

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І  
АРХІТЕКТУРИ

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**РАЗСАМАКІН Андрій Вікторович**

УДК 691.32

ДИСЕРТАЦІЯ

**ДЕКОРАТИВНІ РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВІ БЕТОНИ НА ОСНОВІ  
ЛУЖНО-АКТИВОВАНИХ ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТІВ**

Спеціальність: 192 – Будівництво та цивільна інженерія

Галузь знань: 19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії вперше

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Разсамакін Андрій Вікторович

\_\_\_\_\_ підпис

Науковий керівник Гоц Володимир Іванович, доктор технічних наук, професор

Київ-2026

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,  
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

РПБ	– реакційно-порошкові бетони
RPC	– Reactive Powder Concrete
В/Ц	– водо-цементне відношення;
В/Т	– водо-тверде відношення;
Р/В	– розчинно-в'язуче відношення;
Р/Ш	– розчинно-шлакове відношення;
ГДШ	– гранульований доменний шлак;
ЛСТМ	– лігносульфонат натрієвий технічний модифікований;
ЛАЦ	– лужно-активований цемент;
ПАР	– поверхнево-активна речовина;
КІС	– критична інфраструктура;
ТНФ	– тринатрійфосфат;
СДБ	– сульфатно-дріжджова бражка
ПЦ	– портландцемент
Мс	– силікатний модуль розчинних силікатів натрію
ТВО	– тепловолога обробка
П:Ц	– пісок : цемент
ЛАШПЦ	– лужно-активовані шлакопортландцементи
РФА	– рентгено-фазовий аналіз
КМЦ	– карбоксилметилцелюлоза натрію

## АНОТАЦІЯ

Разсамакін А. В. "Декоративні реакційно-порошкові бетони на основі лужно-активованих шлакопортландцементів" – кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 "Будівництво та цивільна інженерія" (19 –Архітектура та будівництво). – Київський національний університет будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України, Київ, 2026.

У дисертаційній роботі показана можливість розробки, дослідження і ефективного використання лужно-активованих шлакопортландцементів та отримання на їх основі реакційно-порошкових бетонів з високими і надвисокими фізико-механічними, експлуатаційними, спеціальними та декоративними властивостями.

Аналіз сучасних тенденцій у світовому матеріалознавстві, військово-політична ситуації у світі, і в Україні зокрема, вказують на пріоритетність розробки і використання будівельних матеріалів з високими та надвисокими фізико-механічними і експлуатаційними характеристиками, які здатні витримувати значні динамічні навантаження. Це, у першу чергу, цементи і бетони на їх основі. Існує попит і зацікавленість в отриманні подібних матеріалів. Але щоб забезпечити ефективність використання таких цементів у бетонах слід значно підвищити їх активність та формування комплексу спеціальних властивостей – високих пружно-пластичних характеристик, високої тріщиностійкості, ударної міцності, регульованих власних деформацій, морозостійкості, водонепроникності, здатності тверднути при від'ємних температурах та під водою, вогнестійкості, корозійної стійкості, низького тепловиділення і, не в останню чергу, декоративності та зручності використання, що може бути реалізована також і у форматі сухих будівельних сумішей.

Слід також відмітити, що декоративні цементні матеріали на основі білого портландцементу в Україні не виробляються, а імпортуються з інших країн.

Тому використання високоефективних декоративних лужно-активованих цементів може стати життєво важливою альтернативою у виробництві білих та кольорових цементів. Вони здатні надавати ряд особливих властивостей – стабільність кольору, довговічність, високу адгезію тощо.

Основні сучасні світові тенденції спрямовані на підвищення вимог до багатофункціональності і довговічності будівельних матеріалів, підвищення ефективності використання цементів, зменшення енерговитрат і собівартості для підвищення їх експлуатаційних властивостей, підвищення їх екологічності та зменшення карбонатного сліду.

Відповідність дисертаційної роботи зазначеним тенденціям сприяє, з одного боку, становленню економіки замкнутого циклу, направленої на забезпечення ефективності виробництва та збереження навколишнього середовища, а з іншого боку, підвищенню декоративних, фізико-механічних та експлуатаційних показників при зведенні нових та ремонті старих споруд загально-будівельного та спеціального, у т.ч. стратегічного призначення.

Доцільність виконання завдань, на вирішення яких спрямовано дисертаційну роботу, обґрунтована результатами попередніх досліджень вітчизняних та закордонних авторів при виконанні практичних розробок як в Україні, так і за кордоном. Відомі результати потребують систематизації та розвитку проблематики у напрямку управління як складом гідратних новоутворень цементного каменю, так і структури бетонів, здатних забезпечити необхідний рівень декоративних властивостей, механічну міцність, ударну стійкість та їх довговічність.

Таким чином, попит на неорганічні цементні матеріали та бетони на їх основі з вищевказаними властивостями високий. З врахуванням усього вищесказаного це однозначно обумовлює актуальність проблеми і необхідність її вирішення.

У дослідженнях, як алюмосилікатні компоненти в'яжучих композицій, були використані тонкодисперсний Дніпродзержинський доменний гранульований шлак і портландцемент типу ПЦІ класу 42,5N з питомою поверхнею 4100...4200 см<sup>2</sup>/г (за Блейном) із співвідношенням у шлакоцементній суміші 95:5, 75:25 і 55:45 (шлак : портландцемент).

Як лужний компонент використовувався метасилікат натрію пентагідрат ( $Na_2O \cdot SiO_2 \cdot 5H_2O$ ) за CAS 497-19-8 у вигляді негігроскопічного порошку та у вигляді розчину з  $\rho = 1,24$  г/см<sup>3</sup>. У випадку використання лужного компонента у вигляді порошку суміш "шлак + портландцемент + порошок + добавка" замішувалася водою. У випадку використання розчину суміш "шлак + портландцемент + добавка" замішувалася водним розчином лужного компонента з  $\rho = 1,24$  г/мл.

В якості лужного компонента використовувалося також розчинне високомодульне натрієве скло за CAS 1344-09-8 з  $M_c = 2 \dots 3$  і  $\rho = 1,35$  г/см<sup>3</sup>.

В якості регуляторів строків тужавлення і структуроутворення композицій з метасилікатом натрію використовувалася добавка ЛСТМ (лігносульфонат технічний модифікований натрієвий –  $C_{20}H_{24}Na_2O_{10}S_2$ ) за CAS 8061-51-6 у вигляді концентрованого розчину з  $\rho = 1,25$ ,  $K = 45\%$  і  $pH = 9$ .

Для регулювання строків тужавлення композицій на основі високомодульних натрієвих розчинних стекол з  $M_c \geq 2$  використовувалися добавки тринатрійфосфату –  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$  (далі за текстом ТНФ) і гліцерину –  $C_3H_8O_3$  або  $C_3H_5(OH)_3$  за CAS 10101-89-0 з  $\rho = 1,228$  г/см<sup>3</sup>. Сіль  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$  була використана як модифікатор для підвищення стійкості високомодульних натрієвих силікатів до коагуляції при взаємодії зі шлаком (цементом) і, таким чином, для сповільнення тужавлення досліджуваних цементних композицій.

Як структуроутворюючі добавки для регулювання усадки та білизни лужно-активованого шлакопортландцементу та реакційно-порошкового бетону використовувався тонкодисперсний карбонат кальцію ( $CaCO_3$ ) за CAS 471-34-1 з білизою 90% у порошкоподібній формі, тонкодисперсний діоксид титану  $TiO_2$  (рутил) за CAS 13463-67-7, каолін класу КН 84 за CAS 1332-58-7,

застосований у паперовій промисловості з білизною 84%. Також використовувалися пігменти мінерального походження.

Для мікроармування була використана поліпропиленова і кополімер-пропіленова фібра у кількості 3...4 кг/м<sup>3</sup>.

Як дрібний заповнювач у цементно-піщаних розчинах використовували стандартний пісок (ДСТУ Б В.2.7-189:2009) та річковий кварцовий пісок з  $M_k = 1,16$ .

Випробовування РПБ на ударну міцність (ударну в'язкість) виконувалося за методикою, викладеною у підручнику Будівельне матеріалознавство / за ред. Кривенка П.В. – Київ: Ліра-К, 2012. С.55.

Структурування композицій та фізико-механічні й експлуатаційні властивості в'язучих і бетонів контролювалось з використанням комплексу фізико-механічних (міцність, ударна міцність, усадка) та фізико-хімічних методик досліджень (РФА, зондовий аналіз мікроструктури цементного каменя на растровому електронному мікроскопі-мікроаналізаторі, калориметрія, гальвано-е.р.с., електроопір паст, контракція). Визначення білизні зразків виконувалося за допомогою спектрофотометра NS810 з діапазоном довжин хвиль 400...700 нм. Для порівняння використовувався зразок Ra1 9016 зі ступенем білизні  $L = 98,85$ .

Для оптимізації складів дрібнозернистих бетонів, зручності обробки отриманих даних було використано математичне планування експерименту типу ПФЕ-2<sup>3</sup> та ПФЕ-3<sup>3</sup>, яке традиційно добре зарекомендувало себе у наукових дослідженнях.

У ході досліджень встановлені основні значимі фактори, здатні суттєво впливати на структурування лужно-активованих цементів у напрямку забезпечення високих фізико-механічних, експлуатаційних та спеціальних властивостей. Це алюмосилікатний склад цементу, параметри розчинних силікатів натрію (силікатний модуль, агрегатний стан, дозування) і природа модифікуючих добавок. Лужно-активовані цементы, в яких у якості лужного компоненту використовуються силікати натрію, вирізняються швидким

набором міцності, високою активністю, ударною міцністю, морозостійкістю. Це вказує на перспективність їх використання як основи для отримання реакційно-порошкових бетонів для захисту критичної інфраструктури.

Були виконані дослідження по регулюванню строків тужавлення цементів, активованих розчинними силікатами натрію з  $M_c = 1$  ( $Na_2O \cdot SiO_2 \cdot 5H_2O$  – метасилікат натрію пентагідрат) і  $M_c = 2 \dots 3$ . Метасилікат натрію пентагідрат використовувався у двох агрегатних станах – у вигляді порошку і у вигляді водного розчину.

Для управління реологічними властивостями і строками початку тужавлення лужно-активованих цементів на основі метасилікату натрію була використана добавка ЛСТМ натрієвий.

Показано, що введення метасилікату натрію до цементу у вигляді водного розчину призводить до суттєво більшої інтенсифікації структуроутворюючих процесів і скорочення строків тужавлення у порівнянні з варіантом використання метасилікату натрію у вигляді порошку із замішуванням водою. Встановлено, що зростання вмісту портландцементу у шлако-цементній суміші також веде до відчутного скорочення строків тужавлення – у більшості випадків недопустимого з точки зору технологічних вимог.

