

О. В. Бондар
О. В. Христинч

ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДІВ СУХИХ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ З ВІДХОДАМИ ПРОМИСЛОВОСТІ І БУДІВЕЛЬНИМИ ВІДХОДАМИ

Вінницький національний технічний університет

У статті представлено результати комплексного дослідження з проектування складів сухих будівельних сумішей (СБС) з використанням відходів промисловості та будівельного комплексу. Особливу увагу приділено таким видам вторинної сировини, як зола-винесення, доменний та сталеплавильний шлаки, цементний пил, мікрокальцит, цегляний бій, бетонний бій і відходи каменерізання. Обґрунтовано технічну та екологічну доцільність їхнього залучення до складу СБС для зниження витрат на сировину, підвищення ефективності використання ресурсів та зменшення екологічного навантаження на довкілля.

Запропоновано підхід до системного аналізу та класифікації відходів за джерелом утворення, хімічним і гранулометричним складом, функціональним призначенням у сумішах (в'язучі, наповнювачі, мінеральні добавки, модифікатори). Наведено методику оптимізації рецептур СБС із використанням методів регресійного моделювання. Побудовано рівняння регресії для трьох основних характеристик суміші: водотвердого співвідношення (В/Т), середньої густини та міцності на стиск. Параметри моделей визначено шляхом варіювання змісту цементу, золи-винесення, кварцового піску, фракцій заповнювача та поліпропіленової фібри.

На основі отриманих даних здійснено побудову графіків залежностей, які дозволили візуалізувати вплив кожного з компонентів на характеристики суміші. Встановлено оптимальні діапазони використання золи-винесення (20-30%), цегляного бою (5-10%), фракційного заповнювача та мікрофібри. Сформовано приклад оптимізованого складу СБС, який забезпечує зниження густини, покращення технологічних властивостей та досягнення необхідної міцності без застосування додаткових хімічних добавок.

Отримані результати можуть бути впроваджені у виробництво екологічно орієнтованих будівельних сумішей для оздоблювальних, кладочних та ремонтних робіт. Запропоновані підходи спрямовані на забезпечення ресурсоощадного та сталого розвитку у будівельній галузі.

Ключові слова: сухі будівельні суміші, вторинна сировина, зола-винесення, цегляний бій, математичне моделювання, регресійний аналіз, оптимізація складу.

Вступ

В умовах стрімкого розвитку будівельної галузі й одночасного зростання обсягів техногенних і будівельних відходів, все більш актуальним стає завдання їх ефективної утилізації шляхом повторного використання у виробництві нових будівельних матеріалів. Водночас збереження природних ресурсів, зниження вуглецевого сліду та забезпечення екологічної безпеки стають обов'язковими критеріями при розробці будівельної продукції. Одним із перспективних напрямів сталого розвитку є виробництво сухих будівельних сумішей (СБС) з використанням вторинної сировини, зокрема – золи-винесення, шлаків, мікрокальциту, цементного пилу, цегляного та бетонного бою, відходів каменерізання тощо [1].

СБС – це високотехнологічні матеріали з визначеними властивостями, які потребують точного дозування і ретельного проектування складу [2, 3]. Традиційні підходи до формування рецептур часто не враховують специфіку вторинної сировини, її активність, гранулометричний склад, водопоглинання та хімічну інертність. Тому виникає потреба у системному аналізі впливу кожного з компонентів на основні властивості суміші – водотверде співвідношення (В/Т), щільність та міцність – із застосуванням інструментів математичного моделювання та оптимізації.

Метою дослідження є науково обґрунтоване проектування складів сухих будівельних сумішей з використанням промислових і будівельних відходів на основі поєднання експериментального аналізу та математичних моделей.

Завдання дослідження:

- класифікувати доступні види вторинної сировини за їх технологічною функцією та параметрами впливу;
- оцінити фізико-механічні властивості сумішей із введенням золи-винесення, цегляного бою, відходів каменерізання, фібри та інших компонентів;
- побудувати регресійні та графічні залежності характеристик СБС від ключових змінних (цемент, заповнювачі, добавки).

Теоретичні передумови досліджень

Удосконалення технологій сухих будівельних сумішей (СБС) тісно пов'язане з розширенням сировинної бази за рахунок вторинних ресурсів. Зокрема, значний потенціал мають відходи

промисловості та будівельні відходи, які можуть виступати в ролі активних або інертних мінеральних наповнювачів, мікронаповнювачів, часткових заміників цементу або в'язучих речовин.

