



KAPITEL 9 / CHAPTER 9⁹ GLASS WASTE AND FEATURES OF THEIR APPLICATION IN CONCRETE

DOI: 10.30890/2709-2313.2025-45-02-011

Вступ

Скляні відходи накопичуються стабільно й у великих обсягах, але їх повторне використання не завжди реалізується як системне рішення. Частина склобою не доходить до переробки через змішані фракції, наявність домішок, нерівномірність постачання або через високу вартість підготовки сировини. У результаті скло потрапляє на полігони, де практично не розкладається та займає значні площі. Для будівельної сфери це не абстрактне екологічне питання, а конкретна інженерна задача: можливість перетворення скляного бою на контрольовану вторинну сировину, яка у складі матеріалу забезпечує прогнозований результат без суттєвих коливань якості.

Один із реалістичних напрямів повторного використання скляних відходів – їх застосування у бетоні. Бетон є композиційним матеріалом, характеристики якого формуються поєднанням зернового складу заповнювачів, властивостей цементного каменю, водоцементного відношення та умов твердіння. З огляду на це введення вторинних матеріалів у бетон доцільно розглядати як інженерну процедуру, що включає визначення ролі компонента (заповнювач або добавка), підбір фракційного складу, оцінку впливу на властивості суміші та подальше підтвердження міцності й експлуатаційних характеристик. Підходи до управління будівельними відходами підкреслюють, що повторне використання можливе лише за умови підготовки та контролю вторинної сировини за ключовими показниками, оскільки в іншому випадку вона стає джерелом технологічної нестабільності [1].

Скло відрізняється від природних заповнювачів формою частинок і хімічною природою. У бетонній суміші воно може по-іншому впливати на

⁹Authors: Valovyi Oleksandr Ivanovych, Valovyi Maksym Oleksandrovych, Balaba Denys Valeriyovych
Author's sheets: 0,47



рухливість і ущільнюваність, а після твердіння – на формування контактної зони «заповнювач–цементний камінь». Окремим аспектом є хімічна взаємодія, оскільки скло містить значну частку кремнезему, і в лужному середовищі цементного каменю можуть виникати небажані процеси за відсутності контролю дисперсності та функціональної ролі скляного компонента [2]. Водночас наявні дослідження свідчать, що за коректного підбору складу та технології склобій може бути придатним компонентом бетону без критичного погіршення властивостей, а в окремих випадках – із позитивним ефектом [2].

Метою даної монографії є узагальнення підходів до використання скляного бою в бетоні, аналіз його впливу на властивості бетонної суміші та міцність затверділого матеріалу, а також окреслення чинників, що визначають довговічність і відтворюваність технології. Окрема увага приділяється прикладним експериментальним даним та їх коректній інтерпретації [3]. Для ширшого контексту використано узагальнення щодо застосування промислових відходів у будівельних матеріалах і підходи до контролю якості та експлуатаційних показників [4], а також положення щодо ролі силікатних добавок різної структури у цементних системах [5].

9.1 Скляний бій як компонент бетонної композиції

Скляний бій є вторинним матеріалом із відносно стабільним хімічним складом, особливо у випадку тарного або листового содово-вапняного скла. Високий вміст діоксиду кремнію є його ключовою характеристикою, яка визначає специфіку поведінки скла в цементних системах, де воно не завжди функціонує як повністю інертний наповнювач [2]. Це означає необхідність усвідомленого підходу до вибору ролі компонента та керування параметрами, від яких залежить кінцевий результат.

У бетоні склобій застосовують у двох основних формах. Перша – як заповнювач, коли він замінює частину піску або щебеню залежно від фракції та впливає на зернову структуру, ущільнення і контактну зону. Друга – як



тонкомелений матеріал, що вводиться у вигляді мінеральної добавки та може впливати на мікроструктуру цементного каменю і перебіг процесів твердіння [5]. Ці підходи мають різні механізми дії та потребують різних технологічних рішень, що виключає можливість їх некоректного поєднання в межах однієї рецептури без додаткового обґрунтування.

Для практичного застосування склобою вирішальне значення має підготовка сировини. У загальній логіці управління відходами повторне використання є доцільним лише за умови стабільності характеристик вторинного матеріалу, зокрема фракційного складу, мінімального вмісту домішок та повторюваності властивостей від партії до партії [1]. Для скла це особливо важливо, оскільки домішки кераміки або металу погіршують однорідність суміші, а органічні включення можуть спричинити дефекти структури. Саме підготовка сировини часто визначає відтворюваність технології в реальних умовах.

