

РОЗРОБКА ЕФЕКТИВНИХ БЕТОНІВ ДЛЯ ВЛАШТУВАННЯ ПЛОСКИХ ПОКРІВЕЛЬ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі узагальнено результати досліджень, спрямованих на створення ефективних бетонів для облаштування плоских покрівель громадських та житлових будівель. Основну увагу приділено застосуванню самоущільнюючих бетонів (СУБ) із використанням промислових відходів (зола-винос, склобій, мікрокальцит, шлаки) та поліпропіленової фібри для підвищення довговічності, водонепроникності та морозостійкості. Проаналізовано структуру бетонної матриці, механізм самоущільнення, вплив добавок на фізико-механічні характеристики, а також показники експлуатаційної надійності в умовах циклічного зволоження, температурних деформацій та впливу кліматичних факторів. Показано, що оптимальна кількість комплексних мінеральних відходів у складі СУБ становить 10–15%, що забезпечує підвищення міцності на 15–20%, морозостійкості — у 1,8–2,1 рази, водонепроникності — до рівня W12–W20. Використання поліпропіленової фібри зменшує утворення мікротріщин та підвищує тріщиностійкість на 40–90%. Узагальнено матеріали експериментальних досліджень і наведено рекомендації щодо застосування таких бетонів у сучасному покрівельному будівництві.

Ключові слова: самоущільнюючий бетон, плоскі покрівлі, фібробетон, зола-винос, склобій, морозостійкість, водонепроникність, довговічність.

Abstracts

The paper summarizes the results of research aimed at creating effective concretes for arranging flat roofs of public and residential buildings. The main attention is paid to the use of self-compacting concretes (SCC) using industrial waste (fly ash, cullet, microcalcite, slag) and polypropylene fiber to increase durability, water resistance and frost resistance. The structure of the concrete matrix, the self-compacting mechanism, the effect of additives on physical and mechanical characteristics, as well as indicators of operational reliability under conditions of cyclic moistening, temperature deformations and the influence of climatic factors are analyzed. It is shown that the optimal amount of complex mineral waste in the composition of SCC is 10–15%, which provides an increase in strength by 15–20%, frost resistance by 1.8–2.1 times, and water resistance to the level of W12–W20. The use of polypropylene fiber reduces the formation of microcracks and increases crack resistance by 40–90%. Materials from experimental studies are summarized and recommendations for the use of such concretes in modern roofing construction are given.

Key words: self-compacting concrete, flat roofs, fiber concrete, fly ash, broken glass, frost resistance, waterproofing, durability.

Вступ

Плоскі покрівлі є одним з найбільш поширених конструктивних елементів сучасних громадських і житлових будівель. Вони зазнають підвищених експлуатаційних впливів — атмосферних опадів, циклічного заморожування-відтавання, температурних деформацій, локальних навантажень, впливу сонячної радіації та зволоження. Основною проблемою традиційних бетонних покриттів є недостатня водонепроникність, розтріскування та скорочений строк служби внаслідок дії кліматичних факторів.

В умовах сучасних будівельних технологій особливо актуальними стають модифіковані бетони підвищеної щільності та тріщиностійкості, здатні забезпечити герметичність і довговічність покрівельних систем. Самоущільнюючі бетони (СУБ) є одним із найбільш перспективних матеріалів для плоских покрівель, оскільки забезпечують формування однорідної безповітряної структури без віброущільнення, знижують пористість та підвищують експлуатаційні властивості [1–6].

У той же час, включення промислових відходів — золи-виносу, мікрокальциту, мікрокремнезему, склобою, доменного шлаку — дозволяє покращити структуру цементного каменю, підвищити щільність та підсилити пуцоланові реакції, що позитивно впливає на морозостійкість і водостійкість [7]. Додавання поліпропіленової фібри забезпечує контроль усадкових і температурних тріщин [6].

Метою дослідження є розроблення ефективного складу бетонів для влаштування плоских покрівель з покращеними показниками міцності, морозостійкості, водонепроникності та тріщиностійкості шляхом комплексної модифікації структури.

Матеріали та методи дослідження

У роботі застосовано лабораторні методи визначення фізико-механічних властивостей бетонів згідно з ДСТУ 9208:2022 «Бетони важкі. Технічні умови», ДСТУ Б В.2.7-214:2009 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками», ДСТУ Б В.2.7-47-96 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення морозостійкості. Загальні вимоги», ДСТУ Б В.2.7-170:2008 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності» та іншими нормативними документами [8-12]. Дослідження включали:

- підбір складів СУБ з різною кількістю промислових відходів (0–20% маси цементу);
- аналіз реологічних параметрів СУБ (розтікання конуса, здатність до самоущільнення);
- визначення міцності на стиск у віці 7, 28 та 90 діб;
- аналіз впливу різних типів відходів на пористість та капілярне всмоктування;
- оцінку морозостійкості F за критерієм втрати маси та зниження міцності;
- оцінку водонепроникності за капілярним всмоктуванням;
- оцінку тріщиностійкості фібробетону.