У таблиці 1 наведені типи відходів, які характеризуються як за фізико-хімічними властивостями, так і за функціональним призначенням у сумішах: активні компоненти (зола-винесення, шлаки), інертні заповнювачі (відсів, пил), стабілізатори структури (мікрокальцит) [1, 4-8].

Таблиця 1

Основні види промислових відходів для СБС

<i>Відходи</i>	<i>Джерело</i>	<i>Властивості</i>	<i>Функція в СБС</i>
Зола-винесення ТЕС	Теплоенергетика	Пуцоланова активність, дрібна фракція	Мікронаповнювач, зниження В/Т, зменшення усадки
Доменний гранульований шлак	Металургія	Гідралічна активність	Часткова заміна цементу
Сталеплавильний шлак	Металургія	Інертність, масивність	Крупний заповнювач
Відсів дроблення каменю	Щебеневі заводи	Інертність, фракція до 2 мм	Заповнювач, заміна природного піску
Мікрокальцит (вапнякове борошно)	Кар'єри, цементні заводи	Висока дисперсність, хімічна активність	Мікронаповнювач, зменшення водопотреби
Пил цементний	Цементне виробництво	Активна поверхня, схожість із клінкером	Підвищення гідратаційної активності
Гіпсові відходи (фосфогіпс, осади)	Хімпром, водоочистка	Гідратація з утворенням гіпсогомігидрату	Гіпсові шпаклівки і штукатурки
Керамзитовий пил	Виробництво керамзиту	Легкість, пористість	Наповнювач для теплоізоляційних сумішей
Залізовмісні шлами	Очищення стічних вод	Висока щільність, активна поверхня	Модифікуючі добавки

Згідно таблиці 2 дроблений бетон, цегляний бій, гіпсові залишки можуть використовуватись як повноцінні мінеральні компоненти або допоміжні добавки в штукатурках, технічних та легких сумішах.

Таблиця 2

Будівельні відходи, придатні для повторного використання

<i>Відходи</i>	<i>Джерело</i>	<i>Використання в СБС</i>
Дроблений бетон	Демонтаж конструкцій	Крупний і середній заповнювач
Цегляний бій	Реконструкція будівель	Пуцолановий мікронаповнювач
Гіпсокартонний бій	Відходи ремонтів	Вторинне гіпсове в'язуче
Штукатурні залишки	Внутрішні роботи	Шпаклівки, грубі суміші
Бій плитки та кахлю	Облицювальні роботи	Мінеральні наповнювачі після подрібнення

Залучення промислових та будівельних відходів дозволяє не лише вирішити проблему утилізації, але й розширити функціональні можливості сухих будівельних сумішей.

Найбільш перспективними компонентами для цементних і вапнякових СБС є: зола-винесення, доменні шлаки, пил цементний, мікрокальцит, а також бій цегли й бетону [1, 9-10].

На основі експериментальних даних і практичних випробувань виконано порівняльну оцінку ефективності використання відходів промисловості у технології СБС [1, 9-12]. На рис. 1 представлено аналіз використання відходів у технології виготовлення СБС за трьома критеріями: вплив на міцність, зменшення густини та економічну доцільність. Найбільш ефективними компонентами за сукупністю показників є зола-винесення, мікрокальцит та доменний шлак.