Дослідження впливу добавки ЛСТМ показало можливість ефективного управління строками тужавлення за умови її використання не у рекомендованій нормативними документами кількості для традиційних клінкерних цементів (0,1...0,3%), а у підвищеній кількості – до 4%. У результаті отримано технологічно прийнятні строки початку тужавлення у межах 0–38...2–24 год.-хв. при використанні в якості лужного компоненту метасилікату натрію і добавки ЛСТМ у кількості 2...4%.

Залежно від агрегатного стану лужного компоненту отримано лужно-активовані шлакопортландцементи з активністю через 28 діб 56...65 МПа при порошковому введенні метасилікату натрію із замішуванням водою і 104,1...115,1 МПа при введенні метасилікату натрію у вигляді розчину.

Результати дослідження структуроутворення лужно-активованих шлакопортландцементних композицій (РФА, калориметрії, гальвано-е.р.с., опору паст, контракції) підтвердили вищенаведені висновки і знаходились у хорошій кореляції з отриманими технологічними і фізико-механічними характеристиками.

Отримання високоактивних лужно-активованих шлакопортландцементів дозволило перейти до розробки на їх основі і дослідження *декоративних* шлакопортландцементів.

Були виконані дослідження впливу відбілюючих добавок ( $TiO_2$  і  $CaCO_3$ ) та портландцементу у суміші "шлак + портландцемент" (із вмістом шлаку у цій суміші 45, 70 і 95%) на ступінь білизні в'язучих композицій та їх фізико-механічні властивості з використанням повного факторного експерименту типу ПФЕ-3<sup>2</sup> з функціями відгуку у вигляді білизні, строків початку тужавлення і міцності на стиск. Лужний компонент – метасилікат натрію пентагідрат у кількості 10%, у вигляді порошку із замішуванням водою.

За вимогами ДСТУ Б В.2.7-268-2011, для отримання білого кольору портландцементний клінкер білого цементу повинен мати білизну  $\geq 68\%$ . А для жовто-червоної гами і коричневого кольору кольорових цементів цей показник повинен бути  $\geq 40\%$ .

Згідно отриманим результатам, оптимальною можна вважати кількість добавки  $TiO_2$  4...5%. У цьому випадку білизна лужно-активованого шлакопортландцементу на рівні 68% досягається при вмісті шлаку у лужно-активованому шлакопортландцементі не менше 75% (і до 25% портландцементу). Всі інші склади із вмістом шлаку до 55% і вмістом портландцементу до 45% мають білизну 48...65% й відповідають вимогам кольорових цементів жовто-червоної гами і коричневого кольору. Строки початку тужавлення – 34...73 хв.

Аналогічні якісні залежності спостерігаються і при використанні відбілюючої добавки  $CaCO_3$  у кількості 24%.

Виконано оптимізацію складів лужно-активованих декоративних цементів за критерієм білизні залежно від кількості оксиду заліза у шлаку у межах 0,4...2,6% із забезпеченням при цьому білизні цементного каменю не нижче 70%. Врахований діапазон присутності оксидів заліза у шлаку 0,4...2,6% дозволяє використовувати усі відомі доменні шлаки України для отримання білих лужно-активованих цементів.

Дрібнозернисті бетони на основі білих лужно-активованих шлакових цементів складу 1:3, з метасилікатом натрію у вигляді порошку, із замішуванням водою і пігментованих забарвлюючою мінеральною добавкою, мають у віці 28 діб міцність на стиск 49,1...56,8 МПа, а через 180 діб – 66,8...67,5 МПа. Усі склади мають хорошу динаміку твердіння і, виходячи з міцності у віці 2 діб – 35...37 МПа, їх можна віднести до швидкотверднучих.

Встановлено, що значення усадки знаходяться у межах 0,54...0,77 мм/м. Найбільша усадка у складах з добавкою каоліну, найнижча – з добавкою кальциту.

Морозостійкість декоративних складів не нижча F200. Усі склади також стійкі до дії поперемінного замочування і висушування.

Склади з різними відбілювачами і пігментами різних кольорів успішно пройшли тест на стійкість кольору до ультрафіолетового опромінення і тепловологої обробки.

Усі зразки лужно-активованих дрібнозернистих бетонів, як контрольні, так і декоративні, пройшли випробування на висолоутворення з позитивним результатом. Для гарантованого виключення появи висолів (вицвітів) до складу декоративних розчинів вводилась водоутримуюча добавка КМЦ у кількості 0,25%.

Згідно з результатами випробувань цементно-піщаних розчинів складу 1:3, приготованих у лабораторних умовах, водоутримуюча здатність усіх складів, у тому числі і контрольних, є достатньо високою і знаходиться у межах 94,3...96,5%. Введення добавки КМЦ покращило ці показники до рівня 96,2...98,6%. Окрім підвищення водоутримуючої здатності, введення добавки

КМЦ сприяє покращенню реологічних властивостей суміші, підвищенню пластичності і зручності роботи з сумішшю та зменшує ризик появи висолів.

Оптимізація складів лужно-активованих шлакопортландцементів за фізико-механічними та декоративними ознаками дозволила перейти до розробки на їх основі реакційно-порошкових бетонів (РПБ).

На першому етапі досліджень була встановлена залежність міцності цементно-піщаних бетонів у різні строки твердіння від співвідношення "в'яжуче : пісок" у межах 1:3...1:1. Пісок річковий, кварцовий, з  $M_k = 1,16$ . Співвідношення "шлак:портландцемент" у шлакоцементній суміші 95:5. Лужний компонент – метасилікат натрію пентагідрат у вигляді порошку. Замішування суміші – водою.

Як і слід було очікувати, збільшення вмісту в'яжучої речовини у композиції веде до зростання міцності. Міцність на стиск складу 1:1 у віці 28 діб становила 87,5 МПа, складу 1:2 – 67,7 МПа, складу 1:3 – 49,8 МПа. А у віці 360 діб – 123,9; 94,6; 64,8 МПа відповідно. Найбільш високу міцність продемонстрував склад № 1 із співвідношення "в'яжуче : пісок" – 1 : 1, який і був прийнятий до подальших досліджень в якості реакційно-порошкового бетону.

Оптимізація фракційного складу річкового піску дозволила поліпшити показники міцності у всі терміни твердіння на 5...6%, очевидно, за рахунок більш щільної упаковки зерен заповнювача і зменшення водопотреби, пов'язаної зі зменшення питомої поверхні заповнювача.

Усі склади, як з оптимізованим фракційним складом піску, так і з не оптимізованим, продемонстрували особливо швидкий набір міцності на стиск – 35,7...40,0 МПа через 1 добу. Через 28 діб – 87,5...91,8, через 360 діб – 123,9...128,3 МПа.

Співвідношення міцності на стиск до міцності на згин складало загалом 5,3...5,9 у віці 28 діб і 5,8...6,5 через 360 діб, що свідчить про підвищену тріщиностійкість матеріалу.

Використання метасилікату натрію у вигляді розчину з  $\rho = 1,24$  г/мл суттєво інтенсифікувало структуроутворюючі процеси у порівнянні з порошковим варіантом використання метасилікату натрію і дозволило отримати супершвидкий набір міцності на стиск – 52,3...56,0 МПа через 1 добу, 73,8...76,3 МПа через 2 доби та 85,0...87,1 МПа через 3 доби. Активність у віці 28 діб становила 102,4...108,7 МПа, міцність через 360 діб – 124,8...141,4 МПа залежно від вмісту портландцементу у шлакопортландцементній суміші. Збільшення вмісту портландцементу прискорює набір міцності у ранні строки (до 3 діб), але дещо зменшує у більш віддалені терміни.

Дещо нижча активність в'язучої композиції при використанні порошку метасилікату натрію у порівнянні із замішуванням водним розчином метасилікату натрію, очевидно, пов'язана з витратами часу та енергії на розчинення порошку порівняно з водним розчином метасилікату, який з самого початку має більш високу лужність середовища і відразу ж вступає у взаємодію з компонентами в'язучої композиції. Це особливо помітно на ранніх стадіях твердіння. Однак, з часом ця різниця суттєво скорочується.

Розкрито вплив силікатного модуля розчинних силікатів натрію на міцність РПБ. Показано, що використанням розчинних силікатів натрію з  $M = 2...3$  з присутністю у лужно-активованому шлакопортландцементі шлаку у межах 55...95% забезпечило отримання надшвидкотверднучих високоміцних реакційно-порошкових бетонів з міцністю на стиск через 3 години – 19,0...28,0 МПа, 1 добу – 40,0...45,7 МПа, через 7 діб – 69,2...95,3 МПа, через 28 діб – 77,7...129,8 МПа, через 90 діб – 82,7...138 МПа, через 180 діб – 84,8...141,5 МПа, через 360 діб – 88,2...144,6 МПа залежно від значення силікатного модуля розчинного скла і складу шлакопортландцементу. Оптимальним є використання розчинного натрієвого скла з  $M_c = 2,5...2,6$ .

Строки початку тужавлення склали 34...46 хв., але можливе їх подовження до 60...90 хв. за рахунок використання комплексної добавки "ТНФ + гліцерин".

Ударна (балістична) міцність зразків РПБ на основі лужно-активованих шлакопортландцементів склала через 28 діб 3354...4315 кДж/м<sup>3</sup>, на основі традиційного портландцементу – 3001 кДж/м<sup>3</sup>, а через 180 діб – 4413...4805 кДж/м<sup>3</sup> і 4001 кДж/м<sup>3</sup> відповідно.

Характер руйнування і більш високі показники ударної міцності РПБ на основі лужно-активованих шлакопортландцементів можуть бути пояснені особливостями фазового складу новоутворень з переважанням в них низькоосновних гідросилікатів кальцію та гідроалюмосилікатів змішаного Na-Ca складу, співвідношенням гелевидної та кристалічної складової гідравлічних новоутворень з переважанням гелевидної складової, що підтверджується й іншими авторам.

Крім того, бетони цього класу мають більш високі адаптаційні властивості і здатність до самозаліковування дефектів у вигляді тріщин, якщо вони з'являються у результаті екстремальних умов експлуатації.

Незалежно від складу, з часом ударна міцність усіх РПБ зростає.

Висока тріщиностійкість такого бетону підтверджується співвідношеннями міцності на стиск до міцності на згин у межах 5,3...5,9 у віці 28 діб.

