золи збільшують розплив приблизно на 21 мм і зменшують t_{500} на 0,23 с. Суміш із 40 % золи наблизилася до верхньої межі класу SF2 (750 мм). На зростанні вмісту золи понад 30 % приріст розпливу сповільнюється (з 2,25 мм/% між 0 і 20 % до 1,4 мм/% між 30 і 40 %), тобто лінійна залежність (3.1) є апроксимацією в межах 0–40 %. Під час випробування на L-скрині відношення H_2/H_1 зросло з 0,85 для контрольного складу до 0,90–0,92 для складів із золою, а час витікання з V-лійки для ЗВ30 становив 9,0 с [4].

Пояснення цього ефекту зазвичай зводять до сферичної форми частинок золи. На думку автора, не менш важливим є об'ємний чинник, який при заміні цементу «за масою» часто не враховують. Густина золи (2,20 г/см³) значно менша за густину цементу (3,15 г/см³), тому заміна 1 кг цементу на 1 кг золи збільшує об'єм порошку на 0,14 л. Розрахунок методом абсолютних об'ємів для всіх складів [4] наведено в табл. 3.1 і на рис. 3.2.

Таблиця 3.1

Об'ємні параметри складів СУБ (розрахунок автора за даними [4])

Склад	Об'єм порошку, л/м³	Об'єм тіста, л/м³	В/П за об'ємом
К	142,9	305,4	1,10
ЗВ20	155,2	317,7	1,01
ЗВ30	161,4	323,9	0,98
ЗВ40	167,5	330,0	0,94
МК5	146,4	308,9	1,08
МК7,5	148,2	310,7	1,06
МК10	150,0	312,5	1,05
ЗВ30МК5	164,9	327,4	0,96
ЗВ30МК7,5	166,7	329,2	0,94
ЗВ30МК10	168,5	331,0	0,94

Примітка: об'єм тіста включає воду і ПК, без захопленого повітря.

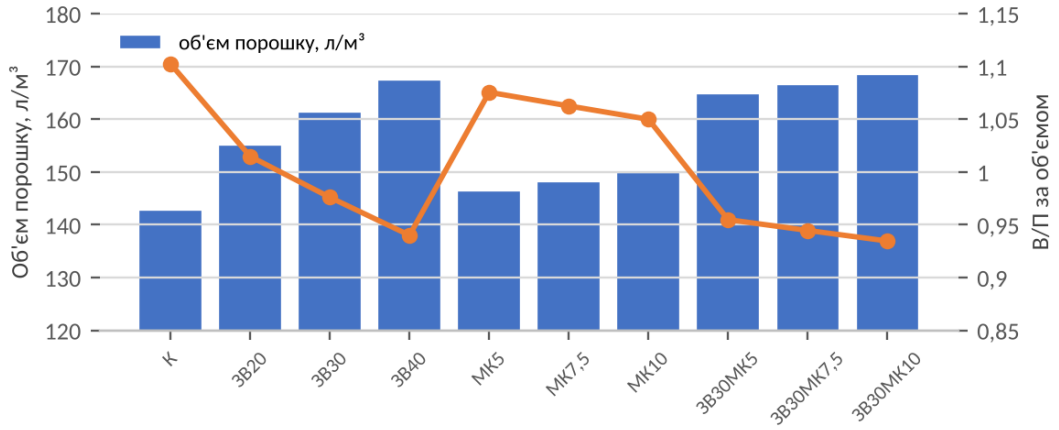

Рис. 3.2 Об'єм порошку та відношення В/П за об'ємом у складах СУБ (розрахунок автора за даними [4])

Із табл. 3.1 видно, що при 40 % золи об'єм порошку зростає на 17 %, а об'єм тіста – на 25 л/м³. Збільшення об'єму тіста за незмінного об'єму заповнювачів розсуває зерна заповнювача, зменшує їхню взаємодію і, відповідно, межу плинності. Водночас В/П за об'ємом зменшується з 1,10 до 0,94 – а це, за

принципами Окамури [1], мало б підвищувати в'язкість. Те, що t_{500} натомість зменшився, свідчить: зола в суміші з ПК діє як тонкий «змащувальний» компонент, що компенсує зниження В/П. Практичний висновок полягає в тому, що порівнювати склади з різними мінеральними добавками коректніше за об'ємом порошку, а не за його масою.

3.2 Вплив мікрокремнезему та потрійних комбінацій

Мікрокремнезем діє протилежно. За тієї самої маси в'яжучого заміна 5–10 % цементу мікрокремнеземом зменшила розплив з 685 до 670 мм і збільшила t_{500} з 3,8 до 4,6 с, а час витікання з V-лійки для МК10 зріс до 11,9 с, тобто суміш перейшла до класу в'язкості VF2 [4]. Хоча об'єм порошку за заміни 10 % цементу мікрокремнеземом зростає лише на 5 % (табл. 3.1), його питома поверхня у десятки разів більша за цементну, тож він зв'язує більше води і частину ПК.

Найцікавішим є результат потрійних складів. Суміш ЗВ30МК7,5 мала найбільший розплив (755 мм – на межі класів SF2 і SF3), t_{500} = 3,3 с, час V-лійки 9,4 с і найкраще відношення H_2/H_1 = 0,94 [4]. Отже, зола компенсує загущувальну дію мікрокремнезему, а мікрокремнезем – схильність суміші із золою до розшарування. Порівняння показників свіжих сумішей із класами EN 206 / Європейських настанов наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Властивості свіжих сумішей і їхні класи (дані [4], класифікація автора)

Склад	D, мм	t_{500}, с	V-лійка, с	H_2/H_1	Класи
К	660	3,6	–	0,85	SF2, VS2, PA
ЗВ20	705	3,2	–	0,90–0,92	SF2, VS2, PA
ЗВ30	730	2,9	9,0	0,90–0,92	SF2, VS2, VF2, PA
ЗВ40	744	2,7	–	0,90–0,92	SF2, VS2, PA
МК5…МК10	685…670	3,8…4,6	11,9 (МК10)	0,86–0,88	SF2, VS2, VF2, PA
ЗВ30МК7,5	755	3,3	9,4	0,94	SF2/SF3, VS2, VF2, PA

Примітка: «–» – значення в джерелі не наведено.

3.3 Оцінка межі плинності сумішей

За формулою (2.1) при густині суміші 2350 кг/м³ автором оцінено межу плинності сумішей, для яких відомий розплив (рис. 3.3). Для складів МК5 і МК10 використано межі діапазону розпливу 685 і 670 мм, оскільки в джерелі він наведений для серії.

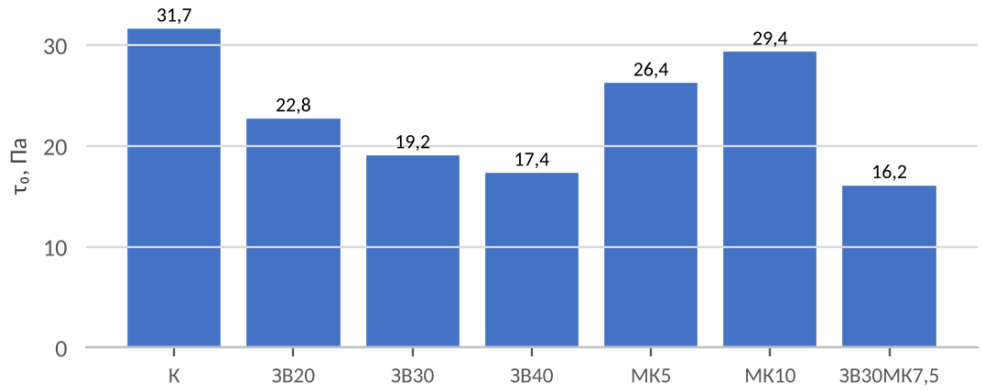

Рис. 3.3 Межа плинності сумішей, оцінена за розпливом конуса (розрахунок автора за формулою (2.1) і даними [4])

Межа плинності контрольної суміші становить 31,7 Па, сумішей із 20–40 % золи – 22,8–17,4 Па, з мікрокремнеземом – 26,4–29,4 Па, а потрійної суміші ЗВ30МК7,5 – 16,2 Па, тобто вдвічі менше за контрольну. Усі значення значно менші за критерій Окамури 60 Па [1], що підтверджує здатність сумішей до самоущільнення. Водночас слід пам'ятати, що формула (2.1) дає наближену оцінку: вона не враховує інерцію суміші та тиксотропію, тому для сумішей з високою в'язкістю (МК10) реальна межа плинності може бути дещо меншою.

3.4 Вплив мінеральних добавок на кінетику гідратації

Мінеральні добавки змінюють не лише реологію в перші хвилини, а й швидкість її втрати, пов'язану з гідратацією. За даними ізотермічної калориметрії цементних систем з ПК [5] (рис. 3.4) основний пік тепловиділення в контрольній системі спостерігався через 30 год. Мікрокремнезем закономірно зміщував його на 25, 20 і 15 год при 5, 10 і 15 % заміни, тобто приблизно на 1 год раніше на кожен відсоток добавки, і скорочував індукційний період з 4 до 2–3 год. Зола-

винесення в кількості 5–10 % положення піку практично не змінювала (30–31 год).

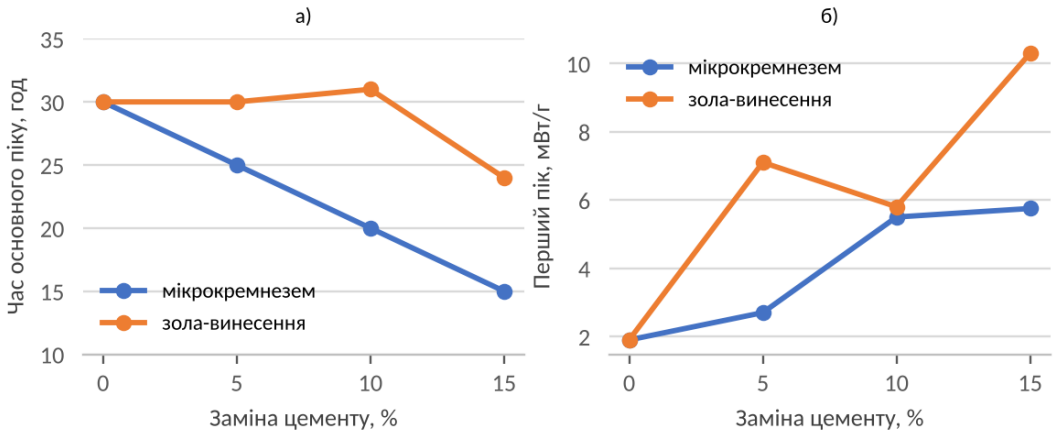

Рис. 3.4 Вплив мікрокремнезему і золи-винесення на час основного піку (а) і величину першого піку (б) тепловиділення (побудовано автором за даними [5])

Для технології СУБ це має двоякий наслідок. Прискорення гідратації мікрокремнеземом корисне для збірного бетону і зимового бетонування, але скорочує час збереження розпливу під час транспортування. Зола-винесення, навпаки, подовжує «відкритий» час суміші. Дослідження [5] також показало, що добавки підвищують в'язкість і межу плинності розчину при сталому дозуванні ПК, причому суміші з мікрокремнеземом зберігали структурну стабільність, а суміші із золою виявили помітну тиксотропію за малих швидкостей зсуву. Варто зазначити, що в цьому дослідженні кількість води змінювалася разом із дозуванням добавок, а деякі числові дані в тексті та на рисунках розходяться; тому його результати використано тут лише якісно і для оцінки кінетики.

3.5 Вплив дозування суперпластифікатора і модифікаторів в'язкості

Вплив дозування ПК на реологію тіста за даними [16] показано на рис. 3.5. Статична межа плинності знижується на 40 % при 0,1 % ПК і на 91 % при 0,2–0,3 %. Після 0,4 % крива виходить на «плато» насичення. Це дозування називають точкою насичення; перевищення її не дає приросту текучості, але збільшує ризик водовідділення, розшарування і уповільнення тужавлення. Тому дозування ПК для СУБ доцільно призначати за кривою «дозування – розплив»

трохи нижче точки насичення, а потрібну стійкість суміші забезпечувати порошком або VMA.