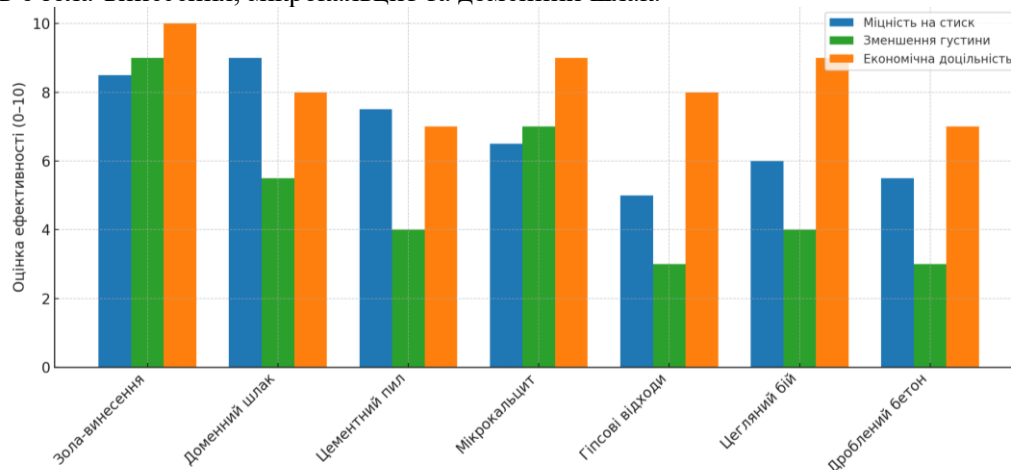


Рисунок 1 – Порівняльна оцінка ефективності вторинних добавок у СБС

Згідно даних рис. 1 найвищі показники за всіма критеріями продемонструвала зола-винесення, що підтверджує її універсальність як активної мінеральної добавки. Доменний шлак також показав значну ефективність з точки зору підвищення міцності та економічної доцільності, але поступився у зменшенні густини. Цементний пил і мікрокальцит виявились менш ефективними щодо зниження густини, однак показали стабільні результати з міцності на стиск. При цьому гіпсові відходи мають помірну міцність, дуже низьку здатність до зниження густини, зате виділяються як найбільш економічно вигідні. Цегляний бій доцільно використовувати як наповнювач у недорогих сумішах – він демонструє середню ефективність за міцністю та низьку з точки зору щільності, але має високу економічну привабливість. Дроблений бетон показує дещо нижчу міцність, знижену щільність та гарну загальну доцільність з економічної точки зору.

Таким чином, графік ілюструє, що при проектуванні складів СБС варто поєднувати різні типи відходів, орієнтуючись на бажану функціональність суміші: максимізацію міцності, легкість або вартісну ефективність.

Проектування складу сухих будівельних сумішей із застосуванням відходів

Розробка складу СБС з вторинною сировиною вимагає врахування типу в'язучих, гранулометричного складу заповнювачів, В/Т, хімічної сумісності компонентів і впливу на кінцеві властивості [1, 9, 13]. Методика підбору складу базується на виборі в'язучого, формуванні оптимальної гранулометричної суміги заповнювачів та наповнювачів (по фракціях), визначення оптимального В/Т залежно від призначення суміші [3-4, 12]. На кінцевому етапі проектування додаються модифікуючі компоненти для функціонального коригування властивостей суміші із зменшення витрат в'язучих. Оскільки суміші проектується для можливості їх зовнішнього використання, то у якості основного в'язучого використовувався портландцемент. Приклад оптимізованого складу СБС наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Контрольний оптимальний склад СБС з вторинною сировиною

Компонент	Вміст, % або кг/м ³
Портландцемент М500	35 %
Кварцовий пісок (0,63 мм)	25 %
Зола-винесення (0,14-0,315 мм)	30 %
Цегляний бій (≤0,5 мм)	5 %
Фібра поліпропіленова	0,3 кг/м ³
Пластифікатор Sika Mix Plus	0,2 % від маси цементу

Математичне моделювання та підбір складів СБС

Для точного підбору складу доцільно використовувати математичне планування експерименту із варіацією кількості цементу, фракцій заповнювача, вмісту золотого наповнювача тощо. Результати дозволяють побудувати регресійні моделі міцності та щільності.

Для оптимального проектування складів сухих будівельних сумішей із вторинною сировиною застосовано методи регресійного аналізу, які дозволяють кількісно оцінити вплив окремих факторів на основні властивості СБС. Побудовано рівняння регресій для В/Т, густини та міцності:

В/Т:

$$W/C = 0,325 - 0,014X_1 + 0,012X_2 - 0,007X_3 - 0,004X_4 + 0,003X_5. \quad (1)$$

Густина:

$$\rho = 1120 + 35X_1 - 28X_2 + 21X_3 - 17X_4 - 12X_5. \quad (2)$$

Міцність:

$$R_c = 5,8 + 1,2X_1 + 0,9X_2 - 0,5X_3 - 0,3X_4 + 0,7X_5. \quad (3)$$

У таблиці 4 узагальнено вплив окремих факторів на кожну з характеристик відповідно до коефіцієнтів у рівняннях регресій. Найбільший позитивний вплив на міцність має цемент (X_1), також значущим є внесок золи (X_2) та фібри (X_5). Густина найбільше зростає за рахунок цементу і піску, а В/Т – зменшується при більшій кількості цементу та при дрібніших фракціях заповнювачів.

Вплив факторів на властивості СБС

Фактор	В/Т	Густина	Міцність
X ₁ – цемент	-0,014	+35	+1,2
X ₂ – зола-винесення	+0,012	-28	+0,9
X ₃ – кварцовий пісок	-0,007	+21	-0,5
X ₄ – фракція заповнювача	-0,004	-17	-0,3
X ₅ – фібра	+0,003	-12	+0,7

Вплив заповнювача на характеристики СБС

За результатами математичного моделювання та експериментальних досліджень визначено вплив заповнювача на характеристики проєктованих СБС. Гранулометричний склад та кількісний вміст заповнювача мають суттєвий вплив на фізико-механічні характеристики сухих будівельних сумішей. Для ілюстрації цих залежностей побудовано тривимірні графіки (рис. 2-4), які демонструють зміну водотвердого співвідношення, густини та міцності на стиск в залежності від фракції (мм) та вмісту (% маси) мінерального заповнювача у складі СБС.