У результаті аналізу проблеми усадочних деформацій РПБ як на основі традиційних клінкерних цементів, так і лужно-активованих зокрема, виявлено фактори управління власними деформаціями цих бетонів на основі в'язучої системи "гранульований доменний шлак + портландцемент + розчинні силікати натрію" із вмістом шлаку у системі 5...55%. Показано, що найбільш дієвими факторами протидії деформації усадки лужно-активованих цементів та РПБ на їх основі – є використання наномодифікуючих мінеральних добавок і присутність портландцементу у суміші "шлак + портландцемент. Вплив інших факторів, які є менш дієвими, зменшується у ряду: присутність фібри > температурно-вологісні умови тверднення > силікатний модуль розчинних силікатів > агрегатний стан розчинних силікатів натрію > гранулометрія заповнювача.

Виявлено, що ущільнення мікроструктури та інтенсифікація кристалізаційних процесів у цементній матриці досягається наномодифікуючою добавкою тонкодисперсного карбонату кальциту ( $CaCO_3$ ), яка визначає зменшення усадки бетону у 1,6...1,7 рази до значень 0,55...0,7 мм/м на момент стабілізації через 90 діб тверднення. Крім того, зменшення розміру частинок кальциту з 8...10 мкм до 1...5 мкм зумовлює прискорення та поглиблення структуроутворюючих процесів реакційно-порошкових бетонів і додаткове зменшення деформацій на 5...6%. Позитивно на зниження деформацій усадки впливає і нано-добавка оксиду титану  $TiO_2$ , яка у кількості 5% дозволила знизити усадку на 12...15%. Крім того, добавки нано- $TiO_2$  і  $CaCO_3$  відчутно відбілюють в'язучу складову РПБ до рівня  $\geq 70\%$ , що дозволяє перевести РПБ до розряду декоративних.

Продемонстрована ефективність мікроармування РПБ поліпропіленовою та кополімер-пропіленовою фіброю у кількості 3...4 кг/м<sup>3</sup>, що дозволило знизити усадку на 30...35%. При цьому, фібра розміром 6...12 мм показала кращі результати, ніж фібра розміром 24 мм.

Перевірка впливу тепловологої обробки на деформативні властивості лужно-активованих цементів та РПБ показала її ефективність і позитивний вплив із зменшенням власних деформацій усадки на 15...20% у порівнянні зі зразками природного твердіння.

При використанні метасилікату натрію у вигляді *водного розчину* власні деформації усадки на момент стабілізації у віці 90 діб склали 0,98 мм/м. Використання метасилікату натрію у вигляді *порошку* дозволило зменшити усадочні деформації з 0,98 мм/м до 0,89 мм/м, тобто на 9,0%, у порівнянні з використанням метасилікату натрію у вигляді *розчину*.

Розкрито вплив силікатного модуля розчинних силікатів натрію на усадку та міцність РПБ. Встановлено, що зниження  $M_c$  з 3 до 1 призводить до зниження усадки з 1,13 до 0,98 мм/м.

Доведено, що оптимізація зернового складу заповнювача дозволяє додатково знизити усадку на 4...6% у порівнянні з контрольними зразками

бетону на не оптимізованому заповнювачі.

Показано, що комплексна дія вищеназваних факторів впливу (нано-добавки, мікроармування, тепловолога обробка, агрегатний стан лужного компоненту, силікатний модуль розчинних силікатів натрію, оптимізація гранулометрії заповнювача) дозволяє отримувати РПБ із власними деформаціями усадки у межах 0,5...0,6 мм/м, що співставно зі звичайними бетонами.

У результаті вказаних заходів отримано високоміцний лужно-активованій цементний реакційно-порошковий бетон класу міцності С80/95 з високою кінетикою ранньої міцності (52,3; 76,3; 85,0 МПа на 1, 2, 3 добу відповідно), високою тріщиностійкістю (з відношенням міцності на стиск до міцності на згин 5,3...5,9), зниженими деформаціями усадки (0,5...0,6 мм/м), високою атмосферостійкістю і морозостійкістю  $\geq F300$ , стабільними експлуатаційними характеристиками у часі. За швидкістю набору у ранні строки надшвидкотверднучий РПБ значно перевершує бетони на основі глиноземного цементу, супершвидкотверднучого портландцементу та цементу з низькою водопотребою маючи прийнятні деформації усадки. Враховуючи високі фізико-механічні, експлуатаційні та спеціальні характеристики отриманих РПБ, їх можна віднести до "високофункціональних".

Розкрито *технологічні аспекти отримання РПБ* на основі наномодифікованих лужно-активованих цементів.

Виявлено вплив *способу введення лужного компонента* (агрегатний стан – порошок / розчин) та складу шлаковміщуючого цементу на строки тужавлення – одного з основних технологічних факторів отримання РПБ. Використання метасилікату натрію ( $M_c = 1$ ) у вигляді розчину забезпечило максимальне зменшення розчинно-в'язучого відношення і більш інтенсивний розвиток міцності бетону у порівнянні з використанням метасилікату у вигляді порошку – на 30,5%; 23,5%; 18,4%; 6,1% і 3,9%, забезпечуючи міцність на стиск 52,3; 85,0; 108,7; 136,1 і 141,4 МПа у віці 1, 3, 28, 180 і 360 діб відповідно. Усі композиції демонстрували стабільний і монотонний приріст довготривалої

міцності. Співвідношення міцності на стиск до міцності на згин у діапазоні 5,3...5,9 підтвердило високу в'язкість та тріщиностійкість бетону. Збільшення вмісту портландцементу у шлако-цементній в'язучій системі з 5 до 45% призводить до інтенсифікації набору міцності у ранні строки (до 3 діб) і скорочення термінів тужавлення. При використанні метасилікату натрію ( $M_c = 1$ ), залежно від його агрегатного стану (порошок, розчин) та складу алюмосилікатної складової, строки початку тужавлення можуть складати 19...100 хв. А при введенні добавки ЛСТМ – 40...118 хв.

Показано, що РПБ на основі лужно-активованих шлакопортландцементів демонструють вищі балістичні характеристики у порівнянні з РПБ на основі традиційного портландцементу. Так, розроблені РПБ демонструють підвищення значень ключових властивостей у часі (порівняно з 28-добовим віком): міцність на стиск через 360 діб – до 141,4 МПа (підвищення на 30,1%) та 144,6 МПа (на 9,1%); ударна міцність через 180 діб – до 4413 кДж/м<sup>3</sup> (підвищення на 31,6%) та 4805 кДж/м<sup>3</sup> (на 11,3 %).

Виходячи з методу абсолютних об'ємів сировинних складових бетонної суміші, запропоновано *методику розрахунку складів* піщаних бетонів на основі лужно-активованих шлакопортландцементів, у тому числі реакційно-порошкових бетонів (РПБ) і бетонів для 3D-формування. Наприклад, витрата інгредієнтів на 1 м<sup>3</sup> при співвідношенні "в'язуча речовина : пісок" – 1:1, використанні лужного компонента у вигляді порошку і замішуванні водою:

- в'язуча речовина (шлак + ПЦ + лужний компонент) – 1034 кг/м<sup>3</sup>;
- пісок річковий дрібний ( $M_k = 1,16$ ) – 1034 кг/м<sup>3</sup>;
- вода – 220...230 л/м<sup>3</sup>;
- В/Т – 0,213...0,222.

Склад запроектовано з врахуванням технології укладання бетонної суміші РПБ. За умови *впливу вібродії* при укладанні, вміст втягнутого повітря не перевищує 4...8% за об'ємом.

Розглянуто також використання РПБ для формування виробів методом екструзії або використання їх у 3D-принтерах з визначенням основних технологічних параметрів процесу. Встановлено, що консистенція бетонних сумішей має відповідати маркам за легкоукладальністю від S1 (осадка конусу 1...4 см) до V3 (жорсткість 6...10 с) залежно від об'єму та конфігурації виробу, типу екструдера (гвинтовий, шнековий), тиску та швидкості видавлювання суміші. Величини тиску та швидкості екструзії варіюються залежно від типу обладнання. Рекомендуються швидкотверднучі суміші зі строками початку тужавлення 25...40 хв. Суміші РПБ для 3D-друку повинні характеризуватися такими основними показниками: розплив за Сутгардом – 12...15 см (або на mini-slumpcone – 10...14 см), водоутримання  $\geq 97\%$ , швидкість тужавлення  $\leq 20$  хв. Враховуючи високу інтенсивність набору міцності РПБ, в т.ч. у ранні терміни, доведено можливість відмови від теплової обробки. В окремих спеціальних випадках, коли термообробка технологічно необхідна, доцільно обмежити температуру на рівні не вище 50°C. Це вказує на енергоефективність розроблених РПБ.

На основі отриманих у ході досліджень даних розроблені технологічні рекомендації щодо виробництва і експлуатації реакційно-порошкових бетонів підвищеної ефективності на основі лужно-активованих цементів для захисту об'єктів критичної інфраструктури

Ключові слова: лужно-активовані декоративні шлакопортландцементи, реакційно-порошкові бетони, міцність, балістичні характеристики, усадка, методика розрахунку РПБ, технологічні рекомендації.

### Список публікацій здобувача

1. P Krivenko, I Rudenko, O Konstantynovskyi, A Razsamakin Sustainable performance of alkali-activated blast furnace cement concrete with high freeze-thaw resistance. *OP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing*, 2023. 1254, 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012003> (Scopus).
2. Gelevera O., Razsamakin A., Rudenko I., Konstantynovskyi O., Smeshko V. *Development mix design alkali-activated cement powder concrete. Advances in Transdisciplinary Engineering. IOS Press, Vol.62. 2024. pp. 644–650.* doi: <https://doi.org/10.3233/ATDE241044> (Scopus).
3. Руденко І., Гоц В., Гелевера О., Разсамакін А. Управління термінами тужавлення шлаковміщуючих цементів, активованих метасилікатом натрію. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, 2023. 13, 110–123. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.13.2023.110-123> (фахове видання).
4. Кривенко П. В., Руденко І. І., Гелевера О. Г., Разсамакін А. В. Вплив агрегатного стану лужного компоненту на властивості лужно-активованих цементів. *Збірник наукових праць "Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди"*, №44, 2023. С.39-50. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i44.05> (фахове видання).
5. Руденко І.І., Гелевера О.Г., Константиновський О.П., Смешко В.В., Разсамакін А.В. Реакційно-порошкові бетони на основі лужно-активованого цементу. *Збірник наукових праць "Будівельні конструкції. Теорія і практика"*. Вип.15. Київ: КНУБА, 2024. С.135-145. doi: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.15.2024.135-145> (фахове видання).
6. Разсамакін А.В., Гоц В.І., Руденко І.І., Гелевера О.Г. Роль  $\text{CaCO}_3$  у формуванні міцнісних і декоративних властивостей порошкового лужно-активованого шлакопортландцементного бетону. *Збірник наукових праць*