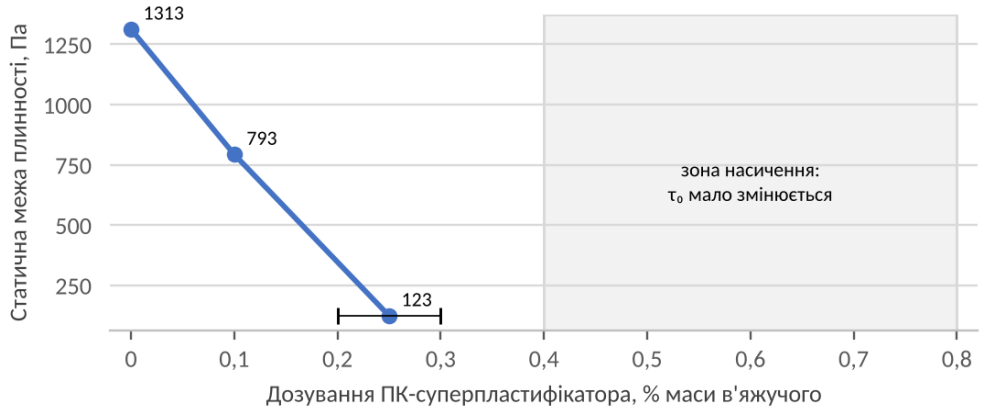

Рис. 3.5 Вплив дозування ПК на статичну межу плинності цементного тіста (побудовано автором за даними [16])

Показово, що ПК підвищив і міцність: у віці 28 діб тісто з 0,3 % ПК мало міцність 32,4 МПа проти 25,2 МПа без добавки (+28 %) при однаковому В/В [16]. Причина – краща дисперсія частинок і рівномірніша структура. Для СУБ, у якому В/В зазвичай 0,32–0,40, роль ПК у формуванні щільної структури ще більша.

Про модифікатори в'язкості огляд [3] свідчить, що вони підвищують передусім пластичну в'язкість і значно менше – межу плинності, зменшують водовідділення і розшарування, але можуть конкурувати з ПК за адсорбцію. Тому в комплексі «ПК + VMA» дозування ПК, як правило, доводиться дещо збільшувати. Перевагою VMA є зниження чутливості суміші до коливань вологості заповнювачів, що особливо важливо для сумішей з малим вмістом порошку.

3.6 Сумісність суперпластифікатора з мінеральними добавками

Мінеральні добавки змінюють не лише реологію суміші, а й ефективність суперпластифікатора. Наяк та ін. [24] методом конуса Марша визначили дозу насичення ПК для цементного тіста без добавок і з заміною цементу мікрокремнеземом (10 %), золою (30 %) і шлаком (50 %) при В/В від 0,40 до 0,60

(рис. 3.6). Доза насичення – це дозування, після якого час витікання тіста більше не зменшується.

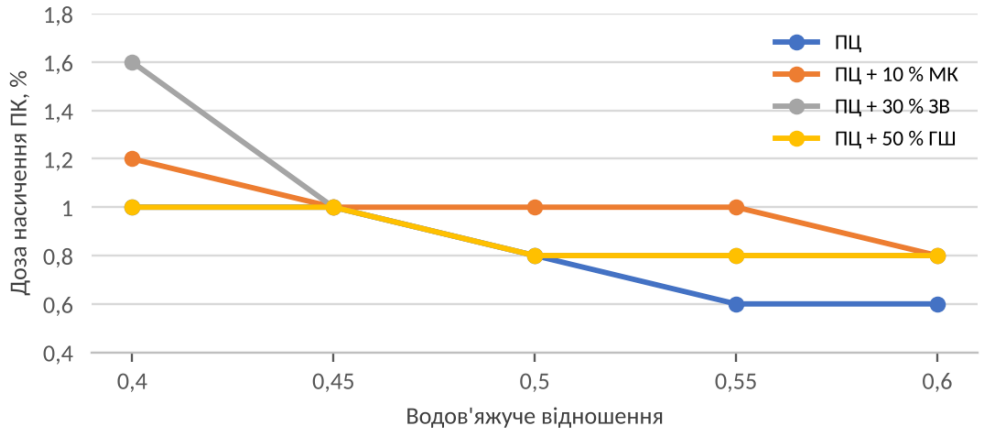

Рис. 3.6 Доза насичення ПК залежно від водов'яжучого відношення (побудовано автором за даними [24])

Автором апроксимовано ці дані лінійними залежностями (табл. 3.3). Для всіх в'яжучих доза насичення зменшується зі зростанням В/В, причому найкрутіше – для тіста з 30 % золи: при В/В = 0,40 воно потребує 1,6 % ПК, тобто на 60 % більше, ніж тісто без добавок, а без ПК взагалі не тече. Цей результат здається суперечливим щодо даних п. 3.1, де зола покращувала розплив. Пояснення полягає в різних умовах дослідів: у [24] досліджено тісто без заповнювачів із високою (30 %) заміною і В/В 0,40, коли вирішальною стає велика питома поверхня золи і адсорбція нею ПК, а в бетоні [4] при постійному дозуванні ПК переважає збільшення об'єму тіста і ефект «кулькових підшипників». Отже, сумісність ПК з конкретною добавкою треба перевіряти на тісті до підбору складу бетону, як і рекомендують настанови [9].

Таблиця 3.3

Залежність дози насичення ПК від В/В: $d_{нас} = a + b \cdot В/В$ (розрахунок автора за даними [24])

В'яжуче	a, %	b, %	Середня доза, %
Портландцемент	2,00	–2,4	0,80
ПЦ + 10 % мікрокремнезему	1,80	–1,6	1,00
ПЦ + 30 % золи	2,80	–3,6	1,00
ПЦ + 50 % шлаку	1,48	–1,2	0,88

Протилежний вплив шлаку і природного цеоліту на потребу в суперпластифікаторі показали Баят та ін. [20] на десяти складах СУБ з однаковою масою в'яжучого (450 кг/м³) і В/В = 0,4, у яких дозування ПК добирали до розпливу 750 ± 30 мм (рис. 3.7). Позначення складів: К – контрольний, Ц – з природним цеолітом, ГШ – з доменним шлаком, число – вміст добавки у відсотках маси в'яжучого.

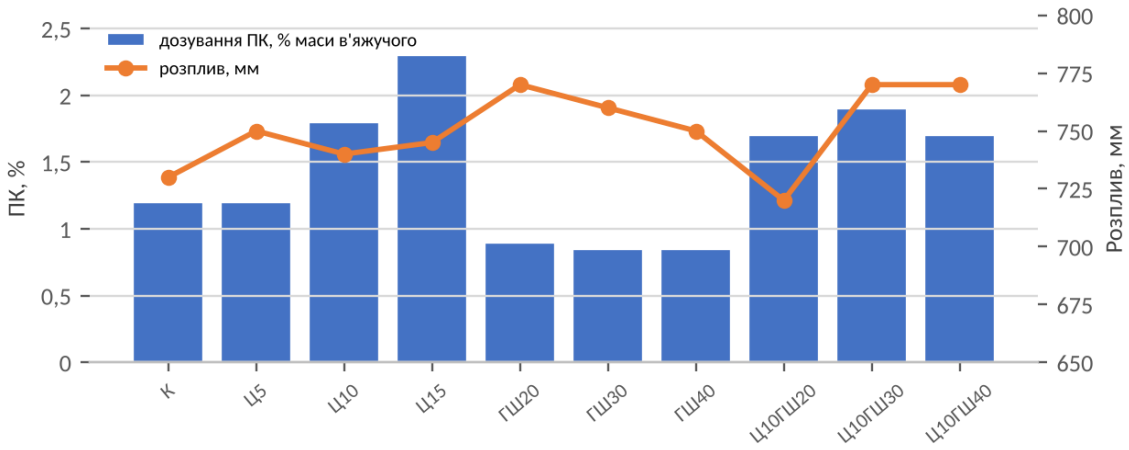

Рис. 3.7 Дозування ПК і розплив сумішей зі шлаком і цеолітом (побудовано автором за даними [20])

Заміна 20–40 % цементу шлаком зменшила потребу в ПК на 25–29 % завдяки гладкій склоподібній поверхні частинок, а цеоліт з пористою шорсткою поверхнею збільшив її на 50 % (10 %) і на 92 % (15 %) [20]. Автором отримано лінійну модель потреби в ПК:

$$ПК = 0{,}98 + 0{,}085 \cdot Ц - 0{,}003 \cdot ГШ,\ R^2 = 0{,}95, \qquad (3.3)$$

де ПК – дозування суперпластифікатора, % маси в'яжучого; Ц, ГШ – вміст цеоліту і шлаку, % маси в'яжучого.

Модель показує, що кожен відсоток цеоліту потребує додатково близько 0,085 % ПК, а вплив шлаку в діапазоні 20–40 % майже не залежить від його кількості. Оцінена за формулою (2.1) межа плинності сумішей [20] становить 14,7–20,5 Па, тобто всі вони належать до класу SF2–SF3. Час t_{500} для сумішей зі шлаком становив 1,5–1,7 с, з цеолітом – 2,3–2,5 с, а час V-лійки – 3,1–3,7 і 4,6–5,3 с відповідно, причому між цими показниками автори джерела отримали

кореляцію з $R^2 = 0{,}84$ [20]. Отже, шлак зменшує в'язкість суміші, а цеоліт її підвищує, і в потрійному в'яжучому ці дії частково компенсуються.

3.7 Збереження рухливості суміші в часі

Для товарного СУБ важливо, щоб розплив зберігався під час транспортування. Саницький та ін. [11] порівняли бетонні суміші з однаковою початковою осадкою конуса 23 см: без добавок (В/Ц = 0,54), з нафталінформальдегідним суперпластифікатором (0,6 %, В/Ц = 0,44), з ПК (1,0 %, В/Ц = 0,42) і з комплексним модифікатором на основі ПК та прискорювачів тверднення (1,5 %, В/Ц = 0,40) (рис. 3.8).

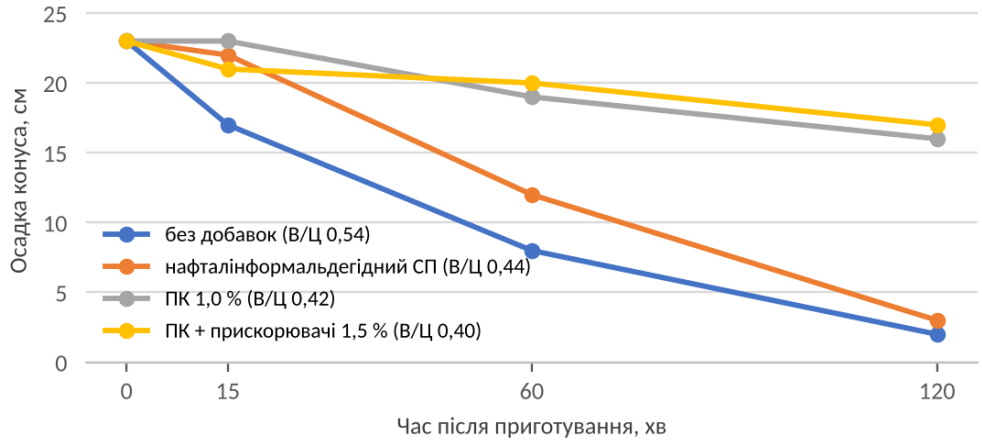

Рис. 3.8 Зміна осадки конуса в часі для сумішей з різними добавками (побудовано автором за даними [11])

Автором обчислено частку осадки, що зберігається через 120 хв: без добавок – 9 %, з нафталінформальдегідним суперпластифікатором – 13 %, з ПК – 70 %, з комплексним модифікатором – 74 %. Отже, полікарбоксилати не лише знижують водопотребу, а й у 5–8 разів краще зберігають рухливість, ніж добавки попереднього покоління. Комплексний модифікатор при цьому дає найбільшу ранню міцність (п. 4.7). Мінеральні добавки на збереження рухливості впливають по-різному: мікрокремнезем прискорює гідратацію і скорочує «відкритий» час суміші (п. 3.4), а зола і шлак його подовжують [20, 21].

3.8 Узагальнення: напрямки впливу компонентів на реологію

Узагальнення результатів пп. 3.1–3.7 у вигляді реограми (діаграми «в'язкість – межа плинності», запропонованої О. Валевіком [14]) подано на рис. 3.9 і в табл. 3.4. Кожна стрілка показує напрямок зміни реологічних параметрів при збільшенні вмісту компонента. Мета технолога – перевести суміш у «вікно легкоукладальності» СУБ: мала межа плинності і помірна в'язкість.