9.2 Вплив скляного бою на властивості бетонної суміші

Перший практичний аспект полягає у впливі склобою на поведінку бетонної суміші до твердіння. Основними показниками є рухливість, водопотреба та ущільнюваність. Частинки скла часто мають гострі краї, що підвищує внутрішнє тертя та може призводити до зростання жорсткості суміші, особливо за введення значної частки склобою без корекції гранулометрії.

За результатами досліджень, при частковій заміні дрібного заповнювача скляним боєм у межах 10–20 % зміни рухливості не є критичними та можуть компенсуватися підбором водоцементного відношення або застосуванням хімічних добавок [2]. При цьому ключовим є збереження робочої консистенції без надмірного збільшення кількості води, оскільки її надлишок після твердіння трансформується у додаткову пористість цементного каменю.

Другим важливим чинником є гранулометричний склад. Дрібні фракції характеризуються більшою питомою поверхнею та сильніше впливають на



водопотребу. Водночас тонкодисперсний скляний компонент може виконувати функцію мікронаповнювача, заповнюючи проміжки між зернами та сприяючи ущільненню структури після твердіння [3]. Таким чином формується баланс між вимогами до реологічних властивостей суміші та потенційним позитивним впливом на щільність затверділого матеріалу.

Третій аспект стосується стабільності бетонної суміші у часі до укладання. Для виробничих умов принципово важливо, щоб суміш не розшаровувалася та не проявляла виділення води. Практичні підходи до введення склобою передбачають фіксацію складу та повторюваність технологічних прийомів корекції консистенції, що забезпечує однорідність суміші протягом усього циклу укладання [2].

9.3 Міцність і фізико-механічні характеристики бетону зі склобоєм

Міцність на стиск є базовим показником, що визначає клас бетону та можливі напрями його застосування. Саме цей параметр використовується як основний критерій при порівнянні бетонів різного складу та при оцінці доцільності заміни традиційних компонентів альтернативними матеріалами. Дослідження показують, що за раціонального використання склобою як компонента бетонної суміші міцність у віці 28 діб може залишатися на прийнятному рівні або навіть зростати порівняно з контрольними складами [2]. Такий ефект пояснюють змінами зернової структури та підвищенням щільності цементного каменю.

Разом з тим вплив скляного бою на міцність бетону не є однозначним і залежить від комплексу чинників. Визначальну роль відіграє фракційний склад склобою, його частка у суміші та спосіб введення. За використання крупних і середніх фракцій скло функціонує переважно як заповнювач, і його вплив на міцність визначається якістю контакту між зернами скла та цементним каменем. У таких випадках за умови достатнього ущільнення бетонної суміші можливо сформувати щільну структуру без суттєвих втрат міцності.



Для дрібних фракцій характерна інша картина. Збільшення питомої поверхні частинок призводить до зростання водопотреби та підвищує чутливість результату до змін водоцементного відношення. За відсутності корекції складу це може негативно впливати на міцність бетону, особливо у ранньому віці. Водночас за оптимального підбору рецептури дрібнодисперсний скляний компонент може сприяти ущільненню структури цементного каменю за рахунок заповнення порового простору, що частково компенсує негативний вплив підвищеної водопотреби [3].

Важливим аспектом оцінки фізико-механічних характеристик є характер руйнування бетонних зразків. Для бетонів зі склобоек за раціонального підбору фракцій спостерігається рівномірний розподіл тріщин, що свідчить про задовільну роботу контактної зони «заповнювач–цементний камінь». У разі використання невідповідного гранулометричного складу або недостатнього ущільнення суміші руйнування має більш крихкий характер і супроводжується локалізацією тріщин у зонах концентрації напружень [3].

Окрім міцності на стиск, фізико-механічні характеристики бетону включають показники, що опосередковано впливають на експлуатаційну надійність матеріалу. До них належать щільність, пористість та однорідність структури. Введення склобою може змінювати ці параметри залежно від співвідношення компонентів і технологічних умов приготування суміші. За належного контролю складу скляний бій не призводить до істотного зростання пористості, тоді як за порушення технологічних вимог можливе формування неоднорідної структури з підвищеним вмістом капілярних пор.