Використано самоущільнюючу бетонну суміш, у склад якої вводили 5–20% мінеральних промислових відходів (золу-винос ТЕС, подрібнене скло (склобій <0,63 мм), мікрокальцит, доменний гранульований шлак) та 0,6–1,0 кг/м³ поліпропіленової фібри.

Бетонні суміші готувалися у лабораторному примусовому змішувачі. Послідовність завантаження компонентів була сталою для всіх серій дослідів: спочатку в змішувач засипали сухі компоненти (цемент, пісок, мінеральні відходи, мікрокальцит, склобій), після чого додавали щебінь. Суху суміш перемішували протягом 60–90 секунд до однорідності. Далі вводилась частина води з розчиненим суперпластифікатором, після чого суміш перемішувалася ще 120 секунд. На завершальному етапі вводилась поліпропіленова фібра, яку додавали поступово для забезпечення рівномірного розподілу в об'ємі бетону. Загальний час перемішування однієї порції складав близько 5 хвилин.

Формування зразків здійснювалося без вібрації, оскільки СУБ має здатність до самоущільнення. Бетонна суміш самостійно розтікалась у формах повільним заповненням з мінімальним механічним втручанням. Поверхня зразків вирівнювалася металевим шпателем.

Для подальших випробувань готувалися такі типи зразків: куби розміром 100×100×100 мм для визначення міцності на стиск та решти фізичних властивостей; призми 100×100×400 мм для визначення міцності на згин.

Результати дослідження

Таблиця 1 містить узагальнений оптимізований склад самоущільнювального бетону, модифікованого промисловими відходами та поліпропіленовою фіброю. Основним в'язучим є цемент СЕМ П/А-ЛЛ 42.5 (М500) у кількості 400–440 кг, який забезпечує необхідний рівень початкової та кінцевої міцності. Пісок фракції 0–2 мм і щебінь 5–10 мм формують раціональний гранулометричний склад, що сприяє самоущільненню суміші без застосування вібрації.

Комплекс мінеральних відходів – зола-винос, подрібнений склобій та мікрокальцит/шлак – виконує роль активних та інертних мікродобавок, що ущільнюють структуру цементного каменю, знижують пористість і підвищують морозостійкість та водонепроникність. Мікрокремнезем забезпечує додаткове мікронаповнення та активує пуцоланові реакції, що істотно впливає на щільність і довговічність бетону.

Реологічні властивості суміші регулюються суперпластифікатором і модифікатором в'язкості, які забезпечують високу плинність, відсутність розшаровування та стабільність СУБ під час заливання. Водцементне відношення на рівні $\approx 0,32$ дозволяє отримати щільну й однорідну структуру.

Поліпропіленова фібра (0,6–1,0 кг/м³) виконує роль мікроармування, зменшуючи утворення усадкових і температурних мікротріщин, підвищуючи тріщиностійкість і експлуатаційну надійність бетонного шару.

У цілому склад, наведений у Таблиці 1, є комплексно збалансованим і забезпечує високі міцнісні, морозостійкі та гідроізоляційні властивості бетону, необхідні для експлуатації у плоских покриттях.

Таблиця 1 – Склад СУБ з відходами та фіброю

Компонент	Од.	Кількість	Призначення
Цемент М500	кг	400–440	Основа
Пісок 0–2 мм	кг	780–850	Заповнювач
Щебінь 5–10 мм	кг	740–870	Заповнювач
Зола-винос	кг	40–80	Пуцолан
Склобій <0,63 мм	кг	20–40	Нанонаповнювач
Мікрокальцит/шлак	кг	20–50	Мікрофіллер
Мікрокремнезем	кг	10–25	Активатор
Вода	л	150–165	В/Ц≈0,32
Суперпластифікатор	%	1,2–1,8	Регулювання рухливості
Модифікатор в'язкості	%	0,10–0,20	Стабілізація суміші
ПП-фібра 6–12 мм	кг	0,6–1,0	Армування

Таблиця 2 подає порівняльні експлуатаційні характеристики звичайного бетону, самоущільнюючого бетону (СУБ) та його модифікованих варіантів із додаванням промислових відходів і поліпропіленової фібри. Видно, що перехід від традиційного бетону до СУБ уже забезпечує суттєве підвищення міцності, водонепроникності та морозостійкості завдяки щільнішій структурі та зниженій пористості цементного каменю.