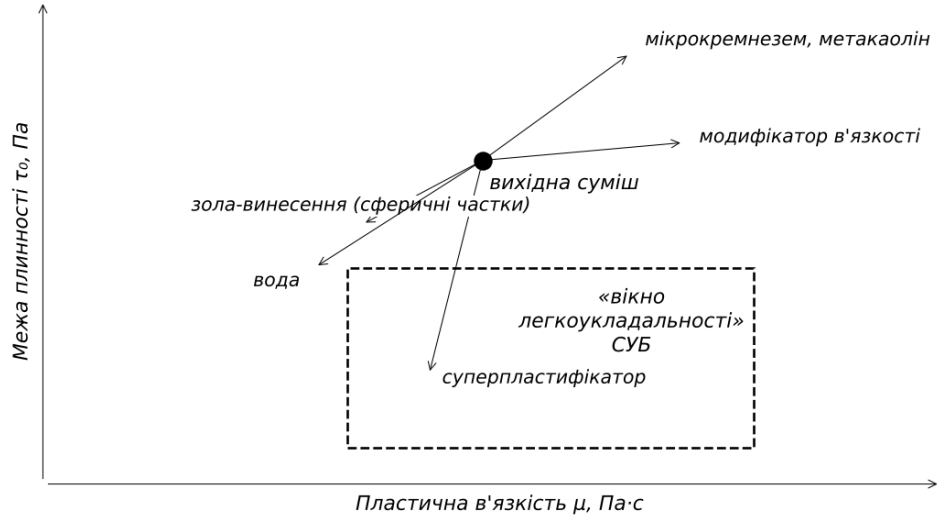

Рис. 3.9 Реограма впливу компонентів на реологічні параметри суміші (схема складено автором за узагальненням [3, 4, 5, 14, 16, 21])

Таблиця 3.4

Вплив компонентів комплексу добавок на властивості свіжої суміші (узагальнено автором)

Компонент	τ_0	μ	Переваги	Ризики
ПК-суперпластифікатор	↓↓	↓	різке зниження межі плинності за малих дозувань	понад точку насичення – водовідділення, розшарування
VMA	↑	↑↑	стійкість, менша чутливість до вологості піску	конкуренція з ПК, зниження міцності
Зола-винесення	↓	↓	більший розплив, довший відкритий час	повільний набір ранньої міцності
Мікрокремнезем	↑	↑↑	стійкість, щільність, прискорення гідратації	більша потреба в ПК і воді, швидша втрата розпливу
Метакаолін, зола рисового лушпиння	↑	↑	висока пуцоланова активність	збільшення водопотреби

Доменний шлак	↓	↓	менша потреба в ПК (на 25–29 %)	повільний набір ранньої міцності
Природний цеоліт	↑	↑	пуцоланова активність, стійкість суміші	потреба в ПК більша на 50–92 %
Вапняковий порошок	↓	≈	дешевий наповнювач, рання гідратація	розбавлення, зниження пізньої міцності

Примітка: ↓ – зменшення; ↑ – збільшення; подвоєна стрілка – сильний вплив; ≈ – вплив незначний.

3.9 Висновки до розділу 3

1. Заміна 20–40 % цементу золою-винесенням за незмінного дозування ПК збільшує розплив суміші з 660 до 744 мм і зменшує t_{500} з 3,6 до 2,7 с; отримано залежності $D = 661 + 2{,}15 \cdot FA$ і $t_{500} = 3{,}61 - 0{,}023 \cdot FA$ ($R^2 = 0{,}99$).

2. Розрахунок методом абсолютних об'ємів показав, що при заміні цементу золою за масою об'єм порошку зростає на 17 %, а об'єм тіста – на 25 л/м³; саме цей об'ємний чинник, поряд зі сферичною формою частинок, пояснює зростання розпливу.

3. Мікрокремнезем зменшує розплив і підвищує в'язкість (V-лійка до 11,9 с), але в комбінації із 30 % золи отримано суміш з найбільшим розпливом (755 мм) і найкращою здатністю проходити крізь арматуру ($H_2/H_1 = 0{,}94$); оцінена межа плинності такої суміші (16,2 Па) удвічі менша, ніж контрольної.

4. Мікрокремнезем прискорює гідратацію (основний пік тепловиділення зміщується на ~1 год на кожен відсоток), а зола в кількості до 10 % на неї практично не впливає; ПК знижує межу плинності тіста на 91 % при 0,2–0,3 % з насиченням після 0,4 %.

5. Доза насичення ПК зменшується зі зростанням В/В і залежить від добавки: при В/В = 0,40 тісто з 30 % золи потребує на 60 % більше ПК, ніж тісто без добавок. Шлак зменшує потребу в ПК на 25–29 %, цеоліт збільшує її до 92 %; отримано модель $ПК = 0{,}98 + 0{,}085 \cdot Ц - 0{,}003 \cdot ГШ$ ($R^2 = 0{,}95$).

6. Полікарбоксилати зберігають 70–74 % осадки конуса через 120 хв проти 9–13 % для сумішей без добавок і з нафталінформальдегідним суперпластифікатором.

Розділ 4

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ СУБ З КОМПЛЕКСОМ ДОБАВОК. ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ

4.1 Міцність на стиск бінарних і потрійних складів

Відносну зміну міцності на стиск складів [4] порівняно з контрольним наведено на рис. 4.1 і в табл. 4.1.

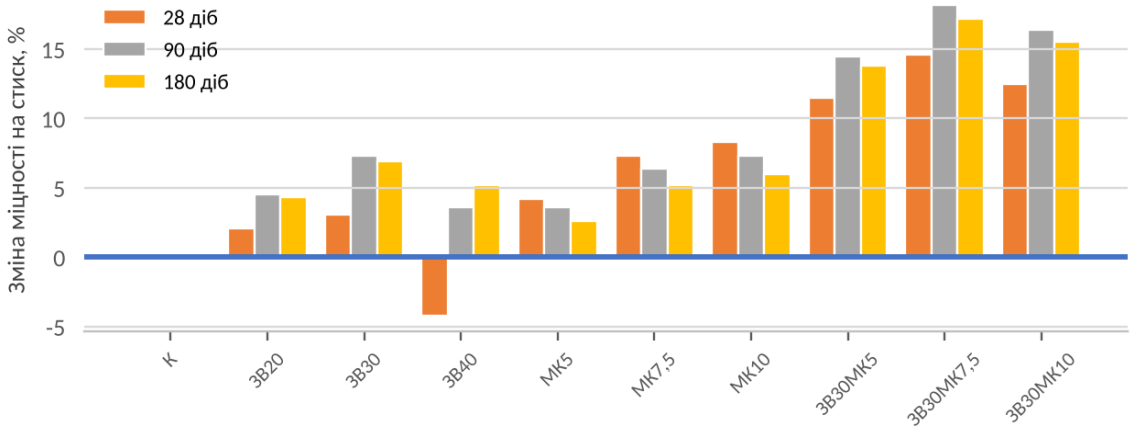

Рис. 4.1 Зміна міцності на стиск складів СУБ відносно контрольного (побудовано автором за даними [4])

Таблиця 4.1

Зміна міцності на стиск відносно контрольного складу, % [4]

Склад	28 діб	90 діб	180 діб
3В20	+2,1	+4,5	+4,3
3В30	+3,1	+7,3	+6,9
3В40	–4,2	+3,6	+5,2
МК5	+4,2	+3,6	+2,6
МК7,5	+7,3	+6,4	+5,2
МК10	+8,3	+7,3	+6,0
3В30МК5	+11,5	+14,5	+13,8
3В30МК7,5	+14,6	+18,2	+17,2
3В30МК10	+12,5	+16,4	+15,5

Аналіз табл. 4.1 дозволяє виділити три закономірності. По-перше, зола-винесення працює «на перспективу»: при 40 % вона знижує 28-добову міцність на 4,2 % через розбавлення клінкеру, але вже до 90 діб завдяки пуцолановій реакції перевищує контрольний склад на 3,6 %. По-друге, мікрокремнезем дає

максимальний відносний ефект у ранньому віці (+8,3 % у 28 діб для МК10), який далі дещо зменшується, оскільки контрольний склад продовжує набирати міцність. По-третє, потрійні склади мають ефект, більший за суму ефектів компонентів. Для ЗВ30МК7,5 сума окремих приростів ЗВ30 і МК7,5 становить 10,4 % у 28 діб і 13,7 % у 90 діб, а фактичний приріст – 14,6 і 18,2 %. Синергетична складова, отже, становить 4,2–4,5 відсоткового пункту. Автори джерела пов'язують її з тим, що мікрокремнезем прискорює ранню гідратацію, а зола забезпечує подальше зв'язування портландиту [4].

За даними анотації [4] міцність складу ЗВ30МК7,5 у віці 180 діб становила 68 МПа. Звідси міцність контрольного складу в цьому віці можна оцінити як 68/1,172 ≈ 58 МПа.

Для міцності на розтяг у джерелі наведено абсолютні значення контрольного складу, що дозволило автору обчислити абсолютні значення для інших складів (рис. 4.2). Міцність при розколюванні складу ЗВ30МК7,5 становить 5,2; 5,9 і 6,1 МПа у 28, 90 і 180 діб проти 4,3; 4,8 і 5,0 МПа для контрольного, а міцність на розтяг при згині – 6,7; 7,4 і 7,6 МПа проти 5,6; 6,2 і 6,4 МПа. Відносний приріст міцності на розтяг (19–23 %) більший, ніж на стиск, що свідчить про ущільнення перехідної зони між заповнювачем і цементним каменем. Варто зазначити, що в анотації джерела для ЗВ30МК7,5 вказано 6,3 і 8,9 МПа, що не узгоджується з відсотками в таблицях; у роботі використано табличні дані.

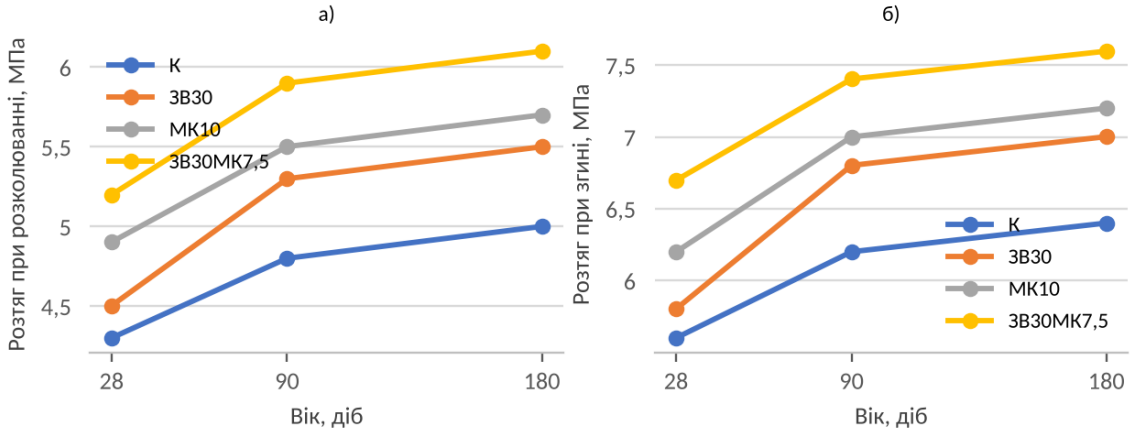

Рис. 4.2 Міцність на розтяг при розколюванні (а) і при згині (б) (розрахунок автора за даними [4])

4.2 Модель відгуку та раціональна область дозування золи і мікрокремнезему

Для кількісного опису спільного впливу золи і мікрокремнезему автором побудовано модель відгуку другого порядку за даними десяти складів [4]:

$$\Delta R = a_1 \cdot FA + a_2 \cdot FA^2 + b_1 \cdot SF + b_2 \cdot SF^2 + c \cdot FA \cdot SF, \qquad (4.1)$$

де ΔR – приріст міцності на стиск відносно контрольного складу, %; FA, SF – вміст золи-винесення і мікрокремнезему, % маси в'яжучого; a_1, a_2, b_1, b_2, c – коефіцієнти, визначені методом найменших квадратів (вільний член дорівнює нулю, оскільки для контрольного складу $\Delta R = 0$).

Отримані коефіцієнти наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Коефіцієнти моделі відгуку (4.1) (розрахунок автора)

Вік	a_1	a_2	b_1	b_2	c	R^2
28 діб	0,468	–0,0138	1,783	–0,1063	0,0177	0,945
90 діб	0,484	–0,0094	1,480	–0,0836	0,0180	0,961

Модель має чітку фізичну інтерпретацію. Від'ємні коефіцієнти a_2 і b_2 відображають ефект розбавлення: за великого вмісту добавки цементу стає недостатньо для утворення портландиту, з яким вона реагує. Додатний коефіцієнт взаємодії c підтверджує синергію: для ЗВ30МК7,5 доданок $c \cdot FA \cdot SF$ дає +4,0 % до міцності, що збігається з оцінкою п. 4.1. У віці 90 діб коефіцієнт a_2 за модулем менший, ніж у 28 діб, тобто з часом «оптимальний» вміст золи зростає.