Встановлено, що зі зростанням вмісту дрібного заповнювача водотверде співвідношення (В/Т) зростає. Це зумовлено зростанням питомої поверхні зерен, яка потребує більшої кількості води для змочування. При використанні заповнювачів фракції понад 1,5 мм значення В/Т знижується, що свідчить про зменшення загальної водопотреби за рахунок покращеного ущільнення (рис. 2).

Густина СБС пропорційно зростає зі збільшенням вмісту заповнювача. Проте надто дрібні або надто великі зерна можуть призводити до зниження ефективного ущільнення, створення порожнин і, відповідно, до втрат у щільності. Максимальна густина спостерігається за вмісту заповнювача 55-65% та фракції 1-1,5 мм (рис. 3).

Як видно з рис. 4, міцність має оптимум при середньому розмірі фракції 0,6-1 мм і вмісті 45–55%, що пов'язано з ефективним формуванням зернового скелета та забезпеченням рівномірного розподілу цементного каменю. Надлишок заповнювача або використання заповнювачів великої фракції призводить до зменшення площі контакту в'язучого із зернами і, як наслідок, до втрати міцності.

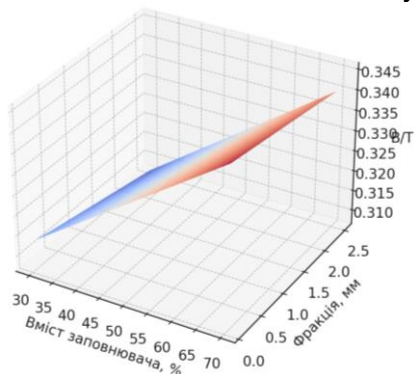


Рисунок 2 – Залежність водотвердого співвідношення від вмісту та фракції заповнювача

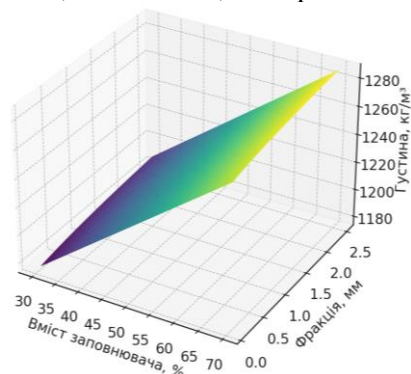


Рисунок 3 – Залежність густини від вмісту і фракції заповнювача

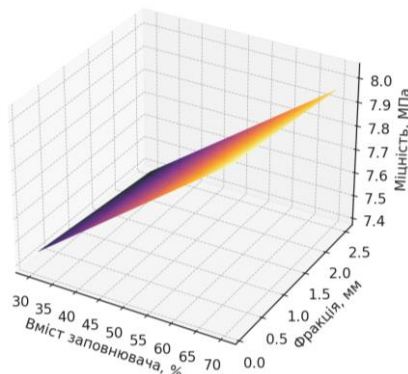


Рисунок 4 – Залежність міцності на стиск від вмісту і фракції заповнювача

Вплив золи-винесення та цегляного бою на властивості СБС

Серед найбільш поширених видів вторинної сировини, що застосовуються у складі сухих будівельних сумішей, особливу увагу заслуговують зола-винесення – як активна мінеральна добавка,

та цегляний бій – як інертний наповнювач. Обидва компоненти є продуктами промислової або будівельної діяльності, що утворюються у значних обсягах і мають перспективу повторного використання. Зола-винесення, завдяки своїм пуцолановим властивостям, здатна активізувати гідратаційні процеси у цементному камені, а цегляний бій ефективно виконує роль зернового скелета, впливаючи на густину та структуру суміші [4-8]. З огляду на це, дослідження комбінованого впливу цих відходів на водотверде співвідношення, густину та міцність на стиск дозволяє встановити оптимальні співвідношення та обґрунтувати раціональні рецептури для виробництва СБС (рис. 5-7).

Із графіка на рис. 5 видно, що збільшення вмісту золи-винесення поступово підвищує водотверде співвідношення (В/Т) – це зумовлено значною питомою поверхнею золистих частинок, які вимагають більше води для змочування. Натомість введення цегляного бою (у межах до 10-15%) також сприяє зростанню В/Т, але цей ефект менш виражений, що пов'язано з його більш грубою структурою та меншою активністю. Максимальне значення В/Т досягається при одночасно високих частках обох компонентів.