- "Сучасне будівництво та архітектура", №09. Одеса: ОДАБА, 2024. с.77-81. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2024-9-71-81> (фахове видання).
7. Руденко І.І., Гелевера О.Г., Разсамакін А.В. Вплив складу реакційно-порошкових лужно-активованих шлакопортландцементних бетонів на еволюцію їх властивостей. *Збірник наукових праць "Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди"*, № 47, 2025. С.211-224. DOI:[10.31713/budres.v0i47.24](https://doi.org/10.31713/budres.v0i47.24) (фахове видання).
  8. Andriy RAZSAMAKIN The influence of technological factors on the properties of reaction powder concretes based on alkali-activated slag Portland cement/ *Збірник наукових праць "Будівельні конструкції. Теорія і практика"*. Вип.17. Київ: КНУБА, 2025. С.12-28. DOI: 10.32347/2522-4182.17.2025.12-28. (фахове видання).
  9. Gots V. I., Gelevera O. G., Razsamakin A. V. Provision of decorative and high performance properties to alkaline-activated slag portland cements (English). *Збірник тез міжнародної науково-технічної конференції "Структурування та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій"*. Одеса: ОДАБА, 2024. С. 28-31. [https://drive.google.com/file/d/1jI7vWluCtPrF4HO4P4BpNs-\\_at6XPvwR/view](https://drive.google.com/file/d/1jI7vWluCtPrF4HO4P4BpNs-_at6XPvwR/view).
  10. Razsamakin A.V., Gots V.I., Rudenko I.I., Gelevera O.G. The role of  $\text{CaCO}_3$  in the formation of strength and decorative properties of powder alkaline-activated slag cement concrete: *Тези доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції*. Загальна редакція – М.Г. Сур'янінов. Одеса: ОДАБА, 2024. С. 187-192. [https://drive.google.com/file/d/1DJDK4CIgV1jfiEJlvIobfhk-5mHedf4\\_/view](https://drive.google.com/file/d/1DJDK4CIgV1jfiEJlvIobfhk-5mHedf4_/view).
  11. Руденко І., Гелевера О., Разсамакін А. Технологічні рекомендації щодо виробництва і експлуатації реакційно-порошкових бетонів підвищеної ефективності на основі лужно-активованих цементів для захисту об'єктів критичної інфраструктури. Київ: КНУБА, 2025. 23 с.

## ABSTRACT

Razsamakin A. V. "Decorative reactive powder concretes based on alkali-activated slag Portland cements" – qualifying scientific work in manuscript form.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 192 "Construction and Civil Engineering" (19 – Architecture and Construction). – Kyiv National University of Construction and Architecture of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation demonstrates the possibility of developing, researching, and effectively using alkali-activated slag Portland cements and obtaining reaction-powder concretes with high and ultra-high physical, mechanical, operational, special, and decorative properties based on them.

An analysis of current trends in global materials science and the military-political situation in the world, and in Ukraine in particular, indicates the priority of developing and using building materials with high and ultra-high physical, mechanical, and operational characteristics that are capable of withstanding significant dynamic loads. These are, first and foremost, cements and concretes based on them [1, 2]. There is demand and interest in obtaining such materials. However, in order to ensure the effective use of such cements in concrete, it is necessary to significantly increase their activity and form a complex of special properties: high elastic-plastic characteristics, high crack resistance, impact strength, adjustable self-deformation, frost resistance, water resistance, the ability to harden at sub-zero temperatures and under water, fire resistance, corrosion resistance, low heat release, and, last but not least, decorative appeal and ease of use, which can also be implemented in the form of dry building mixtures.

It should also be noted that decorative cements based on white Portland cement are not produced in Ukraine, but are imported from other countries.

Therefore, the use of highly efficient decorative alkali-activated cements can become a vital alternative in the production of white and colored cements. They are

capable of providing a number of special properties, such as color stability, durability, high adhesion, etc.

The main global trends are aimed at increasing the requirements for the multifunctionality and durability of building materials, improving the efficiency of cement use, reducing energy costs and production costs to improve their operational properties, increasing their environmental friendliness, and reducing their carbonate footprint.

The dissertation's compliance with these trends contributes, on the one hand, to the establishment of a closed-cycle economy aimed at ensuring production efficiency and environmental protection, and, on the other hand, to improving decorative, physical, mechanical, and operational characteristics in the construction of new and repair of old general and special-purpose structures, including those of strategic importance.

The feasibility of the tasks addressed in the dissertation is substantiated by the results of previous studies by domestic and foreign authors in the course of practical developments both in Ukraine and abroad. The known results require systematization and development of the issues in the direction of managing both the composition of hydrated cement stone formations and the structure of concretes capable of providing the necessary level of decorative properties, mechanical strength, impact resistance, and durability.

Thus, there is a high demand for inorganic cementitious materials and concretes based on them with the above properties. Taking into account all of the above, this clearly determines the relevance of the problem and the need to solve it.

In studies, finely dispersed Dniprodzerzhynsk blast furnace granulated slag and Portland cement type PC1 class 42.5N with a specific surface area of 4100...4200 cm<sup>2</sup>/g (according to Blaine) with a ratio in the slag-cement mixture of 95:5, 75:25, and 55:45 (slag : Portland cement).

Sodium metasilicate pentahydrate ( $Na_2O \cdot SiO_2 \cdot 5H_2O$ ) with CAS 497-19-8 was used as the alkaline component in the form of a non-hygroscopic powder and in the form of a solution with  $\rho = 1.24 \text{ g/cm}^3$ . When using the alkaline component in

powder form, the mixture of "slag + Portland cement + powder + additive" was mixed with water. When using the solution, the mixture of "slag + Portland cement + additive" was mixed with an aqueous solution of the alkaline component with  $p = 1.24 \text{ g/ml}$ .

Soluble high-modulus sodium glass with CAS 1344-09-8,  $M_s = 2...3$ , and  $p = 1.35 \text{ g/cm}^3$  was also used as an alkaline component.

As regulators of the setting time and structure formation of compositions with sodium metasilicate, an additive LSTM (lignosulfonate technical modified sodium -  $C_{20}H_{24}Na_2O_{10}S_2$ ) according to CAS 8061-51-6 was used in the form of a concentrated solution with  $p = 1.25$ ,  $K = 45\%$ , and  $pH = 9$ .

To regulate the setting times of compositions based on high-modulus sodium soluble glasses with  $M_s \geq 2$ , trisodium phosphate additives –  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$  (hereinafter referred to as TSP) and glycerol –  $C_3H_8O_3$  or  $C_3H_5(OH)_3$  with CAS 10101-89-0 and  $p = 1.228 \text{ g/cm}^3$  were used to regulate the setting times of compositions based on high-modulus sodium soluble glasses with  $M_s \geq 2$ . According to,  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$  salt was used as a modifier to increase the resistance of high-modulus sodium silicates to coagulation when interacting with slag (cement) and, thus, to slow down the setting of the studied cement compositions.

The following were used as structure-forming additives to regulate the shrinkage and whiteness of alkali-activated slag Portland cement and reaction powder concrete finely dispersed calcium carbonate ( $CaCO_3$ ) according to CAS 471-34-1 with a whiteness of 90% in powder form, finely dispersed titanium dioxide  $TiO_2$  (rutile) according to CAS 13463-67-7, kaolin class KH 84 according to CAS 1332-58-7, used in the paper industry with a whiteness of 84%. Pigments of mineral origin were also used.

Polypropylene and copolymer propylene fiber in the amount of  $3...4 \text{ kg/m}^3$  was used for micro-reinforcement.

Standard sand (DSTU B V.2.7-189:2009) and river quartz sand with  $M_k = 1.16$  were used as fine aggregate in cement-sand mortars.

The impact strength (impact toughness) testing of the RPC was performed according to the method described in the textbook *Budivel'ne materialoznavstvo / za red. Kryvenka P.V. – Kyi'v: Lira-K, 2012. S.55.*

The structure formation of compositions and the physical, mechanical, and operational properties of binders and concretes were controlled using a set of physical and mechanical (strength, impact strength, shrinkage) and physicochemical research methods (XRF, probe analysis of the microstructure of cement stone on a scanning electron microscope-microanalyzer, calorimetry, galvanic e.r.s., electrical resistance of pastes, contraction). The whiteness of the samples was determined using an NS810 spectrophotometer with a wavelength range of 400...700 nm. For comparison, a Ral 9016 sample with a whiteness degree of  $L = 98.85$  was used.

To optimize the composition of fine-grained concretes and facilitate the processing of the obtained data, mathematical planning of experiments of the FFE-2<sup>3</sup> and FFE-3<sup>3</sup> types was used, which has traditionally proven itself well in scientific research.

The research identified the main significant factors that can significantly influence the structure formation of alkali-activated cements in terms of ensuring high physical, mechanical, operational, and special properties. These are the aluminosilicate composition of cement, the parameters of soluble sodium silicates (silicate modulus, aggregate state, dosage), and the nature of modifying additives. Alkali-activated cements, in which sodium silicates are used as the alkaline component, are distinguished by their rapid strength gain, high activity, impact strength, and frost resistance. This indicates the promise of their use as a basis for obtaining reaction-powder concretes for the protection of critical infrastructure.

Studies were conducted on regulating the setting times of cements activated with soluble sodium silicates with  $M_s = 1$  ( $Na_2O \cdot SiO_2 \cdot 5H_2O$  – sodium metasilicate pentahydrate) and  $M_s = 2...3$ . Sodium metasilicate pentahydrate was used in two aggregate states: in powder form and in the form of an aqueous solution.

To control the rheological properties and setting times of alkali-activated cements based on sodium metasilicate, sodium LSTM additive was used.

It has been shown that the introduction of sodium metasilicate into cement in the form of an aqueous solution leads to a significantly greater intensification of structure-forming processes and a reduction in setting times compared to the option of using sodium metasilicate in powder form mixed with water. It has been established that an increase in the content of Portland cement in the slag-cement mixture also leads to a significant reduction in setting times, which in most cases is unacceptable from the point of view of technological requirements.

The study of the effect of LSTM additive showed the possibility of effective control of setting times when it is used not in the amount recommended by regulatory documents for traditional clinker cements (0.1...0.3%), but in an increased amount—up to 4%. As a result, technologically acceptable setting times within the range of 0–38...2–24 hours-minutes were obtained when using sodium metasilicate as an alkaline component and LSTM additive in an amount of 2...4%.

Depending on the aggregate state of the alkaline component, alkali-activated slag Portland cements were obtained with an activity of 56...65 MPa after 28 days when sodium metasilicate was added in powder form with mixing with water, and 104.1...115.1 MPa when sodium metasilicate was added in the form of a solution.

The results of the study of the structure formation of alkali-activated slag Portland cement compositions (XRD, calorimetry, galvanic-e.m.f., paste resistance, contraction) confirmed the above conclusions and were in good correlation with the obtained technological and physical-mechanical characteristics.