Ізолінії моделі для 28 діб показано на рис. 4.3. У межах дослідженої області ($FA \le 40$ %, $SF \le 10$ %) максимум приросту 14,7 % досягається при $FA \approx 23$ % і $SF = 10$ %, а для 90 діб при $SF = 10$ % оптимальний вміст золи становить близько 35 % (прогноз +18,2 %). Поверхня поблизу максимуму полога: у зоні FA = 23–30 %, SF = 7,5–10 % прогнозований приріст відрізняється від максимального не більше ніж на 2 %. Тому автор рекомендує розглядати не точку, а **раціональну область дозування: зола-винесення 25–30 %, мікрокремнезем 7,5–10 % маси**

в'яжучого, у якій заміна цементу становить 32,5–40 %. Ця область узгоджується з експериментально найкращим складом ЗВ30МК7,5 [4].

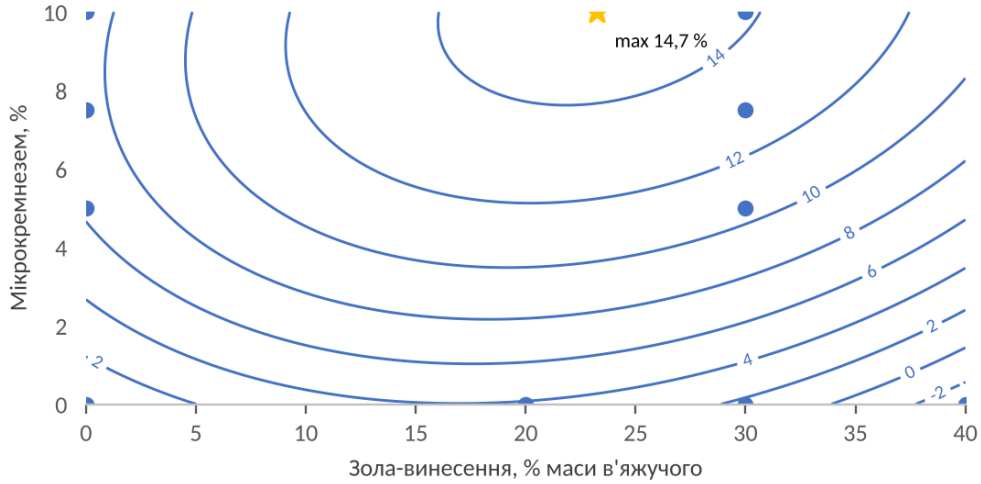

Рис. 4.3 Ізолінії приросту міцності у 28 діб, %, за моделлю (4.1) (трикутники – експериментальні склади [4], зірка – максимум; розрахунок автора)

Обмеження моделі полягає в тому, що її побудовано на десяти точках, розміщених не за повним планом експерименту (немає складів із 20 і 40 % золи в поєднанні з мікрокремнеземом), тому її не слід застосовувати поза дослідженою областю. Максимум моделі для 90 діб за межами області (SF > 10 %) є екстраполяцією і не має практичного значення.

4.3 Коефіцієнти ефективності мінеральних добавок

У нормативній практиці внесок мінеральних добавок у міцність враховують коефіцієнтом ефективності k: еквівалентна кількість цементу $C_{екв} = C + k \cdot D$, де D – маса добавки. Стандарт EN 206 [10] для золи-винесення приймає $k = 0{,}4$, а для мікрокремнезему $k = 2{,}0$ (при $В/Ц \le 0{,}45$). Автором оцінено фактичні коефіцієнти k для складів [4] за формулою Боломея:

$$R_б = A \cdot (C_{екв}/В - 0{,}5), \qquad (4.2)$$

де $R_б$ – міцність бетону на стиск, МПа; A – емпіричний коефіцієнт, що залежить від активності цементу і якості заповнювачів; $C_{екв}$ – еквівалентна витрата цементу, кг/м³; В – витрата води, кг/м³.

Оскільки A для всіх складів однаковий, його можна виключити, записавши відношення міцності складу з добавкою і контрольного:

$$R/R_к = (C_{екв}/B – 0{,}5)/(C_к/B – 0{,}5), \quad (4.3)$$

де $R/R_к = 1 + \Delta R/100$; $C_к = 450$ кг/м³; $B = 157{,}5$ кг/м³.

Наприклад, для ЗВ30 у 28 діб: $C_к/B – 0{,}5 = 2{,}357$; $C_{екв}/B = 1{,}031 \cdot 2{,}357 + 0{,}5 = 2{,}930$; $C_{екв} = 461{,}5$ кг/м³; $k = (461{,}5 – 315)/135 = 1{,}09$. Результати для всіх складів наведено на рис. 4.4 і в табл. 4.3.

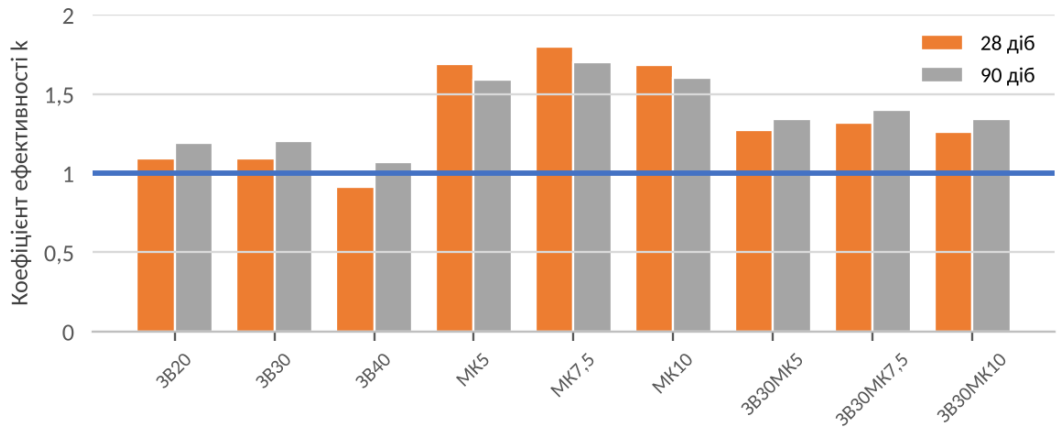

Рис. 4.4 Коефіцієнти ефективності мінеральних добавок (розрахунок автора за формулою (4.3) і даними [4])

Таблиця 4.3

Коефіцієнти ефективності мінеральних добавок у складі СУБ (розрахунок автора)

Добавка	**28 діб**	**90 діб**	**За EN 206 [10]**
Зола 20–30 %	1,09	1,19–1,20	0,4
Зола 40 %	0,91	1,07	0,4
Мікрокремнезем 5–10 %	1,68–1,80	1,59–1,70	2,0
Зола 30 % + мікрокремнезем 5–10 % (на суму добавок)	1,26–1,32	1,34–1,40	–

Отримані значення k для мікрокремнезему (1,6–1,8) близькі до нормативного 2,0, а для золи (1,07–1,20) майже втричі більші за нормативне 0,4. Розбіжність, на думку автора, пояснюється тим, що в СУБ з постійним дозуванням ПК зола не лише бере участь у пуцолановій реакції, а й покращує диспергування і укладання, тобто k у цьому випадку є «інтегральним» коефіцієнтом, який враховує і реологічний ефект. Крім того, у дослідженні [4] використано високоактивний цемент класу 53 з великим вмістом портландиту.

Тому для проєктування складів слід використовувати нормативні значення EN 206 як нижню межу, а підвищені k – лише після підтвердження пробними замісами з місцевими матеріалами.

4.4 Проникність і довговічність

Показники проникності складів [4] наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Показники проникності і щільності СУБ у віці 90 діб [4]

Склад	Сорбційність, мм/√хв	RCPT, Кл	Ультразвук, км/с
К	0,090	3200	4,30
ЗВ20	0,084	2500	4,38
ЗВ30	0,078	2100	4,45
ЗВ40	0,081	2300	4,42
МК5	0,080	2000	4,48
МК7,5	0,077	1900	4,52
МК10	0,074	1800	4,55
ЗВ30МК5	0,068	1500	4,60
ЗВ30МК7,5	0,060	1200	4,70
ЗВ30МК10	0,063	1300	4,66

Комплекс «зола + мікрокремнезем» зменшує сорбційність на 33 %, а проникність для хлоридів – у 2,7 раза: з 3200 Кл (помірна) до 1200 Кл (низька). У віці 180 діб заряд для ЗВ30МК7,5 становив 800 Кл, що відповідає класу «дуже низька» [4]. Як і для міцності, потрійні склади ефективніші за бінарні.

Автором виконано кореляційний аналіз зв'язку між показниками (рис. 4.5). Між зарядом RCPT і сорбційністю отримано лінійну залежність

$$Q = 61017 \cdot S - 2627,\ R^2 = 0,92, \qquad (4.4)$$

де Q – заряд, Кл; S – початкова сорбційність, мм/√хв.

Зв'язок заряду з приростом міцності у 90 діб слабший: $Q = 2705 - 88,6 \cdot \Delta R$ ($R^2 = 0,82$). Тобто показники проникності чутливіші до виду добавок, ніж міцність: так, склад МК5 має міцність майже як у ЗВ20, але на 20 % менший заряд. Для конструкцій, що експлуатуються в умовах хлоридної агресії (класи

XD, XS за EN 206), вибирати комплекс добавок слід саме за показниками проникності, а не лише за міцністю.

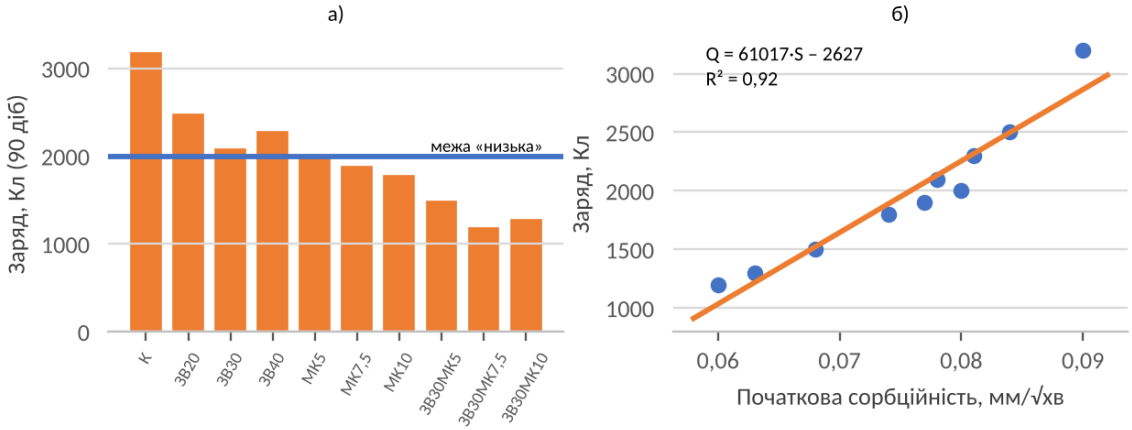

Рис. 4.5 Проникність для хлоридів у 90 діб (а) і її зв'язок із сорбційністю (б) (побудовано автором за даними [4])

4.5 Вплив метакаоліну, золи рисового лушпиння, шлаку і вапнякового порошку

Метакаолін і зола рисового лушпиння. Гілл і Сіддік [17, 19] дослідили СУБ, у якому цемент заміщали метакаоліном (5–15 %), а пісок – золою рисового лушпиння (10–30 %), та їхні комбінації. Міцність зростала до 10 % метакаоліну і дещо знижувалася при 15 %, а для золи лушпиння максимум відповідав 10 %. Найкращий склад (10 % метакаоліну + 10 % золи лушпиння) перевищив контрольний за міцністю на стиск на 26, 27, 42 і 48 % у віці 7, 28, 90 і 365 діб, а його міцність при розколюванні становила 2,74; 4,43; 5,12 і 5,96 МПа. Використання обох добавок підвищувало водопотребу, яку компенсували збільшенням дозування ПК. Усі склади відповідали вимогам до СУБ за розпливом, L-скринею, U-скринею і V-лійкою, а показники довговічності (водопоглинання, пористість, стійкість до сульфатів, RCPT) покращилися [19].

Зростання приросту з віком (з 26 до 48 %) свідчить про тривалу пуцоланову реакцію і є характерним для високоактивних пуцолан.

Порівняння модифікаторів у вітчизняних дослідженнях. Троян і Кіндрась [8] порівняли чотири модифікатори (10 % від маси цементу) у

високоміцному СУБ на CEM I 42,5 R з В/Ц 0,3. Результати наведено в табл. 4.5 і на рис. 4.6.