Узагальнюючи, можна зазначити, що міцність і фізико-механічні характеристики бетонів зі склобоек визначаються не самим фактом використання вторинного матеріалу, а рівнем інженерного опрацювання складу. Узагальнення результатів досліджень у галузі застосування промислових відходів у будівельних матеріалах підтверджують, що вторинні компоненти забезпечують прийнятні характеристики лише за умови стабільної якості сировини та контролю технологічних параметрів на всіх етапах виробництва [4].



Саме такий підхід дозволяє розглядати скляний бій як повноцінний компонент бетонних композицій, а не як випадкову добавку з непередбачуваним результатом.

9.4 Приклад експериментальних результатів і практична інтерпретація

Нижче наведено приклад експериментальної серії, у якій крупний заповнювач повністю замінено скляним боєм різної фракції. Міцність визначали на кубках $10 \times 10 \times 10$ см у віці 7, 14, 21 та 28 діб [3]. Цінність наведених даних полягає у можливості простежити залежність міцності від фракційного складу та характеру її набору у часі.

Оскільки хімічний склад скла впливає на поведінку в цементному середовищі, наведено типовий склад тарного скла, використаного у дослідженні [3], що пояснює необхідність урахування питань довговічності при практичному застосуванні.

Таблиця 1 – Орієнтовний хімічний склад тарного скла, %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O+K ₂ O	SO ₃
71,5...73,7	0,2...3,3	1,7...3,2	5,2...9,1	15,2...16,0	до 0,2

Джерело: [3]

У тій самій серії порівнювали фракції 2,5; 5; 10 та 20 мм. Результати міцності наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Міцність зразків зі склобоєм залежно від віку твердіння, МПа

Розмір фракції склобою	7 діб	14 діб	21 доба	28 діб
2,5 мм	3,23	4,58	5,97	6,06
5 мм	4,90	9,48	12,62	13,14
10 мм	4,78	11,07	13,73	15,01
20 мм	7,13	12,99	15,79	15,84

Джерело: [3]



Отримані результати свідчать, що фракції 10–20 мм забезпечують значно вищі показники міцності порівняно з дрібною фракцією. Це підтверджує необхідність регламентування зернового складу склобою при практичному застосуванні та пояснює чутливість результату до зміни фракції навіть за незмінної загальної схеми складу.

9.5 Хімічні процеси та довговічність бетонів зі скляними компонентами

Міцність у віці 28 діб є важливим показником, однак вона не дає повної інформації про експлуатаційну придатність бетонів зі скляними компонентами. Для конструкцій, що працюють упродовж десятиліть, вирішальними є довговічність, стабільність мікроструктури та стійкість матеріалу до впливу зовнішніх факторів. У цьому контексті особливу увагу приділяють хімічним процесам, які можуть відбуватися в цементному камені за участю скляного бою.

Основним потенційним ризиком при використанні скляних компонентів у бетоні є розвиток лужно-кремнеземної реакції. Скло містить аморфний кремнезем, який у лужному середовищі порового розчину цементного каменю може взаємодіяти з гідроксидами лужних металів. У разі інтенсивного перебігу такої реакції утворюються продукти, здатні поглинати воду і збільшуватися в об'ємі, що призводить до виникнення внутрішніх напружень і мікротріщин у структурі бетону.

Разом з тим сучасні дослідження свідчать, що небезпека розвитку небажаних реакцій суттєво залежить від дисперсності скляного компонента та його функціональної ролі у складі бетону. Для крупних фракцій склобою реакційна здатність значно нижча, оскільки площа контакту з цементним каменем є обмеженою. У таких випадках скло переважно виконує механічну функцію заповнювача, а ризик хімічної деградації матеріалу знижується.

Інша ситуація спостерігається при використанні тонкомеленого скляного порошку. За достатньо малого розміру частинок скло може проявляти пуцоланові властивості, вступаючи у вторинні реакції з гідроксидом кальцію. У



результаті зменшується вміст вільного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ у цементному камені, а структура гідратних новоутворень стає більш щільною та стабільною. Такий механізм може не лише знижувати ризик розвитку лужно-кремнеземної реакції, але й позитивно впливати на довговічність бетону [5].