The production of highly active alkali-activated slag Portland cements made it possible to move on to the development and research of decorative slag Portland cements based on them.

Studies were carried out on the effect of whitening additives ( $TiO_2$  and  $CaCO_3$ ) and Portland cement in a "slag + Portland cement" mixture (with slag content in this mixture of 45, 70, and 95%) on the degree of whiteness of binding compositions and their physical and mechanical properties using a full factorial experiment of the FFE-3<sup>2</sup> type with response functions in the form of whiteness, setting time, and

compressive strength. The alkaline component is sodium metasilicate pentahydrate in an amount of 10%, in the form of a powder mixed with water.

According to the requirements of DSTU B V.2.7-268-2011, to obtain a white color, Portland cement clinker of white cement must have a whiteness of  $\geq 68\%$ . For yellow-red and brown colored cements, this indicator must be  $\geq 40\%$ .

According to the results obtained, the optimal amount of  $TiO_2$  additive is 4...5%. In this case, the whiteness of alkali-activated slag Portland cement at a level of 68% is achieved when the slag content in alkali-activated slag Portland cement is at least 75% (and up to 25% Portland cement). All other compositions with a slag content of up to 55% and a Portland cement content of up to 45% have a whiteness of 48–65% and meet the requirements for yellow-red and brown colored cements. Setting time is 34...73 minutes.

Similar quality characteristics are observed when using a 24% bleaching additive  $CaCO_3$ .

The composition of alkali-activated decorative cements has been optimized according to the whiteness criterion depending on the amount of iron oxide in the slag within the range of 0.4...2.6%, while ensuring the whiteness of the cement stone is not less than 70%. The range of iron oxide content in slag of 0.4 to 2.6% allows the use of all known blast furnace slag in Ukraine to obtain white alkali-activated cements.

Fine-grained concretes based on white alkali-activated slag cements in a ratio of 1:3, with sodium metasilicate in powder form, mixed with water and pigmented with a coloring mineral additive, have a compressive strength of 49.1...56.8 MPa at 28 days, and after 180 days – 66.8...67.5 MPa. All compositions have good hardening dynamics and, based on the strength at 2 days – 35...37 MPa, they can be classified as fast-hardening.

It has been established that the shrinkage values are within the range of 0.54...0.77 mm/m. The highest shrinkage is observed in compositions with kaolin additive, and the lowest – with calcite additive.

The frost resistance of decorative compositions is not lower than F200. All compositions are also resistant to alternating wetting and drying.

Compositions with different bleaches and pigments of different colors have successfully passed the test for color fastness to ultraviolet irradiation and heat and moisture treatment.

All samples of alkali-activated fine-grained concrete, both control and decorative, passed the efflorescence test with positive results. To guarantee the absence of efflorescence (discoloration), a water-retaining additive CMC was added to the decorative solutions in an amount of 0.25%.

According to the results of tests of cement-sand mortars with a composition of 1:3, prepared in laboratory conditions, the water-retention capacity of all compositions, including control ones, is sufficiently high and ranges from 94.3 to 96.5%. The addition of CMC (carbomethylcellulose ) improved these indicators to 96.2...98.6%. In addition to increasing water retention capacity, the addition of CMC improves the rheological properties of the mixture, increases its plasticity and ease of use, and reduces the risk of efflorescence.

Optimization of alkali-activated slag Portland cement compositions based on physical, mechanical, and decorative characteristics enabled the development of reaction powder concrete (RPC) based on these compositions.

At the first stage of research, the dependence of the strength of cement-sand concretes at different hardening times on the ratio of "binder : sand" within the range of 1:3...1:1 was established. River sand, quartz sand, with  $M_k = 1.16$ . The slag:Portland cement ratio in the slag-cement mixture was 95:5. The alkaline component was sodium metasilicate pentahydrate in powder form. The mixture was mixed with water.

As expected, an increase in the binder content in the composition leads to an increase in strength. The compressive strength of the 1:1 composition at 28 days was 87.5 MPa, the 1:2 composition was 67.7 MPa, and the 1:3 composition was 49.8 MPa. At 360 days, the values were 123.9, 94.6, and 64.8 MPa, respectively. The

highest strength was demonstrated by composition #1 with a binder:sand ratio of 1:1, which was accepted for further research as a reaction-powder concrete.

Optimization of the fractional composition of river sand improved strength indicators at all hardening stages by 5...6%, apparently due to denser packing of aggregate grains and reduced water consumption associated with a decrease in the specific surface area of the aggregate.

All compositions, both with optimized and non-optimized fractional composition of sand, demonstrated particularly rapid compressive strength gain of 35.7...40.0 MPa after 1 day. After 28 days, it was 87.5...91.8 MPa, and after 360 days, it was 123.9...128.3 MPa.

The ratio of compressive strength to flexural strength was generally 5.3...5.9 at 28 days and 5.8...6.5 after 360 days, indicating increased crack resistance of the material.

The use of sodium metasilicate in the form of a solution with  $p = 1.24$  g/ml significantly intensified the structure-forming processes compared to the powdered version of sodium metasilicate and allowed for super-fast compressive strength gain of 52.3...56.0 MPa after 1 day, 73.8...76.3 MPa after 2 days, and 85.0...87.1 MPa after 3 days. The activity at 28 days was 102.4...108.7 MPa, and the strength after 360 days was 124.8...141.4 MPa, depending on the Portland cement content in the slag Portland cement mixture. An increase in the Portland cement content accelerates strength gain in the early stages (up to 3 days), but slightly reduces it in the longer term.

The slightly lower activity of the binder composition when using sodium metasilicate powder compared to mixing with an aqueous solution of sodium metasilicate is obviously due to the time and energy required to dissolve the powder compared to the aqueous solution of metasilicate, which has a higher alkalinity from the outset and immediately interacts with the components of the binder composition. This is particularly noticeable in the early stages of hardening. However, over time, this difference is significantly reduced.

The influence of the silicate modulus of soluble sodium silicates on the strength of reinforced concrete structures has been revealed. It has been shown that the use of soluble sodium silicates with  $M = 2...3$  in the presence of 55...95% slag in alkali-activated slag Portland cement ensured the production of ultra-fast-setting high-strength reaction powder concretes with compressive strength after 3 hours of 19.0...28.0 MPa, after 1 day of 40.0...45.7 MPa, after 7 days of 69.2...95.3 MPa, after 28 days of 77.7...129.8 MPa, after 90 days – 82.7...138 MPa, after 180 days – 84.8...141.5 MPa, after 360 days – 88.2...144.6 MPa, depending on the value of the silicate modulus of soluble glass and the composition of slag Portland cement. The optimal solution is to use soluble sodium glass with  $M_s = 2.5...2.6$ .

The setting time was 34...46 minutes, but it can be extended to 60...90 minutes by using the complex additive "TNF + glycerin".

The impact (ballistic) strength of RPC samples based on alkali-activated slag Portland cements was 3354...4315 kJ/m<sup>3</sup> after 28 days, based on traditional Portland cement – 3001 kJ/m<sup>3</sup>, and after 180 days, 4413...4805 kJ/m<sup>3</sup> and 4001 kJ/m<sup>3</sup>, respectively.

The nature of destruction and higher impact resistance indicators of RPC based on alkali-activated slag Portland cements can be explained by the peculiarities of the phase composition of new formations with a predominance of low-basic calcium hydrosilicates and hydroaluminosilicates of mixed Na-Ca composition, the ratio of the gel-like and crystalline components of hydraulic new formations with a predominance of the gel-like component, which is confirmed by other authors.

In addition, concretes of this class have higher adaptive properties and the ability to self-heal defects in the form of cracks if they appear as a result of extreme operating conditions.

Regardless of the composition, the impact strength of all RPCs increases over time.

The high crack resistance of such concrete is confirmed by the ratio of compressive strength to flexural strength within the range of 5.3...5.9 at 28 days of age.

As a result of analyzing the problem of shrinkage deformations of RPC based on both traditional clinker cements and alkali-activated cements in particular, factors for controlling the deformation of these concretes based on a binder system of "granulated blast furnace slag + Portland cement + soluble sodium silicates" with a slag content in the system of 5...55% were identified. It has been shown that the most effective factors in counteracting the shrinkage deformation of alkali-activated cements and RPC based on them are the use of nanomodifying mineral additives and the presence of Portland cement in the "slag + Portland cement" mixture. The influence of other factors, which are less effective, decreases in the following order: the presence of fiber > temperature and humidity conditions of hardening > silicate modulus of soluble silicates > aggregate state of soluble sodium silicates > granulometry of the filler.

It has been found that microstructure compaction and intensification of crystallization processes in the cement matrix are achieved by a nanomodifying additive of finely dispersed calcite carbonate ( $CaCO_3$ ), which reduces concrete shrinkage by 1.6...1.7 times to values of 0.55...0.7 mm/m at the moment of stabilization after 90 days of hardening. 0.7 mm/m at the moment of stabilization after 90 days of hardening. In addition, reducing the size of calcite particles from 8...10  $\mu\text{m}$  to 1...5  $\mu\text{m}$  accelerates and deepens the structure-forming processes of reaction-powder concretes and further reduces deformations by 5...6%. The nano-additive of titanium oxide  $TiO_2$  also has a positive effect on reducing shrinkage deformations, which in an amount of 5% allowed to reduce shrinkage by 12...15%. In addition, nano- $TiO_2$  and  $CaCO_3$  additives significantly whiten the binding component of RPC to a level of  $\geq 70\%$ , which allows RPC to be classified as decorative.

The effectiveness of micro-reinforcement of RPC with polypropylene and copolymer-propylene fiber in an amount of 3...4  $\text{kg/m}^3$  has been demonstrated, which reduced shrinkage by 30...35%. At the same time, fiber with a size of 6...12 mm showed better results than fiber with a size of 24 mm.

Testing the effect of heat and moisture treatment on the deformation properties of alkali-activated cements and RPC showed its effectiveness and positive impact,

with a reduction in inherent shrinkage deformation of 15...20% compared to naturally hardened samples.

When using sodium metasilicate in the form of an aqueous solution, the inherent shrinkage deformation at the time of stabilization at 90 days was 0.98 mm/m. The use of sodium metasilicate in powder form reduced shrinkage deformation from 0.98 mm/m to 0.89 mm/m, i.e., by 9.0%, compared to the use of sodium metasilicate in solution form.

The influence of the silicate modulus of soluble sodium silicates on the shrinkage and strength of RPC has been revealed. It has been established that a decrease in  $M_s$  from 3 to 1 leads to a decrease in shrinkage from 1.13 to 0.98 mm/m..