Таблиця 4.5

Вплив мінеральних модифікаторів на властивості високоміцного СУБ [8]

Показник	Мікро-кремнезем	Метакаолін	Зола-винесення	Вапняковий порошок
Потреба в ПК, % (базовий – 1 %)	1,35	1,4	≈1	≈1
Усадка за 120 діб, мм/м (базовий – 0,38)	0,34–0,36	0,29	0,34–0,36	0,34–0,36
Міцність при розколюванні, МПа (базовий – 5,5)	6,4	5,8	5,8	4,7
Модуль пружності, ГПа (базовий – 41–42)	50,4	36,6	41–42	41–42

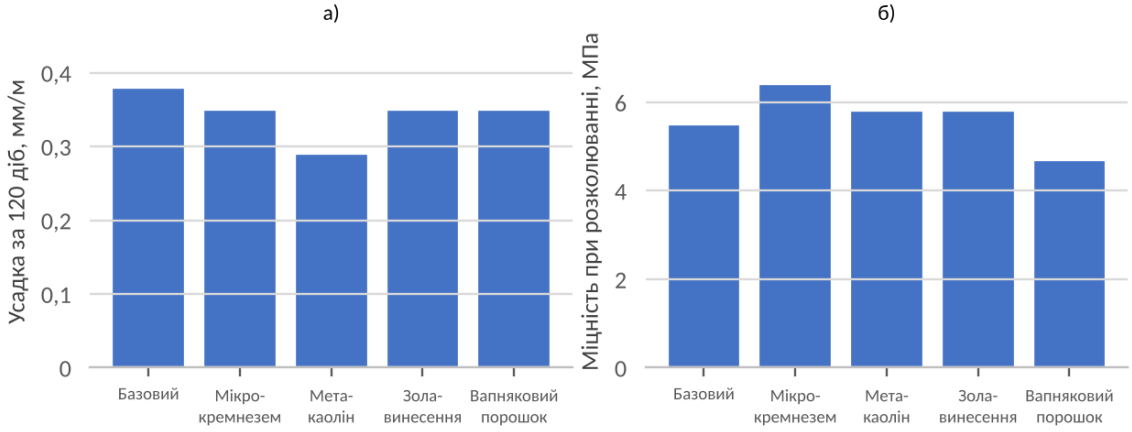

Рис. 4.6 Усадка (а) і міцність при розколюванні (б) високоміцного СУБ з різними модифікаторами (побудовано автором за даними [8])

Мікрокремнезем єдиний підвищив міцність на стиск (84,7 МПа у 28 діб і 93,5 МПа у 90 діб) і модуль пружності, але потребував на 35 % більше ПК. Метакаолін найбільше зменшив усадку (на 24 %) і крихкість, а вапняковий порошок дав найменшу міцність (66,9 МПа у 28 діб). Автори звертають увагу, що всі модифікатори дещо знизили критичний коефіцієнт інтенсивності напружень (0,74–0,76 проти 0,85 МПа·м^{0,5}), тому тріщиностійкість слід оцінювати комплексно [8]. Ці результати узгоджуються із закордонними:

мікрокремнезем – найефективніший компонент для міцності, а метакаолін – для зменшення деформацій усадки.

Доменний шлак і вапняковий порошок. Тонгсаніткарн та ін. [18] дослідили потрійні в'яжучі із сумарною заміною 30 % цементу (рис. 4.7). Найбільшу міцність у 28 діб (51,68 МПа) мав склад 25 % шлаку + 5 % вапняку, що перевищило і портландцемент (50,12 МПа), і бінарний склад із 30 % шлаку (47,73 МПа). Автором апроксимовано залежність міцності від частки вапняку квадратичною функцією в діапазоні 0–15 %:

$$R_{28} = 48{,}18 + 0{,}770 \cdot LS - 0{,}0687 \cdot LS^2, \qquad (4.5)$$

де R_{28} – міцність у 28 діб, МПа; LS – частка вапнякового порошку, % (за сумарної заміни шлаком і вапняком 30 %).

Максимум функції (4.5) відповідає LS ≈ 5,6 %. Отже, раціональне співвідношення шлак : вапняк становить приблизно 4 : 1. Сумарне тепловиділення за 48 год для потрійних складів (226,6–229,4 Дж/г) було на 12 % меншим, ніж для портландцементу, але більшим, ніж для 30 % шлаку (210 Дж/г): вапняк прискорює ранню гідратацію, а шлак знижує загальне тепловиділення [18].

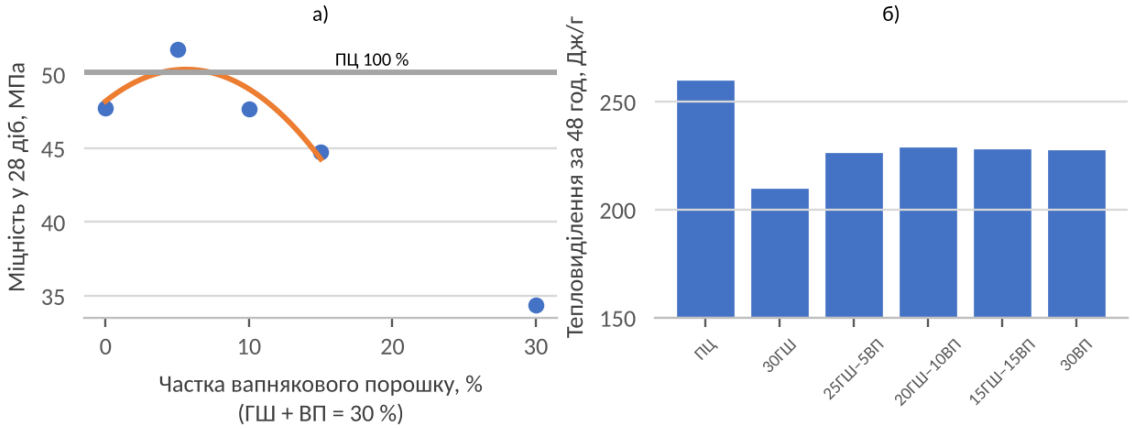

Рис. 4.7 Міцність потрійних в'яжучих «цемент – шлак – вапняк» (а) і тепловиділення за 48 год (б): ПЦ – портландцемент, ГШ – доменний шлак, ВП – вапняковий порошок (оброблено автором за даними [18])

Отже, вапняковий порошок у СУБ доцільно розглядати як наповнювач у кількості до 5–10 % в'яжучого або як заміну частини піску у фракції менше 0,125

мм. За оглядом [21], вапняковий порошок завдяки ефекту заповнення і ролі центрів кристалізації зменшує водовідділення та пластичну в'язкість і збільшує розплив СУБ.

Слід згадати і вітчизняний досвід. У Львівській політехніці отримано СУБ з розпливом 650–730 мм і міцністю 58–95 МПа на основі в'яжучих із сульфоалюмосилікатною добавкою (метакаолін + гіпс), золою-винесенням і вапняковим мікронаповнювачем [7], а суперпластифікований СУБ із 480 кг/м³ цементу зберігав розплив до 3 год (втрата 8 % за 1,5 год) і досягав міцності 83,2 МПа у 28 діб, морозостійкості F400 і водонепроникності W20 [6].

4.6 Шлак і природний цеоліт: кінетика міцності та коефіцієнти ефективності

Друга повна серія складів СУБ – дослідження Баята та ін. [20] – дозволяє перевірити закономірності п. 4.1–4.3 на інших добавках. Міцність на стиск десяти складів у віці 7, 28, 90 і 180 діб показано на рис. 4.8.

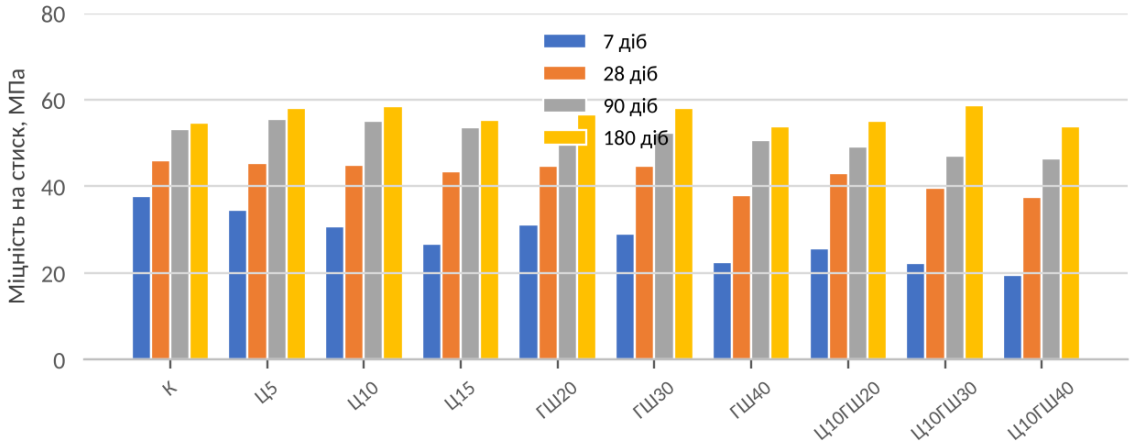

Рис. 4.8 Міцність на стиск СУБ зі шлаком і цеолітом (побудовано автором за даними [20])

Відносно контрольного складу (37,7; 46,0; 53,2 і 54,7 МПа) усі склади з добавками у віці 7 діб мали меншу міцність – на 8,5–48,3 %. Найбільше відставання мали потрійні склади: Ц10ГШ40, у якому замінено 50 % цементу, у 7 діб мав лише 19,5 МПа. Однак між 7 і 28 добами міцність складів зі шлаком зростала на 43–69 %, а потрійних – на 67–92 % проти 22 % для контрольного [20]. До 180 діб більшість складів перевищила контрольний, найбільше – Ц10ГШ30

(58,7 МПа, +7,3 %), і лише склади з 40 % шлаку залишилися на 1,6 % нижчими. Тобто для шлаку і цеоліту, як і для золи (п. 4.1), ефект проявляється «з запізненням».

Автором за формулою (4.3) при B = 180 кг/м³ і $C_к$ = 450 кг/м³ розраховано коефіцієнти ефективності цих добавок і зіставлено їх із результатами п. 4.3 (табл. 4.6).

Таблиця 4.6

Коефіцієнти ефективності мінеральних добавок у двох серіях СУБ (розрахунок автора за даними [4, 20])

Добавка	**28 діб**	**90 діб**	**180 діб**
Зола 20–30 % [4]	1,09	1,19–1,20	1,18–1,19
Мікрокремнезем 5–10 % [4]	1,68–1,80	1,59–1,70	–
Шлак 20–40 % [20]	0,65–0,92	0,91–0,96	0,97–1,16
Цеоліт 10–15 % [20]	0,71–0,83	1,05–1,30	1,06–1,56
Цеоліт 10 % + шлак 20–40 % [20]	0,70–0,83	0,77–0,80	0,97–1,15

Примітка: для складу з 5 % цеоліту коефіцієнт не наведено, оскільки при малій кількості добавки похибка вимірювання міцності 1 МПа змінює k більш ніж на 0,4.

У віці 28 діб коефіцієнти шлаку і цеоліту (0,65–0,92) менші за одиницю, тобто 1 кг добавки дає менше міцності, ніж 1 кг цементу, і лише до 180 діб вони наближаються до 1,0–1,2. Це значно ближче до нормативних підходів EN 206, ніж підвищені значення для золи з п. 4.3, і підтверджує висновок, що підвищені k слід приймати лише за результатами пробних замісів. Для проєктування складу СУБ, який має набрати міцність у 28 діб, шлак і цеоліт доцільно враховувати з k ≈ 0,7–0,8, а при контролі міцності у віці 90 діб – з k ≈ 0,9.

4.7 Рання міцність і тепловиділення

Для збірного залізобетону і швидкого оборотного опалубку важлива рання міцність. За даними [11], у віці 3 діб бетон із ПК мав міцність 22,7 МПа, а з комплексним модифікатором (ПК + прискорювачі тверднення) – 24,8 МПа проти 10,3 МПа без добавок і 13,0 МПа з нафталінформальдегідним суперпластифікатором; у 28 діб – відповідно 40,4; 42,6; 32,8 і 37,4 МПа. Автором

обчислено відношення R_3/R_{28}: для бетону без добавок воно становить 0,31, з нафталінформальдегідною добавкою – 0,35, з ПК – 0,56, з комплексним модифікатором – 0,58. Отже, полікарбоксилати за рахунок зниження В/Ц майже вдвічі прискорюють відносний набір міцності, а комплексний модифікатор дозволив отримати бетон класу С25/30 замість С20/25 [11]. Цей ефект компенсує сповільнення ранньої гідратації, яке вносять зола і шлак.

Для масивних конструкцій з СУБ, наприклад фундаментних плит і стін укриттів, важливіше обмежити розігрів бетону. У звіті [22] за параметрами гідратації розраховано адіабатичний розігрів бетону стіни товщиною 1 м (рис. 4.9).