Оцінюючи довговічність бетонів зі скляними компонентами, необхідно враховувати також умови експлуатації. Вплив вологи, температурні коливання та циклічні навантаження можуть по-різному проявлятися у матеріалах з неоднорідною структурою. За відсутності належного контролю гранулометричного складу та якості підготовки склобою можливе формування локальних зон підвищеної пористості, які стають осередками прискореної деградації матеріалу.

Таким чином, довговічність бетонів зі скляним боєм визначається не самим фактом використання вторинного матеріалу, а комплексом чинників, серед яких ключовими є дисперсність скла, його кількість, хімічна роль у системі та умови твердіння і експлуатації. За коректного інженерного підходу скляні компоненти можуть бути інтегровані у бетон без зниження експлуатаційної надійності матеріалу.

9.6 Практичні вимоги до впровадження і контроль параметрів

Для забезпечення стабільних властивостей бетонів зі скляними компонентами необхідно визначити чіткий перелік параметрів, що підлягають обов'язковому контролю при практичному впровадженні технології. Це стосується як етапу підготовки вторинної сировини, так і процесів приготування бетонної суміші та твердіння матеріалу [1].

Першочерговим є контроль якості скляного бою. Фракційний склад повинен відповідати заданим межам і бути стабільним у часі. Значні коливання розмірів зерен призводять до зміни реологічних властивостей суміші та ускладнюють відтворюваність результатів. Окрім цього, необхідно мінімізувати вміст домішок, зокрема керамічних та органічних включень, які можуть негативно



впливати на однорідність структури бетону.

Другим важливим аспектом є керування реологією бетонної суміші. Введення склобою, особливо з гострокутною формою зерен, може підвищувати внутрішнє тертя та знижувати рухливість. Для компенсації цього ефекту застосовують корекцію водоцементного відношення або хімічні добавки, при цьому важливо уникати надмірного збільшення кількості води [2]. Практичний досвід показує, що саме стабільність реологічних характеристик є критичною для промислового застосування бетонів зі вторинними компонентами.

Третім елементом контролю є оцінка міцності та характеру її набору у часі. Експериментальні дані підтверджують, що фракційний склад склобою визначає не лише кінцеву міцність, але й швидкість твердіння [3]. Це слід враховувати при проектуванні технологічних режимів, особливо для збірних конструкцій або виробів із прискореним циклом виготовлення.

Окрему увагу доцільно приділяти контролю довговічності. За наявності скляних компонентів доцільним є поєднання стандартних випробувань міцності з додатковою оцінкою структури та потенційних хімічних процесів. Такий підхід відповідає загальній логіці використання промислових відходів у будівельних матеріалах, де експлуатаційні показники мають не менше значення, ніж початкові характеристики [4].

У підсумку практичне впровадження бетонів зі скляним боєм можливе лише за умови технологічної дисципліни, стабільності якості вторинної сировини та системного контролю параметрів на всіх етапах виробництва.

Висновки

У роботі розглянуто можливості використання скляного бою як вторинного компонента у складі бетонів з урахуванням його впливу на властивості бетонної суміші, міцність і довговічність затверділого матеріалу. Аналіз показує, що застосування скляних відходів у бетоні є реальним і технічно обґрунтованим напрямом повторного використання вторинної сировини за умови дотримання



інженерних вимог до підготовки та контролю матеріалів.

Встановлено, що форма та фракційний склад склобою істотно впливають на реологічні характеристики бетонної суміші. Зміни рухливості та ущільнюваності можуть бути керованими за рахунок підбору гранулометрії та корекції водоцементного відношення або застосування хімічних добавок [2]. Таким чином, введення скляного бою не є перешкодою для отримання технологічно придатних сумішей.

Експериментальні дані підтверджують визначальний вплив фракційного складу склобою на міцність бетону та характер її набору у часі [3]. Використання середніх і крупних фракцій дозволяє отримати показники міцності, співставні з традиційними бетонами, тоді як дрібні фракції потребують більш обережного підходу та додаткового обґрунтування.

Оцінка хімічних процесів показує, що довговічність бетонів зі скляними компонентами залежить від дисперсності скла та його функціональної ролі у цементній системі. Тонкомелені силікатні добавки можуть проявляти позитивний вплив на структуру цементного каменю, знижуючи ризик небажаних реакцій і підвищуючи стабільність матеріалу [5]. Узагальнені підходи до застосування промислових відходів підтверджують необхідність комплексної оцінки експлуатаційних показників поряд із міцністю [4].