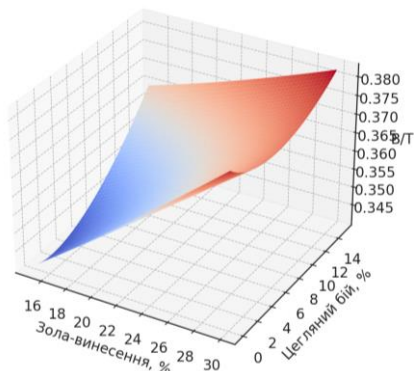


Рисунок 5 – Залежність В/Т від золи та цегляного бою

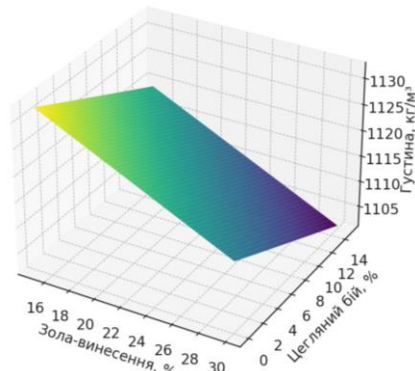


Рисунок 6 – Залежність густини від золи та цегляного бою

Графік на рис. 6 демонструє, що густина суміші знижується зі збільшенням вмісту золи – це очікувано, адже зола має низьку щільність. У той же час, цегляний бій помірно підвищує густину, однак при надлишку може спричинити зворотний ефект через нераціональне ущільнення. Найнижча густина спостерігається при високій концентрації золи й низькому вмісті цегляного бою.

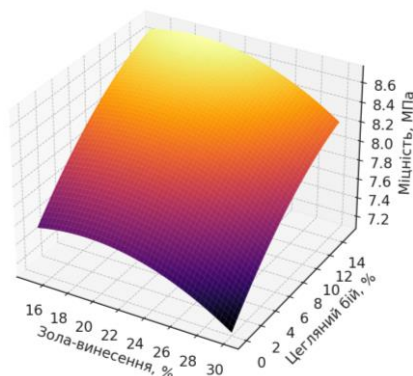


Рисунок 7 – Залежність міцності від золи та цегляного бою

Згідно з графіком на рис. 7, оптимальна міцність на стиск досягається при 20-25% золи та 5-10% цегляного бою. Надлишок будь-якого з компонентів призводить до зниження міцності – зола через надлишкову пористість, а бій через порушення зернового скелета. Поверхня має вигляд вигнутого плато з максимумом у центрі діапазону.

Вплив відходів каменерізання на властивості СБС

Відходи каменерізання – це порошкоподібні або дрібнодисперсні залишки природного каменю (граніту, мармуру, вапняку тощо), що утворюються під час розпилювання, шліфування або фрезерування кам'яних блоків. Цей тип відходів відзначається стабільним мінералогічним складом, низькою вологістю, хімічною інертністю та достатньо високою дисперсністю, що робить його потенційно придатним для часткової заміни традиційного мінерального наповнювача в складі сухих будівельних сумішей [4-8].

Застосування відходів каменерізання дає змогу знизити собівартість сумішей, зменшити витрати природних ресурсів і водночас частково покращити реологічні характеристики розчинів [9-10].

Досліджено комбінований вплив відходів каменерізання та золи-винесення на водотверде співвідношення, густину та міцність на стиск з метою виявлення оптимального співвідношення компонентів для екологічно та технологічно ефективного рецепту СБС (рис. 8-10).

к видно із рис. 8 В/Т зростає із збільшенням вмісту обох компонентів, причому більш різко – при високих концентраціях золи. Каменерізни відходи виявляють помірний вплив, головним чином через їх інертний характер і значну абсорбційну здатність.