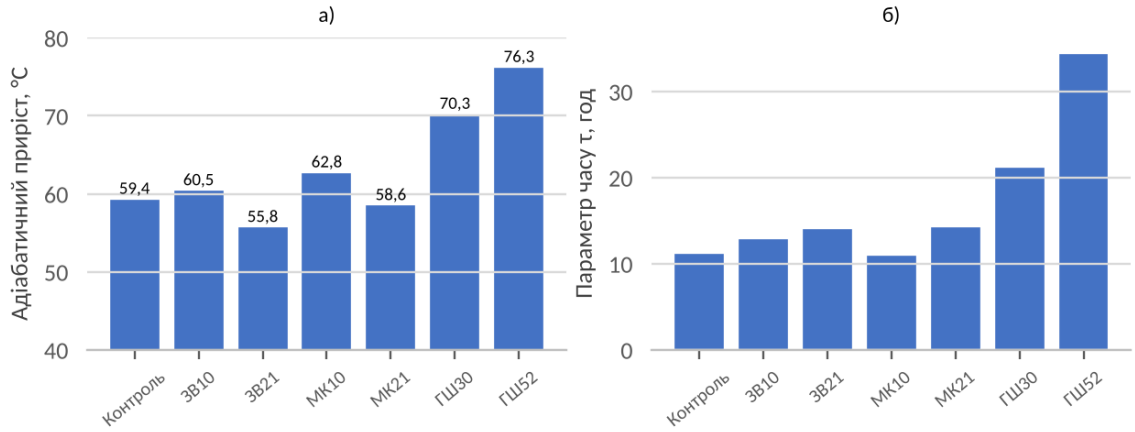

Рис. 4.9 Адіабатичний розігрів бетону (а) і параметр часу гідратації τ (б) (побудовано автором за даними [22])

Автором розраховано зміну розігріву відносно контрольного бетону (59,4 °С): 21 % золи зменшує його на 3,6 °С, 21 % мікрокремнезему – на 0,8 °С, 10 % мікрокремнезему збільшує на 3,4 °С, а 30 і 52 % шлаку – на 10,9 і 16,9 °С. Цей результат суперечить поширеній думці, що шлак завжди зменшує тепловиділення. Пояснення полягає у двох обставинах. По-перше, досліджений шлак мав високий вміст Al_2O_3 (14,25 %), що змінює сульфатно-алюмінатний баланс системи [22]. По-друге, параметр часу τ для бетону з 30 і 52 % шлаку був у 1,9 і 3,1 раза більшим, ніж для контрольного, тобто тепло виділяється повільніше і в реальній конструкції встигає частково відводитися. Це узгоджується з даними [18], де шлак зменшував тепловиділення саме за перші 48 год. Практичний висновок для СУБ: у масивних конструкціях для обмеження

розігріву найефективніша зола-винесення, а шлак слід перевіряти за вмістом глинозему; крім того, за даними [22], шлак з високим вмістом Al_2O_3 не підвищив сульфатостійкості, тоді як мікрокремнезем забезпечив найкращий захист.

4.8 Екологічна ефективність комплексу добавок

Зменшення витрати цементу – головний шлях зниження вуглецевого сліду бетону. Автором оцінено емісію CO_2 від в'яжучого для складів [4], прийнявши як методичне припущення середні питомі коефіцієнти: 0,83 кг CO_2/кг для портландцементу, 0,01 – для золи-винесення і 0,014 – для мікрокремнезему (як для побічних продуктів, на які відносять лише переробку і транспортування). Склад ЗВ30МК7,5 має емісію 235 кг/м³ проти 374 кг/м³ для контрольного (–37 %) і водночас найбільший приріст міцності. Склади лише з мікрокремнеземом зменшують емісію на 5–10 % через малий вміст добавки, а склади лише із золою – на 20–40 %, але з меншим приростом міцності. Отже, потрійні склади поєднують найменшу емісію з найбільшим приростом міцності. Абсолютні значення емісії залежать від прийнятих коефіцієнтів, однак відносне порівняння складів від них майже не залежить.

4.9 Алгоритм і приклад підбору складу СУБ з комплексом добавок

На основі встановлених закономірностей запропоновано алгоритм підбору складу (рис. 4.10). Його особливістю є призначення в'яжучого як потрійного (цемент + зола + мікрокремнезем) у раціональній області п. 4.2 і контроль об'ємних параметрів тіста за табл. 1.3.

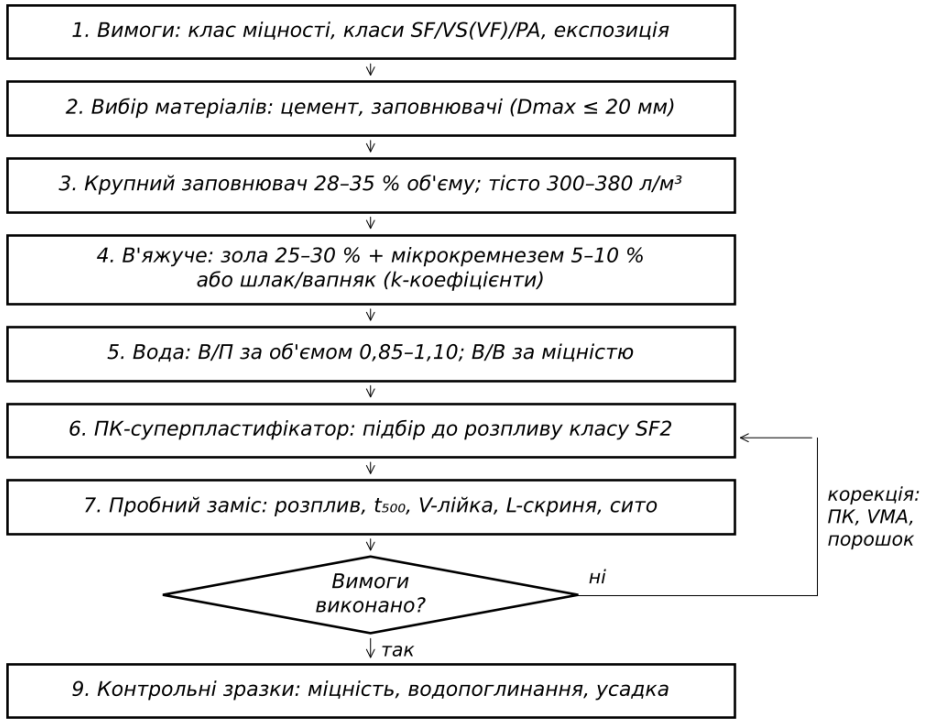

Рис. 4.10 Алгоритм підбору складу СУБ з комплексом добавок (розроблено автором)

Приклад. Потрібно підібрати склад СУБ класу С30/37 для монолітних густоармованих стін, класи суміші SF2, VS2, PA2. Матеріали: портландцемент CEM II/A-S 42,5 (густина 3,1 г/см³), зола-винесення ТЕС класу F (2,2 г/см³), мікрокремнезем ущільнений (2,2 г/см³), пісок кварцовий (2,65 г/см³), щебінь гранітний фракції 5–20 мм (2,7 г/см³), ПК-суперпластифікатор (1,07 г/см³).

Крок 1. Середня міцність на стиск кубів 150 мм з урахуванням запасу: $R_{ср}$ = 37 + 8 = 45 МПа.

Крок 2. Об'єм крупного заповнювача – 300 л/м³ (30 %, середина діапазону 28–35 %), маса – 0,300·2700 = 810 кг.

Крок 3. В'яжуче 470 кг/м³ у раціональній області п. 4.2: цемент 67,5 % (317,3 кг), зола 25 % (117,5 кг), мікрокремнезем 7,5 % (35,3 кг).

Крок 4. Вода 160 кг/м³ (В/В = 0,34), ПК – 1,1 % маси в'яжучого (5,2 кг).

Крок 5. Об'єм порошку: 317,3/3,1 + 117,5/2,2 + 35,3/2,2 = 102,4 + 53,4 + 16,0 = 171,8 л. Захоплене повітря – 20 л. Об'єм піску: 1000 – 300 – 171,8 – 160 – 4,8 – 20 = 343,4 л, маса – 343,4·2,65 = 910 кг.

Крок 6. Перевірка міцності за формулою (4.2) при A = 20 МПа (прийнято для цементу класу 42,5 і кубів 150 мм). За нормативними коефіцієнтами EN 206 (k = 0,4 і 2,0): $C_{екв}$ = 317,3 + 0,4·117,5 + 2,0·35,3 = 434,8 кг/м³, $R_б$ = 20·(434,8/160 – 0,5) = 44,3 МПа ≈ 45 МПа. За коефіцієнтами п. 4.3 (k = 1,09 і 1,69): $C_{екв}$ = 504,9 кг/м³, $R_б$ = 53,1 МПа. Отже, міцність забезпечується навіть за консервативної оцінки.

Перевірку параметрів складу наведено в табл. 4.7.

Таблиця 4.7

Розрахунковий склад СУБ класу С30/37 і перевірка параметрів (розрахунок автора)

Параметр	**Значення**	**Рекомендовано [2]**
Цемент CEM II/A-S 42,5, кг/м³	317,3	–
Зола-винесення, кг/м³	117,5	–
Мікрокремнезем, кг/м³	35,3	–
Вода, кг/м³	160	150–210
ПК-суперпластифікатор, кг/м³	5,2	–
Пісок, кг/м³	910	–
Щебінь 5–20 мм, кг/м³	810	–
Порошок, кг/м³	470	380–600
Тісто (з повітрям), л/м³	356,6	300–380
Крупний заповнювач, % об'єму	30	28–35
В/П за об'ємом	0,93	0,85–1,10
Пісок, % об'єму розчину	49	40–50
Розрахункова густина суміші, кг/м³	2355	–
Розрахункова емісія CO_2 від в'яжучого, кг/м³	265	–

Усі параметри перебувають у рекомендованих межах. Порівняно з контрольним складом [4] (450 кг цементу) витрата цементу менша на 30 %, а розрахункова емісія CO_2 від в'яжучого – на 29 %. Остаточне дозування ПК і, за потреби, VMA (0,02–0,1 % маси в'яжучого залежно від виду) встановлюють пробними замісами: якщо розплив менший за 660 мм – збільшують ПК на 0,1 %; якщо під час розпливу виникає кільце розчину або ситове розшарування перевищує 15 % – вводять VMA або збільшують об'єм порошку.

4.10 Висновки до розділу 4

1. Зола-винесення підвищує міцність СУБ переважно в пізньому віці (до +7,3 % у 90 діб при 30 %), мікрокремнезем – у ранньому (+8,3 % у 28 діб при 10 %), а їхня комбінація дає синергетичний приріст 4,2–4,5 відсоткового пункту понад суму окремих ефектів; найкращий склад ЗВ30МК7,5 підвищує міцність на стиск на 14,6–18,2 %, на розтяг – на 19–23 %.

2. Модель відгуку другого порядку (R^2 = 0,95–0,96) підтвердила позитивну взаємодію добавок і дозволила визначити раціональну область дозування: зола 25–30 %, мікрокремнезем 7,5–10 % маси в'яжучого.

3. Розрахункові коефіцієнти ефективності за формулою Боломея становлять 1,07–1,20 для золи, 1,59–1,80 для мікрокремнезему і 1,26–1,40 для їхньої суміші; для проєктування рекомендовано використовувати нормативні значення EN 206 як нижню межу.

4. Комплекс добавок зменшує проникність для хлоридів у 2,7 раза (до 1200 Кл у 90 діб і 800 Кл у 180 діб) і сорбційність на 33 %; між цими показниками отримано залежність $Q = 61017 \cdot S - 2627$ (R^2 = 0,92).

5. Метакаолін найбільше зменшує усадку (на 24 %), а раціональне співвідношення шлаку і вапнякового порошку в потрійному в'яжучому становить близько 4 : 1.

6. Шлак і цеоліт у віці 7 діб знижують міцність на 8,5–48,3 %, але до 180 діб більшість складів перевищує контрольний (до +7,3 %); їхні коефіцієнти ефективності становлять 0,65–0,92 у 28 діб і 0,97–1,56 у 180 діб.

7. Полікарбоксилати підвищують відношення R_3/R_{28} з 0,31 до 0,56–0,58. Адіабатичний розігрів бетону з 21 % золи на 3,6 °С менший за контрольний, а зі шлаком з високим вмістом глинозему – на 10,9–16,9 °С більший, хоча тепло виділяється в 1,9–3,1 раза повільніше.

8. Запропонований склад СУБ класу С30/37 з потрійним в'яжучим відповідає всім рекомендованим параметрам і потребує на 30 % менше цементу.

Розділ 5
ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Особливості умов праці під час виготовлення та укладання СУБ

Технологічний процес застосування СУБ включає дві стадії з різними умовами праці. Перша – приготування суміші на бетонозмішувальному вузлі або в лабораторії: приймання і зберігання цементу та мінеральних добавок у силосах, дозування тонкодисперсних порошків (золи-винесення, мікрокремнезему, метакаоліну), дозування рідких хімічних добавок, перемішування. Друга – транспортування автобетонозмішувачами, подавання бетононасосом і укладання суміші в опалубку на будівельному майданчику.