It has been proven that optimizing the grain composition of the aggregate allows for an additional reduction in shrinkage of 4...6% compared to control concrete samples using non-optimized aggregate.

It has been shown that the combined effect of the above factors (nano-additives, micro-reinforcement, heat and moisture treatment, aggregate state of the alkali component, silicate modulus of soluble sodium silicates, optimization of aggregate granulometry) allows obtaining RPC with its own shrinkage deformations within 0.5...0.6 mm/m, which is comparable to conventional concretes.

As a result of these measures, high-strength alkali-activated cement reaction powder concrete of strength class C80/95 with high early strength kinetics (52.3; 76.3; 85.0 MPa at 1, 2, 3 days, respectively), high crack resistance (with a compressive strength to flexural strength ratio of 5.3...5.9), reduced shrinkage deformations (0.5...0.6 mm/m), high weather resistance and frost resistance  $\geq$  F300, stable performance characteristics over time. In terms of early strength gain, ultra-rapid hardening RPC significantly outperforms concretes based on alumina cement, super-rapid hardening Portland cement, and low water demand cement, while having acceptable shrinkage deformation. Given the high physical, mechanical, operational, and special characteristics of the RPCs obtained, they can be classified as "highly functional".

The *technological aspects of obtaining RPC* based on nanomodified alkali-activated cements have been revealed.

The influence of the method of introducing the alkali component (aggregate state – powder/solution) and the composition of slag-containing cement on the setting time – one of the main technological factors in obtaining RPC – has been revealed. The use of sodium metasilicate ( $M_s = 1$ ) in the form of a solution ensured the maximum reduction in the soluble-binding ratio and more intensive development of concrete strength compared to the use of metasilicate in powder form – by 30.5%; 23.5%; 18.4%; 6.1%; and 3.9%, providing compressive strength of 52.3; 85.0; 108.7; 136.1; and 141.4 MPa at ages 1, 3, 28, 180, and 360 days, respectively. All compositions demonstrated a stable and monotonous increase in long-term strength. The ratio of compressive strength to flexural strength in the range of 5.3...5.9 confirmed the high viscosity and crack resistance of concrete. Increasing the Portland cement content in the slag-cement binder system from 5 to 45% leads to an intensification of strength gain in the early stages (up to 3 days) and a reduction in setting time. When using sodium metasilicate ( $M_s = 1$ ), depending on its aggregate state (powder, solution) and the composition of the aluminosilicate component, the setting time can be 19...100 minutes. And when adding LSTM, it is 40...118 minutes.

It has been shown that RPCs based on alkali-activated slag Portland cements demonstrate higher ballistic characteristics compared to RPCs based on traditional Portland cement. Thus, the developed RPCs demonstrate an increase in key properties over time (compared to 28 days of age): compressive strength after 360 days – up to 141.4 MPa (an increase of 30.1%) and 144.6 MPa (9.1%); impact strength after 180 days – up to 4413 kJ/m<sup>3</sup> (an increase of 31.6%) and 4805 kJ/m<sup>3</sup> (an increase of 11.3%).

Based on the method of absolute volumes of raw components of concrete mix, a methodology for calculating the composition of sand concretes based on alkali-activated slag Portland cements, including reaction powder concretes (RPC) and concretes for 3D forming, has been proposed. For example, the consumption of

ingredients per 1 m<sup>3</sup> with a ratio of "binder : sand" of 1:1, using an alkali component in powder form and mixing with water [6]:

- binder (slag + PC + alkaline component)                   – 1034 kg/m<sup>3</sup>;
- fine river sand (Mk = 1.16)                                       – 1034 kg/m<sup>3</sup>;
- water   – 220...230 l/m<sup>3</sup>;
- W/C   – 0.213...0.222.

The composition was designed taking into account the technology of laying concrete mixture RPC. Under the influence of *vibration* during laying, the content of entrained air does not exceed 4...8% by volume.

The use of RPC for forming products by *extrusion* or in *3D-printers* with the determination of the main technological parameters of the process was also considered. It was established that the consistency of concrete mixes should correspond to grades from S1 (cone slump 1...4 cm) to V3 (stiffness 6...10 s) depending on the volume and configuration of the product, the type of extruder (screw, screw), the pressure and speed of extrusion of the mixture. The pressure and extrusion speed vary depending on the type of equipment. Fast-setting mixtures with setting times of 25...40 min are recommended. RPC mixtures for 3D-printing should have the following basic characteristics: Sutard flow 12...15 cm (or 10...14 cm on a mini-slumpcone), water retention  $\geq 97\%$ , setting speed  $\leq 20$  min. Given the high intensity of RPC strength gain, including in the early stages, it has been proven that heat treatment can be dispensed with. In certain special cases where heat treatment is technologically necessary, it is advisable to limit the temperature to no higher than 50°C. This indicates the energy efficiency of the developed RPCs.

Based on the data obtained during the research, technological recommendations have been developed for the production and use of high-performance reaction-powder concretes based on alkali-activated cements for the protection of critical infrastructure facilities.

Keywords: alkali-activated decorative slag Portland cements, reaction powder concretes, strength, ballistic characteristics, shrinkage, RPC calculation method, technological recommendations.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	38
1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ І ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	50
1.1. Реакційно-порошкові бетони і перспективи підвищення їх ефективності .....	50
1.1.1. Застосування лужно-активованих цементів .....	56
1.1.2. Надання декоративних властивостей лужно-активованим цементом .....	62
1.2. Теоретичні передумови, наукова гіпотеза і задачі досліджень .....	68
2. СИРОВИННІ МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	73
2.1. Сировинні матеріали .....	73
2.2. Методи досліджень .....	77
2.2.1. Фізико механічні дослідження .....	77
2.2.2. Фізико хімічні дослідження .....	79
3. РОЗРОБКА СПОСОБІВ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ЛУЖНО- АКТИВОВАНИХ ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТІВ .....	82
3.1. Вивчення процесів твердіння і структуроутворення швидкотверднучих наномодифікованих лужно-активованих шлакопортландцементів, як основи для отримання реакційно- порошкових бетонів .....	82

3.1.1. Вплив способу введення лужного компонента та складу шлаковміщуючого цементу на строки тужавлення .....	82
3.1.2. Вплив на строки тужавлення добавки ЛСТМ та її кількості ..	84
3.1.3. Визначення особливостей процесів структуроутворення лужно-активованих шлакопортландцементів залежно від агрегатного стану лужного компоненту і присутності модифікуючих комплексів .....	86
3.1.4. Вплив агрегатного стану лужного компоненту, складу цементу та модифікуючих добавок на основні технологічні і фізико-механічні властивості лужно-активованих цементів ..	94
Висновки за розділом .....	96
<b>4. ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ КЕРУВАННЯ ДЕКОРАТИВНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ У СИСТЕМІ "ШЛАК + ПОРТЛАНДЦЕМЕНТ + ЛУЖНИЙ КОМПОНЕНТ" .....</b>	<b>97</b>
4.1. Вплив відбілюючих добавок на ступінь білизни лужно-активованих шлакових цементів та їх фізико-механічні характеристики .....	97
4.2. Вплив каоліну на фізико-механічні властивості декоративних лужно-активованих шлакових цементів .....	102
4.3. Вплив хімічного складу шлаків на білизну лужно-активованих шлакових декоративних цементів .....	104
4.4. Оптимізація складів лужно-активованих декоративних цементів з урахуванням хімічного складу шлаків .....	106
4.5. Визначення особливостей процесів структуроутворення декоративних лужно-активованих шлакопортландцементів у присутності модифікуючих комплексів .....	110
4.5.1. Фазовий склад і морфологія гідратних новоутворень .....	110

4.5.2. Дослідження розподілу і ступеню зв'язування вільного лугу у цементному камені складу "(шлак + цемент) + модифікуюча добавка + метасилікат натрію" .....	114
4.5.3. Тепловиділення складів "(шлак + цемент) + модифікуюча добавка + метасилікат натрію + пігмент" .....	116
4.6. Економічний аспект використання підбілювачів .....	118
4.7. Вплив вмісту портландцементу у суміші "шлак + портландцемент" та відбілюючих добавок на білизну лужно-активованих декоративних шлакопортландцементів .....	120
Висновки за розділом .....	125
<b>5. ВИВЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ТА ОСНОВНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕКОРАТИВНИХ ЛУЖНО-АКТИВОВАНИХ ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТІВ .....</b>	<b>128</b>
5.1. Вплив відбілюючих та пігментних мінеральних добавок на еволюцію фізико-механічних та експлуатаційних властивостей декоративних лужно-активованих шлакових цементів .....	128
5.1.1. Міцність на стиск .....	128
5.1.2. Власні деформації усадки .....	131
5.1.3. Морозостійкість і атмосферостійкість .....	133
5.1.4. Стійкість кольору до ультрафіолетового випромінювання і пропарювання .....	134
5.1.5. Схильність до висолоутворення .....	135
5.1.6. Водоутримання .....	137
Висновки за розділом .....	137

6. РОЗРОБКА СКЛАДІВ РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВИХ БЕТОНІВ НА ОСНОВІ ЛУЖНО-АКТИВОВАНИХ ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТІВ ТА ВИВЧЕННЯ ЇХ ВЛАСТИВОСТЕЙ .....	139
6.1. Оптимізація складів реакційно-порошкових бетонів .....	139
6.1.1. Вплив співвідношення "цемент : пісок" на міцність бетонів ..	139
6.1.2. Вплив гранулометрії дрібнозернистого заповнювача на міцність РПБ .....	141
6.1.3. Вплив агрегатного стану лужного компонента на міцність РПБ .....	143
6.1.4. Вплив алюмосилікатної складової в'язучого на міцність РПБ .....	145
6.1.5. Розробка надшвидкотверднучиз високоміцних РПБ на основі висомодульних розчинних натрієвих силікатів .....	147
6.1.6. Генезис міцності РПБ .....	151
6.1.7. Ударна міцність та тріщиностійкість РПБ .....	154
6.2. Управління деформаціями усадки реакційно-порошкових бетонів ..	157
6.2.1. Вплив вмісту портландцементу у в'язучому, складу бетону і наномодифікованих мінеральних добавок на усадку РПБ ..	157
6.2.2. Вплив мікроармування та тепловологої обробки на деформації усадки РПБ .....	162
6.2.3. Управління деформаціями реакційно-порошкових бетонів при використанні високомодульного розчинного натрієвого скла .....	163
6.3. Розробка рецептур піщаних бетонів .....	164
6.4. Морозостійкість, атмосферостійкість і водостійкість РПБ .....	167