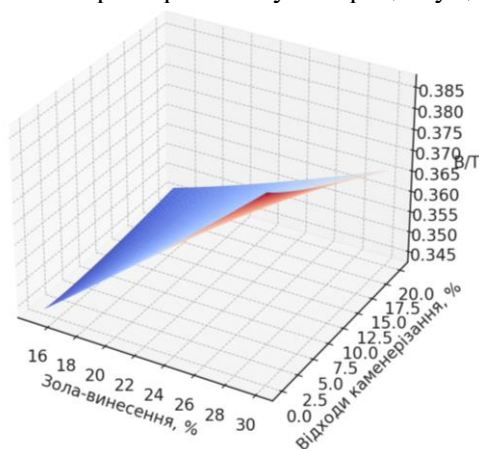


Рисунок 8 – Залежність В/Т від золи-винесення та відходів каменерізання

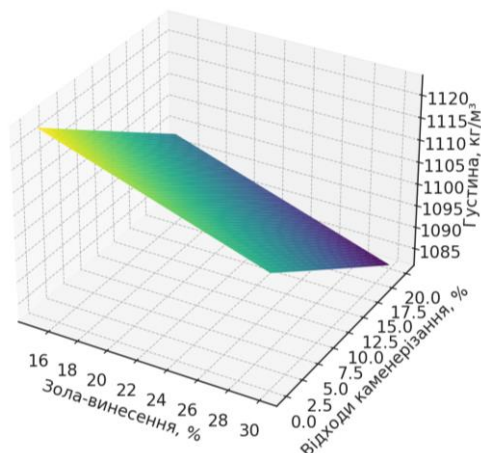


Рисунок 9 – Залежність густини від золи та відходів каменерізання

Графік на рис. 9 показує, що найнижча густина спостерігається при великій кількості золи. Відходи каменерізання злегка зменшують густину суміші, особливо при фракції <1 мм, що пов'язано з їх мікропористою структурою та малим розміром зерен.

Як видно із рис. 10 найвища міцність досягається при 20–25 % золи та 5–10 % відходів каменерізання. Подальше зростання вмісту обох компонентів призводить до зниження міцності через надлишкову пористість і зниження адгезії.

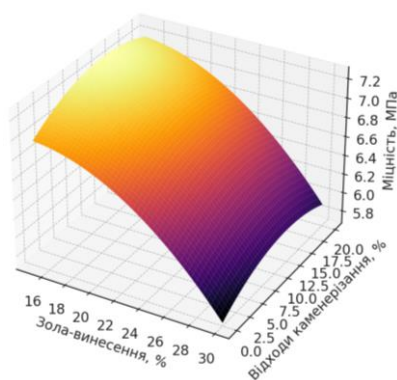


Рисунок 10 – Залежність міцності від золи та відходів каменерізання

Вплив фібри на міцність СБС

Додавання мікрофібри до складу СБС сприяє підвищенню міцності на стиск завдяки армуванню мікроструктури та зменшенню мікротріщин [12-13]. При цьому ефект зростає до певного значення (близько 2-3 мм), після чого надлишок фібри знижує ефективність зчеплення компонентів (рис. 11).

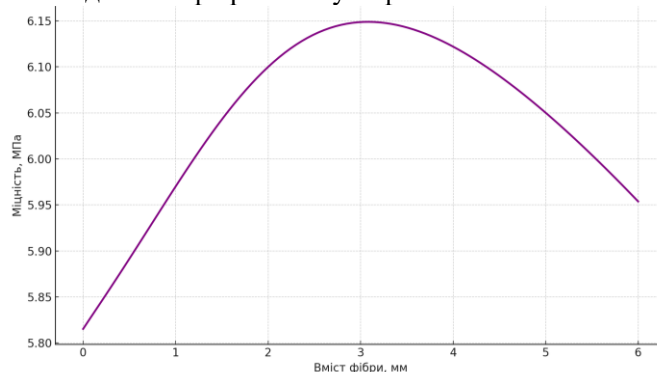


Рисунок 11 – Залежність міцності на стиск від вмісту фібри

Графік, наведений на рис. 11, має характер насичення, що відображає наявність оптимальної концентрації: на початковому етапі введення фібра значно покращує міцність суміші завдяки армуванню мікроструктури. Однак після досягнення критичної довжини (близько 2–3 мм) ефективність стабілізується, а потім – знижується через надлишок волокон, які ускладнюють укладання суміші та зменшують контакт в'язучого з іншими зернами.

Висновки

У ході дослідження розроблено концепцію проектування складів СБС з урахуванням впливу різних видів вторинної сировини. Експериментально підтверджено, що зола-виношення, цегляний бій та відходи каменерізання можуть ефективно використовуватись як функціональні компоненти сумішей без зниження експлуатаційних характеристик, а у деяких випадках – з їх покращенням. Проведено комплексне оцінювання впливу зазначених компонентів на водотверде співвідношення, густину та міцність на стиск.

Побудовані регресійні рівняння дозволили кількісно описати зміну основних характеристик сумішей залежно від вмісту цементу, золи, заповнювачів різної фракції та мікроармувальних добавок. Тривимірні графіки зміни показників допомогли виявити оптимальні діапазони компонентного складу, що забезпечують досягнення бажаного балансу між технічними властивостями і ресурсною економічністю.