Загальні вимоги до безпеки встановлено Законом України «Про охорону праці» [25] і ДБН А.3.2-2-2009 [26]. До робіт допускаються працівники, які пройшли медичний огляд, вступний і первинний інструктажі, навчання і перевірку знань з питань охорони праці. Роботи з дозування порошкових матеріалів, обслуговування силосів і бетононасоса виконуються за затвердженими інструкціями, а роботи всередині силосів і бункерів – за нарядом-допуском.

Важливо, що СУБ сам по собі є засобом поліпшення умов праці: він усуває вібрування – одну з найбільш шумних і шкідливих операцій бетонування. Однак застосування СУБ створює і специфічні небезпеки: пил тонкодисперсних добавок, хімічні добавки, підвищений тиск суміші на опалубку.

5.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Основні фактори, їхні джерела і заходи захисту наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори під час виготовлення і укладання СУБ

Фактор	Джерело	Заходи захисту
Підвищена запиленість повітря	дозування і пересипання золи, мікрокремнезему, метакаоліну, цементу; очищення фільтрів силосів	закрите пневмотранспортування, аспірація дозаторів, місцеві відсмоктувачі, респіратори FFP2–FFP3
Підвищений рівень шуму	бетонозмішувач, компресори пневмотранспорту, бетононасос, глибинні вібратори (для звичайного бетону)	звукоізоляція операторської, навушники, застосування СУБ без вібрування
Локальна вібрація	ручні глибинні вібратори	для СУБ усувається повністю; для звичайного бетону – віброізольовані рукоятки, обмеження часу
Хімічна дія на шкіру та очі	цементне тісто (pH > 12), рідкі хімічні добавки	захисні окуляри, гумові рукавиці, спецодяг, промивання очей
Ураження електричним струмом	приводи змішувачів, дозаторів, насосів; вологе середовище	захисне заземлення, ПЗВ 30 мА, перевірка ізоляції
Підвищений тиск суміші на опалубку	гідростатичний тиск рідкої суміші за швидкого бетонування	розрахунок опалубки на повний гідростатичний тиск, контроль швидкості бетонування
Розрив бетоноводу	закупорювання бетоноводу, тиск насоса	перевірка з'єднань, заборона перебування біля бетоноводу під тиском
Падіння з висоти	бетонування стін і колон з риштувань	огородження, страхувальні пристрої
Обертові частини	змішувачі, шнеки, конвеєри	огородження, блокування під час обслуговування, аварійна кнопка

Специфічним для СУБ є фактор тиску на опалубку. Оскільки суміш має межу плинності лише 15–35 Па (розділ 3), за швидкого бетонування вона діє на опалубку майже як рідина з густиною 2350 кг/м³. Для стіни висотою 3 м тиск на низ опалубки сягає $p = \rho \cdot g \cdot h = 2350 \cdot 9{,}81 \cdot 3{,}0 = 69{,}2$ кПа. Руйнування опалубки під таким тиском є небезпечним для працівників, тому опалубку для СУБ розраховують на повний гідростатичний тиск, якщо обмеження тиску (за рахунок тиксотропії і швидкості бетонування) не підтверджено.

5.3 Оцінка рівня шуму під час бетонування

Допустимий еквівалентний рівень звуку на постійних робочих місцях становить 80 дБА [27]. Сумарний рівень звуку від кількох джерел визначається за формулою

$$L_{\Sigma} = 10 \cdot \lg \Sigma\, 10^{0,1 \cdot Li}, \qquad (5.1)$$

де L_i – рівень звуку і-го джерела на робочому місці, дБА.

Порівняємо бетонування стіни звичайною сумішшю і СУБ. Для розрахунку прийнято рівні звуку на відстані 1–3 м від джерела: бетононасос – 85 дБА, глибинний вібратор – 93 дБА (за паспортними даними поширених моделей обладнання).

Звичайна суміш (бетононасос + два вібратори):

$$L_{\Sigma} = 10 \cdot \lg(10^{8,5} + 2 \cdot 10^{9,3}) = 96,3 \text{ дБА}. \qquad (5.2)$$

СУБ (лише бетононасос): $L_{\Sigma} = 85$ дБА.

Результати показано на рис. 5.1. Застосування СУБ зменшує рівень звуку на робочому місці бетонника на 11,3 дБА, тобто інтенсивність звуку – приблизно в 13 разів. Перевищення норми зменшується з 16,3 до 5 дБА, і його можна усунути протишумними навушниками з ефективністю не менше 10 дБА. Крім того, повністю усувається локальна вібрація, яка є причиною вібраційної хвороби бетонників.

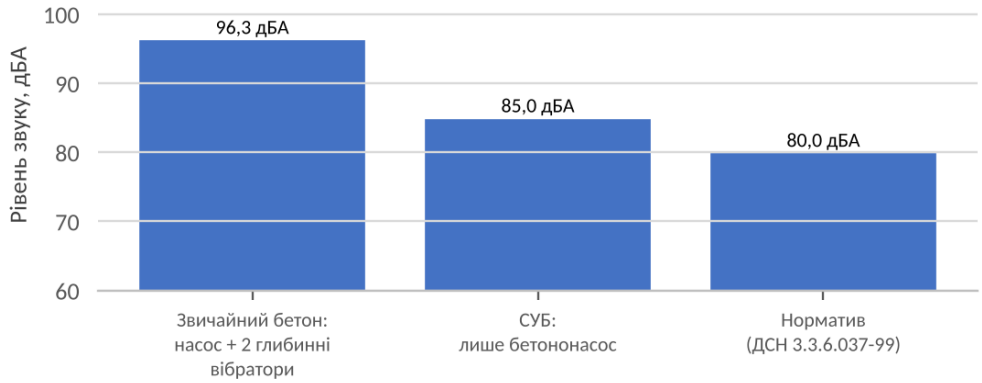

Рис. 5.1 Рівень звуку на робочому місці під час бетонування звичайною сумішшю і СУБ (розрахунок автора)

Для робіт поблизу житлової забудови (що типово для відновлення пошкоджених будівель) зменшення шуму на 11 дБА також дозволяє розширити час виконання робіт.

5.4 Розрахунок повітрообміну у приміщенні дозування мінеральних добавок

Під час дозування тонкодисперсних мінеральних добавок у повітря робочої зони виділяється пил. Найжорсткіші вимоги стосуються пилу аморфного діоксиду кремнію (мікрокремнезему) і метакаоліну. Гігієнічні регламенти допустимого вмісту хімічних речовин у повітрі робочої зони встановлено наказом МОЗ України [28]; у розрахунку для пилу змішаного складу з аморфним кремнеземом прийнято $C_{доп} = 2$ мг/м³. Необхідна продуктивність вентиляції:

$$L = G/(C_{доп} - C_{пр}), \qquad (5.3)$$

де G – інтенсивність виділення пилу, мг/год; $C_{доп}$ – допустима концентрація, мг/м³; $C_{пр}$ – концентрація пилу в припливному повітрі, мг/м³.

Для приміщення дозування розміром 6 × 4 × 3,5 м (V = 84 м³) за інтенсивності пиловиділення G = 1500 мг/год (дозатор з аспірацією, залишкове виділення через нещільності) і $C_{пр} = 0{,}3$ мг/м³:

$$L = 1500/(2{,}0 - 0{,}3) = 882 \text{ м}^3/\text{год}. \qquad (5.4)$$

Кратність повітрообміну $k = L/V = 882/84 = 10{,}5$ год$^{-1}$. Таку кратність загальнообмінна вентиляція забезпечує з великими енерговитратами, тому основними заходами мають бути: закрите пневмотранспортування добавок із силосів, місцеві відсмоктувачі біля завантажувальних отворів, рукавні фільтри на силосах. Загальнообмінну вентиляцію приймають продуктивністю не менше 1000 м³/год (із запасом 13 %), а працівники під час відкритих операцій використовують респіратори.

5.5 Безпека під час роботи з хімічними добавками та електробезпека

ПК-суперпластифікатори і модифікатори в'язкості є малонебезпечними речовинами, однак концентровані розчини подразнюють шкіру й очі, а деякі прискорювачі тужавлення мають лужну або кислу реакцію. Тому необхідно:

– зберігати добавки в маркованих закритих ємностях з паспортами безпеки;

– готувати робочі розчини в окремому приміщенні з вентиляцією і засобами промивання очей;

– використовувати захисні окуляри, гумові рукавиці та фартухи.

Вимоги електробезпеки за НПАОП 40.1-1.21-98 [29]:

– корпуси змішувачів, дозаторів, насосів і щитів заземлювати;

– живлення переносного обладнання на майданчику здійснювати через ПЗВ зі струмом спрацювання не більше 30 мА;

– переносні світильники в мокрих приміщеннях живити напругою не вище 12 В;

– кабелі прокладати так, щоб унеможливити їх пошкодження автобетонозмішувачами і бетоноводом.

5.6 Безпека в надзвичайних ситуаціях

В умовах воєнного стану на будівельному майданчику і бетонному заводі мають бути визначені найближчі укриття та порядок дій за сигналом «Повітряна тривога». Під час тривоги роботи припиняють, бетононасос зупиняють і скидають тиск у бетоноводі, обладнання знеструмлюють, працівників евакуюють до укриття. Незабетоновану частину конструкції після відновлення робіт оформлюють як робочий шов з відповідною підготовкою поверхні.

СУБ широко застосовують саме для будівництва захисних споруд цивільного захисту, вимоги до яких встановлено ДБН В.2.2-5:2023 [30]: густоармовані стіни і перекриття укриттів важко якісно забетонувати звичайною сумішшю, а СУБ з потрійним в'яжучим забезпечує щільну структуру і низьку

проникність бетону (розділ 4). Тому застосування СУБ сприяє не лише безпеці праці, а й надійності захисних споруд.

5.7 Висновки до розділу 5

1. Під час виготовлення і укладання СУБ діють пил тонкодисперсних добавок, шум, хімічні речовини, електричний струм і підвищений тиск суміші на опалубку (до 69 кПа для стіни висотою 3 м).

2. Застосування СУБ усуває вібрування і зменшує рівень звуку на робочому місці бетонника з 96,3 до 85 дБА, тобто на 11,3 дБА.

3. Для приміщення дозування мінеральних добавок необхідний повітрообмін не менше 882 м³/год; основними заходами є закрите пневмотранспортування і місцеві відсмоктувачі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі на основі аналізу та узагальнення результатів сучасних досліджень встановлено закономірності впливу комплексу хімічних і мінеральних добавок на реологічні та фізико-механічні характеристики самоущільнювальних бетонних сумішей і бетонів і розроблено рекомендації щодо підбору їхнього складу.

1. Самоущільнювальна суміш має поєднувати низьку межу плинності (десятки паскалів) і достатню пластичну в'язкість. Ці вимоги задовольняє лише комплекс добавок: ПК-суперпластифікатор знижує межу плинності (на 91 % при 0,2–0,3 % маси в'яжучого з насиченням після 0,4 %), а тонкодисперсні мінеральні добавки або модифікатори в'язкості забезпечують стійкість суміші.

2. Заміна 20–40 % цементу золою-винесенням збільшує розплив з 660 до 744 мм і зменшує t_{500} з 3,6 до 2,7 с; отримано залежність $D = 661 + 2{,}15 \cdot FA$ ($R^2 = 0{,}99$). Методом абсолютних об'ємів показано, що поряд зі сферичною формою частинок цей ефект зумовлений зростанням об'єму порошку на 17 % і об'єму тіста на 25 л/м³ при заміні цементу за масою.

3. Мікрокремнезем підвищує в'язкість суміші (час витікання з V-лійки до 11,9 с) і прискорює гідратацію (основний пік тепловиділення зміщується приблизно на 1 год на кожен відсоток добавки). У комбінації із 30 % золи він дає суміш з найбільшим розпливом (755 мм), найкращою здатністю проходити крізь арматуру ($H_2/H_1 = 0{,}94$) і оціненою межею плинності 16,2 Па – удвічі меншою, ніж у контрольній суміші.

4. Комплекс «зола + мікрокремнезем» дає синергетичний ефект: приріст міцності на стиск складу з 30 % золи і 7,5 % мікрокремнезему (14,6 % у 28 діб і 18,2 % у 90 діб) перевищує суму ефектів окремих добавок на 4,2–4,5 відсоткового пункту; міцність на розтяг зростає на 19–23 %.

5. Побудовано модель відгуку другого порядку для приросту міцності ($R^2 = 0{,}95$–$0{,}96$), яка має додатний коефіцієнт взаємодії добавок. Визначено раціональну область дозування: зола-винесення 25–30 %, мікрокремнезем 7,5–10 % маси в'яжучого.