6.5. Натурні випробування декоративних покриттів з лужно-активованих реакційно-порошкових бетонів .....	168
Висновки за розділом .....	170
<b>7. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИРОБНИЦТВА ДЕКОРАТИВНИХ РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВИХ БЕТОНІВ .....</b>	<b>175</b>
7.1. Загальні положення .....	175
7.2. Опис технологічного процесу .....	178
7.3. Приймання і зберігання вихідних сировинних компонентів .....	179
7.4. Базові склади реакційно-порошкових бетонів та їх основні технологічні та фізико-механічні характеристики .....	179
7.5. Технологія приготування бетонної суміші реактивно-порошкових бетонів .....	181
Висновки за розділом .....	182
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ .....</b>	<b>183</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>185</b>
<b>ДОДАТОК. Технологічні рекомендації щодо виробництва і експлуатації реакційно-порошкових бетонів підвищеної ефективності на основі лужно-активованих шлакопортландцементів для захисту об'єктів критичної інфраструктури .....</b>	<b>204</b>

## ВСТУП

### Актуальність теми

Розвиток промисловості та політики безпеки вимагає нових будівельних матеріалів, до яких висувається цілий ряд вимог – вони повинні бути безпечнішими, екологічними, економними, декоративними, мати ряд спеціальних властивостей, що пов'язано з сучасними викликами. З іншого боку, аналіз сучасних тенденцій у світовому матеріалознавстві, військово-політична ситуації у світі, і в Україні зокрема, вказують на пріоритетність розробки і використання будівельних матеріалів з високими та надвисокими фізико-механічними і експлуатаційними характеристиками, які здатні витримувати значні динамічні навантаження. Це, у першу чергу, цементи і бетони на їх основі [1, 2]. Існує попит і зацікавленість в отриманні подібних матеріалів. Але щоб забезпечити ефективність використання таких цементів у бетонах слід значно підвищити їх активність та формування комплексу спеціальних властивостей – високих пружно-пластичних характеристик, високої тріщиностійкості, ударної міцності, регульованих власних деформацій, морозостійкості, водонепроникності, здатності тверднути при від'ємних температурах та під водою, вогнестійкості, корозійної стійкості, низького тепловиділення і, не в останню чергу, декоративності та зручності використання, яка може бути реалізована у форматі сухих будівельних сумішей.

Таким чином, попит на неорганічні цементні матеріали та бетони на їх основі з вищевказаними властивостями великий. Це обумовлює актуальність проблеми і необхідність її вирішення.

Більшість будівельних матеріалів ґрунтується на портландцементях. Зокрема, декоративні цементи на основі білого портландцементу, який широко не виробляється та імпортується у багатьох країнах. Але такі декоративні

цементи мають багато недоліків властивих для традиційного портландцементу, зокрема високі енергетичні затрати, не екологічність. Використання декоративних лужно-активованих цементів може стати життєво важливою альтернативою у виробництві білих та кольорових цементів. Вони здатні надавати ряд особливих властивостей – стабільність кольору, довговічність, високу адгезію тощо [3-9].

Основні світові тенденції спрямовані на підвищення вимог до багатофункціональності і довговічності будівельних матеріалів, підвищення ефективності використання цементів, зменшення енерговитрат і собівартості для підвищення їх декоративних властивостей шляхом використання ефективних засобів отримання розчинів і бетонів на їх основі за рахунок додаткового запровадження природних та техногенних модифікаторів у присутності ефективних ПАР.

Відповідність дисертаційної роботи зазначеним тенденціям сприяє, з одної сторони, становленню економіки замкненого циклу, направленої на забезпечення ефективності виробництва та збереження навколишнього середовища, а з іншого боку, підвищенню декоративних, фізико-механічних та експлуатаційних показників при зведенні нових та ремонті старих споруд загально-будівельного та спеціального, у т.ч. стратегічного призначення.

Доцільність виконання завдань, на вирішення яких спрямовано дисертаційну роботу, обґрунтована результатами попередніх досліджень вітчизняних та закордонних авторів при виконанні практичних розробок як в Україні, так і за кордоном. Отримані результати потребують систематизації та розвитку проблематики у напрямку управління як складом гідратних новоутворень цементного каменю, так і структури бетонів, здатних забезпечити необхідний рівень декоративних властивостей, механічну міцність, ударну стійкість та їх довговічність.

## **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційна робота пов'язана з виконання держбюджетної тематики № 2ДБ-2023 "Розробка реакційно-порошкових бетонів підвищеної ефективності на основі лужно-активованих цементів для захисту об'єктів критичної інфраструктури" (№ держреєстрації 0123U101832).

Матеріали дисертаційної роботи включені у науково-технічні звіти кафедри "Технології будівельних конструкцій і виробів" та Науково-дослідного інституту в'язучих і матеріалів Київського національного університету будівництва і архітектури.

## **Мета і задачі дослідження**

Метою дисертаційної роботи є визначення оптимальних умов отримання, управління властивостями і використання декоративних реакційно-порошкових бетонів на основі лужно-активованих шлакопортландцементів, а також створення нових матеріалів та розробка прикладних і технологічних рішень отримання надвисокоміцних реакційно-порошкових ефективних бетонів на основі лужно-активованих наномодифікованих шлакопортландцементів, які можуть бути використані як для спорудження цивільних об'єктів, так і для спорудження та захисту об'єктів військової та критичної інфраструктури.

Відповідно до поставленої мети були вирішені такі задачі:

- досліджено вплив агрегатного стану лужного компоненту, складу цементу та модифікуючих добавок органічного та неорганічного походження на *строки тужавлення і збереженість їх у часі*; встановлено вплив агрегатного стану лужного компоненту, складу цементу та модифікуючих добавок органічного та неорганічного походження на *структуруутворення* лужно-активованих шлакопортландцементів і на

- основні фізико-механічні характеристики* РПБ на основі лужно-активованих шлакопортландцементів;
- розроблені ефективні засоби регулювання *власними деформаціями* наномодифікованих РПБ на основі лужно-активованих шлакопортландцементів;
  - досліджено вплив модифікуючих добавок на *експлуатаційні властивості* реакційно-порошкових бетонів на основі наномодифікованих лужно-активованих цементів (міцність, ударна міцність, тріщиностійкість, власні деформації усадки, здатність тверднення у різних умовах, генезис міцності і стійкість кольору у часі);
  - розроблені *технологічні основи виготовлення і експлуатації* матеріалів на основі наномодифікованих лужно-активованих шлакопортландцементів;
  - розроблені *технологічні рекомендації* щодо виробництва і експлуатації модифікованих реакційно-порошкових бетонів;
  - встановлено *вплив хімічного складу і особливостей мікроструктури* лужно-активованого шлакопортландцементу залежно від вихідного шлакового та лужного компонентів *на зміну забарвлення бетонів* при твердненні у нормальних умовах та на повітрі;
  - обґрунтовано тип та кількісний вміст ПАР у комплексі з наноструктурними модифікаторами на зменшення водо-цементного відношення для загальної активізації процесів структуроутворення, формування початкової структури декоративних бетонів та направлений їх розвиток у часі *для запобігання утворення висолів* у кінцевому продукті під дією зовнішнього середовища;
  - визначено типи мінеральних барвників, їх кількісний вміст при отриманні заданих кольорів матеріалів і досліджено розвиток міцності та довговічність РПБ у їх присутності;
  - виконано *дослідно-промислову перевірку технологічності та швидкості тверднення* отриманих декоративних РПБ у природних натурних умовах залежно від атмосферних умов зовнішнього середовища;

- досліджено *стійкість забарвлення та стійкість структури* матеріалів після стандартних і натурних випробовувань РПБ.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

- визначено закономірності впливу на процеси відбілювання реакційно-порошкових бетонів (РПБ), у т.ч. фотокаталітичного діоксиду титану у присутності ефективних ПАР та їх комплексів з карбонатними та алюмосилікатними сполуками;
- вивчено вплив наноструктурних сполук орґано-мінеральних комплексів на процеси структуроутворення та довговічність реакційно-порошкових бетонів на лужно-активованих шлакопортландцементях та їх участь у процесах окислення структурних елементів шлаків;
- розвинені достовірні уявлення і способи щодо підвищення потенціальних можливостей лужно-активованих шлакопортландцементів у бетонах нового покоління шляхом керовано-направленого додаткового синтезу у цементних матрицях гідроалюмосилікатів, подібних за структурою природним цеолітам при модифікуванні нанодобавками у вигляді силікатів натрію і високоактивних алюмосилікатів;
- виявлено можливості зменшення затратності і підвищення екологічності реакційно-порошкових бетонів на основі лужно-активованих шлакопортландцементів, так як такі цементи максимально насичені промисловими відходами техногенного походження (шлаки доменні гранульовані, золи тощо);
- визначено стійкість мінеральних кольорових барвників при формуванні декоративних реакційно-порошкових бетонів та їх вплив на довговічність матеріалів, у т.ч. здатність до утворення висолів на поверхні штучного каменя;

- вивчено особливості формування мікроструктури та порового простору довговічних декоративних реакційно-порошкових бетонів у присутності мінеральних модифікаторів та ПАР;
- виконана оптимізація складів реакційно-порошкових бетонів та визначені закономірності композиційної їх побудови за критерієм міцності та розроблено механізми управління власними деформаціями усадки цих бетонів на основі в'язучої системи "шлак + портландцемент + лужний компонент" з отриманням надшвидкотверднучих високоміцних РПБ з високими фізико-механічними і експлуатаційними характеристиками, з технологічно прийнятними строками тужавлення та керованими власними деформаціями усадки;
- на відміну від наукових робіт вітчизняних та закордонних вчених, вказана розробка запропонована при використанні ефективних лужно-активованих шлакопортландцементів, а не традиційних портландцементних в'язучих речовин, які потребують складних технологій виготовлення, відрізняються низькою екологічністю, високою енергоємністю і характеризуються нестабільними характеристиками.

### **Практичне значення одержаних результатів**

Практична реалізація завдань проекту дозволяє *суттєво розширити* напрямки використання розчинів і бетонів на основі лужних декоративних шлакопортландцементів, як аналогу декоративних традиційних цементів, що за рахунок використання відходів та супутніх продуктів металургії та теплоенергетики (металургійних шлаків, паливних зол, відходів виробництва алюмінію тощо) сприятиме вирішенню питань будівельно-виробничого комплексу, а також *екологічних проблем поводження із великотоннажними відходами*. Причому, зазначені проблеми є актуальними не тільки для України,

але й для всього світу, підтвердженням чого є регулярне проведення заходів, присвячених цим питанням.

Визначені заходи відбілювання та отримання довговічних декоративних матеріалів на основі лужно-активованих шлакопортландцементів, що дозволяє *суттєво підвищити терміни експлуатації* будівельних споруд загального та спеціального призначення, надати їм декоративної виразності. Зазначене дозволяє *зменшити витрати на експлуатацію* таких конструкцій, споруд, об'єктів, *збільшити строк їх безвідмовної служби*, що сприяє розвитку та ефективності економіки.