Сформовано рекомендований склад СБС із використанням золи-виношення (20-30 %), цегляного бою (5-10 %), кварцового піску (25-35 %) та цементу (30-35 %) із додаванням поліпропіленової фібри. Такий склад забезпечує зниження густини суміші, підвищення тріщиностійкості та оптимізацію собівартості.

Отримані результати можуть бути впроваджені у практику виробництва оздоблювальних, кладочних та клеєвих сумішей, а запропонований підхід – використаний для проектування інших видів будівельних матеріалів із залученням відходів виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Л. Й. Дворкін, В. В. Житковський і В. В. Марчук, «Ефективні сухі будівельні суміші та розчини на їх основі: монографія», Київ: Каравела, 2024, 348 с.
2. К. К. Пушкарьова (ред.), «Сучасні українські будівельні матеріали, вироби та конструкції: науково-практичний довідник», Київ: Асоціація «ВСВБМВ», 2012, 664 с.
3. ДСТУ Б В.2.7-126:2011. Суміші будівельні сухі модифіковані. Загальні технічні умови. Чинний від 2011-06-01. Вид. офіц. К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2011. 42 с.
4. Л. Й. Дворкін, К. К. Пушкарьова, О. Л. Дворкін і М. О. Кочевих, «Використання техногенних продуктів у будівництві: навчальний посібник», Рівне: НУВГП, 2009, 330 с.
5. М. В. Суханевич, «Поводження з відходами та їх використання для одержання будівельних матеріалів: навчальний посібник», Київ: КНУБА, 2011, 152 с.
6. Ю. Г. Гасан, М. А. Мохорт і М. В. Суханевич, «Будівельні матеріали з відходів паливно-енергетичної, гірничо-видобувної та збагачувальної промисловості: конспект лекцій», Київ: КНУБА, 2009, 60 с.
7. Ю. Г. Гасан і М. А. Мохорт, «Переробка відходів чорної і кольорової металургії та паливної промисловості у будівельні матеріали: конспект лекцій», Київ: КНУБА, 2008, 44 с.
8. Л. Й. Дворкін і А. В. Мироненко, «Будівельні матеріали та вироби із застосуванням промислових відходів: навчальний посібник», Рівне: НУВГП, 2019, 298 с.
9. А. В. Бондар, О. В. Христин, О. В. Бондар, і І. В. Сафроненко, «Перспективи використання вторинних відходів будівельної галузі у виробництві сухих будівельних сумішей», Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві, № 36, 1, с. 64-70, 2024. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-64-70>.
10. А. В. Бондар, Н. Ю. Іродова і О. В. Бондар, «Ефективність використання місцевих матеріалів та відходів промисловості для виготовлення сухих будівельних сумішей», LIV Всеукраїнська науково-технічна конференція факультету будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінниця, 24–27 березня 2025 р. [Електронний ресурс]. Доступно за посиланням: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-ftbtegp/all-ftbtegp-2025/paper/view/24493/20245>
11. А. В. Бондар, В. П. Ковальський, В. П. Бурлаков, та Є. Р. Матвійчук, «Утилізація відходів промисловості шляхом виготовлення на їх основі сухих будівельних сумішей», Екологічні науки: науково-практичний журнал, № 3 (22), с. 21-24, 2018.
12. А. В. Бондар, «Ефективні сухі будівельні суміші для елементів підлог цивільних будівель», дис. канд. наук.; Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2019.
13. Р. Ф. Рунова, та Ю. Л. Носовський, Технологія модифікованих будівельних розчинів. Київ, Україна: КНУБА, 2007.

REFERENCES

1. L. Y. Dvorkin, V. V. Zhitkovskyi, and V. V. Marchuk, "Efficient Dry Building Mixtures and Mortars Based on Them: Monograph," Kyiv: Karavela, 2024, 348 p.
2. K. K. Pushkaryova (Ed.), "Modern Ukrainian Building Materials, Products, and Structures: Scientific and Practical Reference Book," Kyiv: Association "VSVBMV," 2012, 664 p.