6. Розраховані за формулою Боломея коефіцієнти ефективності становлять 1,07–1,20 для золи, 1,59–1,80 для мікрокремнезему і 1,26–1,40 для їхньої суміші, а для шлаку і природного цеоліту – 0,65–0,92 у 28 діб і 0,97–1,56 у 180 діб. Для золи вони значно перевищують нормативне значення EN 206 (0,4), що пояснюється реологічним внеском золи; для проєктування рекомендовано використовувати нормативні значення як нижню межу.

7. Мінеральні добавки змінюють ефективність суперпластифікатора: при В/В = 0,40 тісто з 30 % золи потребує на 60 % більше ПК для насичення, ніж тісто без добавок; шлак зменшує потребу в ПК у бетонній суміші на 25–29 %, цеоліт збільшує до 92 % (модель ПК = 0,98 + 0,085·Ц – 0,003·ГШ, R^2 = 0,95). Полікарбоксилати зберігають 70–74 % осадки конуса через 2 год проти 9–13 % для добавок попереднього покоління і підвищують відношення R_3/R_{28} з 0,31 до 0,56–0,58.

8. Для масивних конструкцій з СУБ найменший адіабатичний розігрів дає зола-винесення (на 3,6 °С менше за контрольний бетон), тоді як шлак з високим вмістом глинозему збільшує його на 10,9–16,9 °С при повільнішому тепловиділенні; тому шлак слід перевіряти за вмістом Al_2O_3.

9. Комплекс добавок зменшує проникність бетону для хлоридів у 2,7 раза (з 3200 до 1200 Кл у 90 діб) і сорбційність на 33 %; отримано залежність Q = 61017·S – 2627 (R^2 = 0,92). Метакаолін найбільше зменшує усадку (на 24 %), а 10 % метакаоліну з 10 % золи рисового лушпиння підвищують міцність на 26–48 % у віці 7–365 діб. Раціональне співвідношення шлаку і вапнякового порошку в потрійному в'яжучому становить близько 4 : 1.

10. Розроблено алгоритм підбору складу СУБ з потрійним в'яжучим і наведено приклад складу класу С30/37 (цемент 317 кг, зола 118 кг, мікрокремнезем 35 кг, вода 160 кг, ПК 5,2 кг на 1 м³), параметри якого відповідають рекомендаціям Європейських настанов, а витрата цементу і розрахункова емісія CO_2 від в'яжучого на 29–30 % менші, ніж у контрольного складу.

11. Розроблено заходи з охорони праці. Показано, що застосування СУБ усуває вібрування і зменшує рівень звуку на робочому місці з 96,3 до 85 дБА; для приміщення дозування мінеральних добавок необхідний повітрообмін не менше 882 м³/год.

12. Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальну перевірку отриманих залежностей на українських матеріалах (золах Ладижинської, Бурштинської ТЕС, шлаках металургійних комбінатів), на вивчення збереження розпливу в часі і на оцінку тиску СУБ на опалубку.

GENERAL CONCLUSIONS

The thesis establishes, on the basis of the analysis and generalisation of recent studies, the regularities of the influence of a complex of chemical and mineral admixtures on the rheological and physical-mechanical properties of self-compacting concrete (SCC) and proposes recommendations for mix design.

1. An SCC mix must combine a low yield stress (tens of pascals) with sufficient plastic viscosity. This is achieved only by a complex of admixtures: a polycarboxylate superplasticizer reduces the yield stress (by 91 % at 0.2–0.3 % of binder, with saturation above 0.4 %), while fine mineral additions or viscosity modifying admixtures provide stability.

2. Replacing 20–40 % of cement with fly ash increases the slump flow from 660 to 744 mm and reduces t500 from 3.6 to 2.7 s; the relationship $D = 661 + 2.15 \cdot FA$ ($R^2 = 0.99$) was obtained. The absolute volume analysis showed that, besides the spherical particle shape, the effect is caused by a 17 % increase in powder volume and a 25 L/m³ increase in paste volume when cement is replaced by mass.

3. Silica fume increases viscosity (V-funnel time up to 11.9 s) and accelerates hydration. Combined with 30 % fly ash, it gives the mix with the largest slump flow (755 mm), the best passing ability (H2/H1 = 0.94) and an estimated yield stress of 16.2 Pa, half that of the reference mix.

4. The fly ash–silica fume combination is synergistic: the strength gain of the mix with 30 % fly ash and 7.5 % silica fume (14.6 % at 28 days and 18.2 % at 90 days) exceeds the sum of individual effects by 4.2–4.5 percentage points.

5. A second-order response model ($R^2 = 0.95–0.96$) with a positive interaction term was built, and the rational dosage range was determined: fly ash 25–30 % and silica fume 7.5–10 % by mass of binder.

6. The efficiency factors calculated with Bolomey's formula are 1.07–1.20 for fly ash, 1.59–1.80 for silica fume and 1.26–1.40 for their combination, and 0.65–0.92 at 28 days and 0.97–1.56 at 180 days for slag and natural zeolite; the EN 206 values are recommended as a lower bound for design.

7. Mineral additions change the efficiency of the superplasticizer: at w/b = 0.40 a paste with 30 % fly ash needs 60 % more PCE to reach saturation; slag reduces the PCE demand of SCC by 25–29 %, while zeolite increases it by up to 92 % (PCE = 0.98 + 0.085·Z – 0.003·S, R^2 = 0.95). PCE retains 70–74 % of the slump after 2 hours and increases the R3/R28 ratio from 0.31 to 0.56–0.58.

8. Fly ash gives the lowest adiabatic temperature rise in massive SCC elements, whereas high-alumina slag increases it by 10.9–16.9 °C, although heat is released 1.9–3.1 times more slowly.

9. The admixture complex reduces chloride penetrability 2.7 times and sorptivity by 33 %; the relationship Q = 61017·S – 2627 (R^2 = 0.92) was obtained. Metakaolin reduces drying shrinkage the most (by 24 %), and the rational slag to limestone ratio in a ternary binder is about 4 : 1.

10. A mix design algorithm was developed and illustrated by a C30/37 SCC with a ternary binder that meets the European Guidelines and uses 30 % less cement than the reference mix.

11. Occupational safety measures were developed: SCC eliminates vibration and reduces the noise level at the workplace from 96.3 to 85 dBA; a ventilation rate of at least 882 m^3/h is required in the mineral additive dosing room.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Okamura H., Ouchi M. Self-compacting concrete. Journal of Advanced Concrete Technology. 2003. Vol. 1, No. 1. P. 5–15. DOI: 10.3151/jact.1.5.

2. The European guidelines for self-compacting concrete: specification, production and use / BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, EFNARC. Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005. 68 p.

3. Zhao L., Li T., Wang W. The effects and mechanisms of water-soluble viscosity modifying admixtures in the performance evolution of cementitious materials: a comprehensive review. Materials. 2026. Vol. 19, No. 12. Article 2466. DOI: 10.3390/ma19122466.

4. Padavala S. S. A. B., Avudaiappan S., Paluri Y., Bharath Ch. N., Prathipati S. R. R. T., Kumara A. M. Self-compacting concrete with fly ash and silica fume: experimental evaluation, microstructural analysis, and machine learning modeling. Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Article 45146. DOI: 10.1038/s41598-025-33180-7.

5. Begentayev M. M., Kuldeyev E. I., Zhumadilova Zh. O., Akhmetov D. A., Tolegenova A. K., Zhagifarov A. M., Nurlybayev R. E., Alikhan A. Investigation of waste-based self-compacting concrete: analysis of rheology and hydration with silica fume and fly ash. ES Materials & Manufacturing. 2025. Vol. 28. Article 1498. DOI: 10.30919/mm1498.

6. Кіракевич І. І., Саницький М. А., Чайковська Р. В. Технологія самоущільнювальних бетонів, що тверднуть у різних температурних умовах. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. 2015. С. 155–159.

7. Кіракевич І. І. Властивості свіжозаформованого та затверділого самоущільнювального бетону, що містить додаткові цементуючі матеріали. Теорія та будівельна практика. 2025. Т. 7, № 1. С. 42–48. DOI: 10.23939/jtbp2025.01.042.

8. Троян В. В., Кіндрась Б. П. Підвищення тріщиностійкості високоміцних бетонів, здатних до самоущільнення. Technology Audit and

Production Reserves. 2021. Vol. 1, No. 1(57). C. 17–24. DOI: 10.15587/2706-5448.2021.225500.

9. Specification and guidelines for self-compacting concrete. Farnham : EFNARC, 2002. 32 p.

10. ДСТУ EN 206:2018. Бетон. Технічні вимоги, властивості, виробництво та відповідність (EN 206:2013+A1:2016, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.

11. Саницький М. А., Позняк О. Р., Кіракевич І. І., Русин Б. Г. Високофункціональні бетони на основі модифікаторів нової генерації. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. 2008. С. 191–196.

12. Chen J., Tan X., Wang Q. Calculation method for punching shear capacity of reinforced UHPC two-way slabs based on critical shear crack theory. Buildings. 2026. Vol. 16, No. 4. Article 835. DOI: 10.3390/buildings16040835.

13. EN 12350-8:2019. Testing fresh concrete – Part 8: Self-compacting concrete – Slump-flow test. Brussels : CEN, 2019.

14. Wallevik O. H., Wallevik J. E. Rheology as a tool in concrete science: the use of rheographs and workability boxes. Cement and Concrete Research. 2011. Vol. 41, No. 12. P. 1279–1288.

15. Barabash I. V., Babiy I. N., Streltsov K. O. Intensive separate technology and its influence on the properties of cement-water compositions, solutions and concretes on their basis. Modern Construction and Architecture. 2022. No. 2. P. 44–51. DOI: 10.31650/2786-6696-2022-2-44-51.

16. Wang D., Kuang L., Ding S., Sun Y., Li Y., Chen Z., Ren J., Li X. Influence of polycarboxylate superplasticizer on rheological behavior and early interfacial evolution of phosphogypsum-based supersulfated cement. Polymers. 2026. Vol. 18, No. 9. Article 1021. DOI: 10.3390/polym18091021.

17. Gill A. S., Siddique R. Strength and micro-structural properties of self-compacting concrete containing metakaolin and rice husk ash. Construction and Building Materials. 2017. Vol. 157. P. 51–64. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.088.

18. Thongsanitgarn P., Wongkeo W., Nochaiya T., Chaipanich A. Synergy of ground granulated blast-furnace slag and limestone powder in ternary cement: effects on heat of hydration and strength development. Journal of Metals, Materials and Minerals. 2026. Vol. 36, No. 1. Article e2394. DOI: 10.55713/jmmm.v36i1.2394.

19. Gill A. S. Strength and durability properties of self-compacting concrete incorporating rice husk ash and metakaolin : PhD thesis. Patiala : Thapar Institute of Engineering and Technology, 2019. 142 p.

20. Bayat H., Ramezanianpour A. A., Ramezanianpour A. M., Farnood Ahmadi P., Naghizade A. Mechanical and rheological properties of self-compacting concrete containing slag and natural zeolite. AUT Journal of Civil Engineering. 2020. Vol. 4, No. 1. P. 81–90. DOI: 10.22060/ajce.2019.13039.5314.

21. Cui T., Alshahrani A., Kulasegaram S. Effects of mineral additions on the rheological properties of self-compacting concrete: a review. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Construction Materials. 2024. Vol. 177, No. 6. P. 337–351. DOI: 10.1680/jcoma.22.00105.

22. Zayed A., Shanahan N., Tran V., Markandeya A., Williams A., Elnihum A. Effects of chemical and mineral admixtures on performance of Florida structural concrete : final report BDV25-977-02. Tampa : University of South Florida ; Florida Department of Transportation, 2016. 359 p.

23. Roussel N., Coussot P. «Fifty-cent rheometer» for yield stress measurements: from slump to spreading flow. Journal of Rheology. 2005. Vol. 49, No. 3. P. 705–718.

24. Nayak D. K., Abhilash P. P., Singh R., Kumar R., Kumar V. Compatibility of ether-based poly-carboxylate superplasticizer with mineral admixtures blended with OPC. Civil Engineering and Architecture. 2022. Vol. 10, No. 6. P. 2686–2705. DOI: 10.13189/cea.2022.100633.

25. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12 (дата звернення: 03.10.2026).

26. ДБН А.3.2-2-2009 (НПАОП 45.2-7.02-12). Система стандартів безпеки праці. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2012.

27. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Київ : МОЗ України, 1999.

28. Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних речовин у повітрі робочої зони : наказ Міністерства охорони здоров'я України від 14.07.2020 № 1596.

29. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Київ : Держнаглядохоронпраці України, 1998.

30. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. Київ : Мінрегіон України, 2023.