За результатами аналізу світових ринків можна стверджувати, що запропоновані декоративні цементи та матеріали на основі лужно-активованих шлакопортландцементів *будуть мати попит на ринку України та світу* з огляду на високу енерго- та ресурсоемність традиційних білих та декоративних цементів. Крім того, для України це шанс *зменшити імпорتنу складову економіки*, адже всі білі цементи на нашому ринку є імпортованими матеріалами.

Отримані знання у результаті виконання даної роботи *можуть бути реалізовані на договірних умовах* як в Україні, так і за кордоном за рахунок виконання робіт за договорами, контрактами та ліцензійними угодами. Таким чином, результати виконання проекту *будуть конкурентоздатними* і відповідати потребам розвитку технологій, суспільства та економіки України, сприяти підвищенню сталого розвитку країни у цілому. Крім того, масштабне використання промислових відходів знаходиться у розрізі пріоритетних цільових програм уряду України (рішення РНБО "Про комплекс заходів щодо вдосконалення проведення моніторингу довкілля та державного регулювання у сфері поводження з відходами в Україні", тощо) та завдань із забезпечення екологічної складової національної безпеки, а запровадження випуску білих цементів в Україні *зменшить імпорتنе навантаження* на економіку країни, що також є питанням національної безпеки.

*Практична цінність* розробки бетонів нового покоління, а саме реакційно-порошкових бетонів на основі наномодифікованих лужно-активованих шлакопортландцементів, є надзвичайно високою також і у галузі безпеки і обороноздатності країни. Цінність для практично-соціального розвитку країни очікуваних напрацювань обумовлена запровадженням запропонованих цементів, виготовлених за ресурсо- та енергозберігаючими технологіями при відповідальному відношенні до екології оточуючого середовища (зменшення емісії  $CO_2$ ) за рахунок використання побічних продуктів виробництва і відходів промисловості (доменні гранульовані шлаки, золи-винесення тощо). Вказані характеристики визначають *перспективність використання* таких матеріалів при зведенні та захисті споруд критичної військової та цивільної інфраструктури: греблі, дамби, електростанції, станції водопостачання, укріплення, мостові конструкції, склади боєприпасів, амуніції, продовольства, дорожні та аеродромні покриття, фортифікаційні споруди тощо.

Враховуючи їх високі фізико-механічні, експлуатаційні та спеціальні характеристики їх можна віднести до "високофункціональних".

Практична цінність та зацікавленість у результатах даної роботи підтверджена листами підтримки від наступних провідних підприємств будівельної індустрії України: Промислово-будівельної групи "Ковальська", м.Київ; ПрАТ "Броварський завод залізобетонних конструкцій", м.Бровари; ПП "Київ-Ресурс", м.Київ; ПрАТ "Домобудівельний комбінат №4", м.Київ.

### **Особистий внесок здобувача**

Полягає у виконанні експериментальних досліджень, обробці отриманих результатів та впровадженні розроблених матеріалів у виробництво, що відображено у його наукових публікаціях і апробації результатів.

## Наукові публікації

1. P Krivenko, I Rudenko, O Konstantynovskyi, A Razsamakin Sustainable performance of alkali-activated blast furnace cement concrete with high freeze-thaw resistance. *OP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing*, 2023. 1254, 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012003> (Scopus).
2. Gelevera O., Razsamakin A., Rudenko I., Konstantynovskyi O., Smeshko V. *Development mix design alkali-activated cement powder concrete. Advances in Transdisciplinary Engineering. IOS Press, Vol.62. 2024. pp. 644–650.* doi: <https://doi.org/10.3233/ATDE241044> (Scopus).
3. Руденко І., Гоц В., Гелевера О., Разсамакін А. Управління термінами тужавлення шлаковміщуючих цементів, активованих метасилікатом натрію. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, 2023. 13, 110–123. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.13.2023.110-123> (фахове видання).
4. Кривенко П. В., Руденко І. І., Гелевера О. Г., Разсамакін А. В. Вплив агрегатного стану лужного компоненту на властивості лужно-активованих цементів. *Збірник наукових праць "Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди"*, №44, 2023. С.39-50. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i44.05> (фахове видання).
5. Руденко І.І., Гелевера О.Г., Константиновський О.П., Смешко В.В., Разсамакін А.В. Реакційно-порошкові бетони на основі лужно-активованого цементу. *Збірник наукових праць "Будівельні конструкції. Теорія і практика"*. Вип.15. Київ: КНУБА, 2024. С.135-145. doi: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.15.2024.135-145> (фахове видання).
6. Разсамакін А.В., Гоц В.І., Руденко І.І., Гелевера О.Г. Роль  $\text{CaCO}_3$  у формуванні міцнісних і декоративних властивостей порошкового лужно-активованого шлакопортландцементного бетону. *Збірник наукових праць*

- "Сучасне будівництво та архітектура", №09. Одеса: ОДАБА, 2024. с.77-81.  
<https://doi.org/10.31650/2786-6696-2024-9-71-81> (фахове видання).
7. Руденко І.І., Гелевера О.Г., Разсамакін А.В. Вплив складу реакційно-порошкових лужно-активованих шлакопортландцементних бетонів на еволюцію їх властивостей. *Збірник наукових праць "Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди"*, № 47, 2025. С.211-224. DOI:[10.31713/budres.v0i47.24](https://doi.org/10.31713/budres.v0i47.24) (фахове видання).
  8. Andrij RAZSAMAKIN The influence of technological factors on the properties of reaction powder concretes based on alkali-activated slag Portland cement/ *Збірник наукових праць "Будівельні конструкції. Теорія і практика"*. Вип.17. Київ: КНУБА, 2025. С.12-28. DOI: 10.32347/2522-4182.17.2025.12-28. (фахове видання).
  9. Gots V. I., Gelevera O. G., Razsamakin A. V. Provision of decorative and high performance properties to alkaline-activated slag portland cements (English). *Збірник тез міжнародної науково-технічної конференції "Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій"*. Одеса: ОДАБА, 2024. С. 28-31. [https://drive.google.com/file/d/1jI7vWluCtPrF4HO4P4BpNs-\\_at6XPvwR/view](https://drive.google.com/file/d/1jI7vWluCtPrF4HO4P4BpNs-_at6XPvwR/view).
  10. Razsamakin A.V., Gots V.I., Rudenko I.I., Gelevera O.G. The role of CaCO<sub>3</sub> in the formation of strength and decorative properties of powder alkaline-activated slag cement concrete: *Тези доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції*. Загальна редакція – М.Г. Сур'янінов. Одеса: ОДАБА, 2024. С. 187-192. [https://drive.google.com/file/d/1DJDK4CIgV1jfiEJlvIobfhk-5mHedf4\\_/view](https://drive.google.com/file/d/1DJDK4CIgV1jfiEJlvIobfhk-5mHedf4_/view).
  11. Руденко І., Гелевера О., Разсамакін А. Технологічні рекомендації щодо виробництва і експлуатації реакційно-порошкових бетонів підвищеної ефективності на основі лужно-активованих цементів для захисту об'єктів критичної інфраструктури. Київ: КНУБА, 2025. 23 с.

## Апробація результатів дисертації

Апробація результатів дисертації була реалізована у вигляді доповідей та тез доповідей на Міжнародних науково-комунікативних заходах та конференціях.

1. Razsamakin A.V., Gots V.I., Rudenko I.I., Gelevera O.G. The role of  $\text{CaCO}_3$  in the formation of strength and decorative properties of powder alkaline-activated slag cement concrete. *Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції "Актуальні проблеми інженерної механіки"*, 5-7 червня 2024 р. Одеса. ОДАБУ. С.187-192.  
[https://drive.google.com/file/d/1DJDK4CIgV1jfiEJlvIobfhk-5mHedf4\\_/view](https://drive.google.com/file/d/1DJDK4CIgV1jfiEJlvIobfhk-5mHedf4_/view) .
2. Gots V. I., Gelevera O. G., Razsamakin A. V. Provision of decorative and high performance properties to alkaline-activated slag portland cements. *Збірник тез міжнародної науково-технічної конференції "Структурування та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій"*. 23 квітня 2024 року. Одеса. ОДАБУ. С.28-32.  
[https://drive.google.com/file/d/1jI7vWluCtPrF4HO4P4BpNs-\\_at6XPvwR/view](https://drive.google.com/file/d/1jI7vWluCtPrF4HO4P4BpNs-_at6XPvwR/view)
3. Гоц В., Гелевера О., Разсамакін А. Ударно-захисні характеристики реакційно-порошкових бетонів на основі лужно-активованих шлакопортландцементів. *Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції "Будівлі та споруди спеціального призначення: матеріали та конструкції"*, Київ: КНУБА, 14-15 травня 2025. С.187-188.  
<https://doi.org/10.59647/978-617-8633-07-3/1>.
4. Rudenko I.I., Helevera O.G., Razsamakin A.V., Makarenko S.I. The influence of silicate module of soluble sodium silicates on the strength of reactive powder concrete based on blast furnace cement. *Міжнародна науково-технічна конференція "Структурування та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій"*, Одеса, 22-23 квітня 2025. С.98-101.

<https://drive.google.com/file/d/1Ivhm1yPl4wwL4GQvJuxeVVMHAE3JHJma/view>

5. Rudenko I.I., Helevera O.G., Razsamakin A.V. Ballistic properties of reactive powder concretes based on alkali-activated slag and portland cements. *Міжнародна науково-технічна конференція "Гідротехнічне і транспортне будівництво"*, Одеса, 29-30 травня 2025.
6. Руденко І.І., Гелевера О.Г., Разсамакін А.В. Вплив складу реакційно-порошкових лужно-активованих шлакопортландцементних бетонів на еволюцію їх властивостей. XIII науково-практичний онлайн-семінар *"Актуальні проблеми сучасної технології бетону: структура, властивості та склад бетону"*, 14 травня 2025 р. м. Рівне, НУВГП.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 17 наукових праць, з них:

- 6 – у наукових фахових виданнях України;
- 2 – у періодичних наукових виданнях інших держав, які включені до міжнародних наукометричних баз;
- 2 – у збірниках тез міжнародних конференцій;
- 1 – в якості нормативного документу;
- 6 – у матеріалах доповідей міжнародних конференцій.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 184 сторінках друкованого тексту основної частини, яка складається зі Вступу, 7 Розділів та Загальних висновків по роботі. Повний обсяг дисертації становить 227 сторінок і включає 64 рисунки, 43 таблиці, 41 формулу, список використаних джерел із 181 найменування та 1 Додаток на 24 сторінках.