3. DSTU B V.2.7-126:2011. Modified Dry Building Mixtures. General Technical Specifications. Effective from 2011-06-01. Official ed. Kyiv: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine, 2011, 42 p.
4. L. Y. Dvorkin, K. K. Pushkaryova, O. L. Dvorkin, and M. O. Kochevykh, "Use of Technogenic Products in Construction: Textbook," Rivne: NUVHP, 2009, 330 p.
5. M. V. Sukhanevych, "Waste Management and Its Use for Producing Construction Materials: Textbook," Kyiv: KNUBA, 2011, 152 p.
6. Y. G. Hasan, M. A. Mokhort, and M. V. Sukhanevych, "Building Materials from Waste of the Fuel-Energy, Mining, and Processing Industries: Lecture Notes," Kyiv: KNUBA, 2009, 60 p.
7. Y. G. Hasan and M. A. Mokhort, "Recycling Waste from Ferrous and Non-Ferrous Metallurgy and the Fuel Industry into Construction Materials: Lecture Notes," Kyiv: KNUBA, 2008, 44 p.
8. L. Y. Dvorkin and A. V. Mironenko, "Building Materials and Products Using Industrial Waste: Textbook," Rivne: NUVHP, 2019, 298 p.
9. A. V. Bondar, O. V. Khrystych, O. V. Bondar, & I. V. Safronenko. Prospects for the use of secondary construction waste in the production of dry building mixtures. *Modern Technologies, Materials and Structures in Construction*, №36(1), p. 64–70, 2024. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-64-70>
10. A. V. Bondar, N. Y. Irodova, and O. V. Bondar, "Efficiency of Using Local Materials and Industrial Waste for the Production of Dry Building Mixtures," LIV All-Ukrainian Scientific and Technical Conference of the Faculty of Civil, Construction and Environmental Engineering, Vinnytsia, Ukraine, March 24–27, 2025. [Online]. Available: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2025/paper/view/24493/20245>
11. A. V. Bondar, V. P. Kovalskyi, V. P. Burlakov, and Ye. R. Matviychuk, "Utilization of Industrial Waste by Manufacturing Dry Building Mixtures," *Ecological Sciences: Scientific and Practical Journal*, no. 3 (22), pp. 21–24, 2018.
12. A. V. Bondar, "Effective Dry Building Mixtures for Flooring Elements of Civil Buildings," Ph.D. dissertation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2019.
13. R. F. Runova and Y. L. Nosovsky, "Technology of Modified Building Mortars," Kyiv, Ukraine: KNUBA, 2007.

Бондар Олександр Васильович – аспірант кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: alexbondar.phdoc@gmail.com.

Христич Олександр Володимирович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця. e-mail: dockhristich@i.ua. ORCID: 0000-0003-0166-547X.

O. Bondar
O. Khrystych

DESIGN OF DRY BUILDING MIX COMPOSITIONS USING INDUSTRIAL AND CONSTRUCTION WASTE

Vinnytsia National Technical University

The article presents the results of a comprehensive study on the design of dry building mixture (DBM) compositions using industrial and construction waste. Special attention is given to such types of secondary raw materials as fly ash, blast furnace and steelmaking slags, cement dust, microcalcite, brick debris, concrete rubble, and stone-cutting waste. The technical and environmental feasibility of incorporating these materials into DBMs is substantiated, with the aim of reducing raw material costs, improving resource efficiency, and lowering the environmental burden on ecosystems.

A systematic approach to the analysis and classification of waste is proposed, based on their origin, chemical and granulometric composition, and functional role within the mixture (binders, fillers, mineral additives, modifiers). The methodology for optimizing DBM formulations using regression modeling techniques is outlined. Regression equations have been developed for three main parameters of the mixtures: water-to-binder ratio (W/B), bulk density, and compressive strength. Model parameters were derived through the variation of cement, fly ash, quartz sand, filler particle size, and polypropylene fiber content.

Based on the obtained data, 3D surface graphs were constructed to visualize the influence of each component on the performance of the mixtures. Optimal ranges for the use of fly ash (20–30%), brick debris (5–10%), granular fillers, and microfibers were identified. An example of an optimized DBM composition was developed, which ensures reduced density, improved workability, and sufficient compressive strength without the need for additional chemical admixtures.

The research outcomes may be implemented in the production of environmentally oriented dry building mixtures for finishing, masonry, and repair applications. The proposed approaches are aimed at promoting resource-efficient and sustainable development in the construction industry.

Key words: dry building mixtures, secondary raw materials, fly ash, brick waste, mathematical modeling, regression analysis, mix design optimization.

Bondar Oleksandr V. – Postgraduate student of the Department of Construction, Urban Planning and Architecture Vinnytsia National Technical University, e-mail: alexbondar.phdoc@gmail.com.

Khrystych Oleksandr V. – associate professor, associate professor of the Department of Construction, Urban Planning and Architecture Vinnytsia National Technical University, Vinnytsya. e-mail: dockhristich@i.ua. ORCID: 0000-0003-0166-547X.