Таблиця 2 – Властивості бетонних сумішей (СУБ + відходи + фібра)

Показник	Звичайний бетон	СУБ без відходів	СУБ + 15% відходів	СУБ + 15% відходів + фібра+СП
Міцність на стиск, МПа	32–35	42	52	52–54
Водонепроникність, W	W4–W6	W8	W12–W14	W14–W16
Морозостійкість, цикли	F150–F200	F200	F330	F330–F380
Пористість, %	12–16	10–12	8–9	7–8
Рухливість (розтікання конуса), мм	160–200	250	280–320	280–320
Тріщиностійкість (відн. од.)	1,0	1,2	1,4	2,0–2,3
Усадка, мм/м	0,5–0,7	0,45	0,40	0,30–0,35
Орієнтовний строк служби, років	10–15	20–25	25–35	30–40

Додавання 15% комплексних мінеральних відходів призводить до подальшого зростання експлуатаційних властивостей: міцність підвищується до 52 МПа, клас водонепроникності зростає до W12–W14, а морозостійкість – до F330, що значно перевищує показники контрольної суміші. У таких складах спостерігається зменшення пористості до 8–9% та помітне зниження усадки.

Введення поліпропіленової фібри забезпечує додаткове підвищення тріщиностійкості, яка досягає рівня 2,0–2,3 умовних одиниць, що вдвічі перевищує параметри звичайного бетону. Це позитивно позначається на довговічності матеріалу: прогнозований строк служби підвищується до 30–40 років, що є ключовою перевагою для плоских покрівель, які працюють у складних кліматичних умовах.

Таким чином, дані таблиці підтверджують, що поєднання технології самоущільнювального бетону, промислових відходів і мікроармування фіброю є ефективним шляхом отримання довговічного, щільного та гідротехнічно стійкого покрівельного бетону.

Висновки

1. Додавання мінеральних відходів (золи-виносу, склобою та мікрокальциту) у кількості 10–15% маси цементу забезпечило ущільнення структури цементного каменю та зниження капілярної пористості, що позитивно вплинуло на міцність і довговічність бетонів.

2. Модифіковані бетонні суміші продемонстрували морозостійкість на рівні F350, що пов'язано зі зменшенням водонасичення, активізацією пуцоланових реакцій та підвищенням однорідності структури внаслідок мікронаповнення.

3. Реальна рухливість сумішей відповідала класу P5 (22–24 см), що забезпечує достатню пластичність і формостійкість матеріалу при влаштуванні покрівельних стяжок без ризику розшарування.

4. Введення поліпропіленової фібри (0,6–1,0 кг/м³) сприяло зменшенню усадкових і температурних мікротріщин та підвищило тріщиностійкість, що покращило поведінку бетону під час циклічних температурних впливів.

5. Комплексне застосування відходів і фібри забезпечило значне підвищення водонепроникності (до W10–W12), що є критично важливим для довговічності бетонних шарів плоских покрівель.

6. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих модифікованих бетонів для експлуатації у покрівельних конструкціях, де необхідні підвищена щільність, стійкість до заморозування-відтавання та мінімізація дефектів протягом тривалого терміну служби.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Самоущільнюючі бетонні суміші. URL: <https://www.housebeton.com/betonni-sumishi/self-compacting-concrete-mixes>
2. Кіракевич І.І., Марущак У.Д., Саницький М.А., Стенишин М.С. Самоущільнювальні бетони зі швидким наростанням міцності. URL: <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/31bc6849-6005-418b-ac63-958e2238ba8d/content>
3. Кіракевич І.І., Саницький М.А., Чайковська Р.В. Технологія самоущільнювальних бетонів, що тверднуть у різних температурних умовах. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/4207/26165.pdf>
4. Болотських О. М., Шаповал С. В. Переваги самоущільнювального бетону і перспективи його застосування в Україні. *Науковий вісник будівництва*. 2021. Том 103 № 1. С. 228–234.
5. Рунова Р.Ф., Гоц В.І., Саницький М.А. та ін. Конструкційні матеріали нового покоління та технології їх впровадження в будівництво. К.: УВПК „ЕксОб”, 2008. 360 с.
6. Гаращенко Д.П. Дисперсно-армований самоущільнюючий бетон на механоактивованому портландцементі : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05. Одеса, 2021. 159 с.
7. Дворкін Л.Й. Будівельні розчини: Навчальний посібник. Київ: Каравела, 2021. 222 с.
8. ДСТУ 9208:2022. Бетони важкі. Технічні умови. Чинний від 2023-09-01. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2023. 22 с.
9. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. Чинний від 2010-09-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 43 с.
10. ДСТУ Б В.2.7-47-96. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення морозостійкості. Загальні вимоги. Чинний від 1997-04-01. Вид. офіц. Київ : Держкоммістобудування, 1995. 22 с.
11. ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності. Чинний від 2009-07-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 36 с.
12. ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013. Настанова щодо визначення складу важкого бетону. Чинний від 2014-07-01. Вид. офіц. Київ: УкрНДНЦ, 2014. 91 с.

Кравчук Вадим Андрійович – студент групи 1Б-24м, Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Бондар Альона Василівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: bondarav@vntu.edu.ua

Kravchuk Vadym – student of group 1B-24m, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Bondar Alena – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction, Urban Economy and Architecture, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: bondarav@vntu.edu.ua