

АНОТАЦІЯ

Терещенко Л.В. Наномодифіковані кольорові цементи та оздоблювальні будівельні розчини на їх основі з покращеними експлуатаційними характеристиками – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, 2026.

Дисертаційне дослідження присвячене розробці та оптимізації складів оздоблювальних будівельних розчинів на основі кольорових цементів, модифікованих нанокарбонатними добавками, що відрізнятимуться покращеними фізико-механічними та спеціальними характеристиками і можуть бути використані для виготовлення архітектурних конструкцій необхідного кольору і поверхні, здатної до самоочищення. Досягнення поставленої мети передбачає виконання таких задач:

- встановити механізм впливу на пігментовані цементні системи полікарбоксилатної та нанокарбонатної добавки, дослідивши процеси структуроутворення штучного каменю, а також фізико-хімічні закономірності процесів гідратації модифікованих систем як на ранніх, так і на пізніх етапах твердіння;

- розглянути критерії вибору пігментів за характером взаємодії системи «мінеральний пігмент-білий цемент-комплексна добавка», оцінити властивості наномодифікованої пігментованої цементної системи (рівномірність зафарбовування продуктів гідратації, інтенсивність кольору, світлостійкість, атмосферостійкість), вплив на терміни тужавіння та рівномірність зміни об'єму, попередження зменшення міцності при введенні пігментів;

- підібрати оптимальне співвідношення полікарбоксилатної, нанокарбонатної добавки та пігментів мінерального походження при гідратації кольорового цементу для отримання оздоблювальних розчинів з покращеними експлуатаційними характеристиками;

- дослідити можливість підвищення щільності структури цементного каменю, стійкості до карбонізації, стійкості кольору декоративного розчину у часі;
- оптимізувати склади розчинів на основі кольорових модифікованих цементів та визначити технологічні і фізико-механічні характеристики розроблених систем;
- дослідити можливість отримання оздоблювальних розчинів здатних до самоочищення.

Актуальність дослідження полягає в тому, що на сьогодні одним із основних напрямків технологічного розвитку в будівництві є використання конструкцій і виробів до яких висуваються підвищені естетичні вимоги, в тому числі й до колористичного оформлення будівель. При цьому, декоративні матеріали що використовуються повинні відповідати високим вимогам щодо міцності й стабільності кольору. При використанні бетонів на основі кольорових цементів існують певні обмеження у їх застосуванні через відомі недоліки таких систем (спад міцності таких бетонів у часі, нестабільність кольору, висолоутворення, підвищена усадка). Дослідження властивостей та вивчення характеристик модифікованих кольорових цементів та забезпечення їх високих експлуатаційних властивостей обумовлює актуальність даної роботи.

Проведений аналіз інформаційних джерел в галузі отримання оздоблювальних будівельних розчинів на основі модифікованих кольорових цементів, дозволяє висунути гіпотезу про можливість отримання матеріалів з покращеними експлуатаційними характеристиками для архітектурного декору, що відрізняються стабільністю кольору у часі, здатністю до самоочищення, високою морозостійкістю та стабільністю міцності у часі за рахунок модифікування їх структури нанокарбонатними добавками, що співпрацюють з полікарбоксилатними пластифікаторами та забезпечують направлений синтез низькоосновних гідросилікатів, а на мезорівні - шляхом регулювання гранулометричного складу дрібного заповнювача у напрямку зменшення його пустотності, для підвищення щільності отриманих розчинів.

На першому етапі досліджень проводилось порівняння зміни міцності цементних зразків на основі білого цементу різних виробників з різним вмістом мінералів C_3A та C_3S без введення добавок. Всі цементи показали стабільний набір міцності у часі, причому цемент з низьким вмістом C_3A має вищі показники ніж з високим. Слід зазначити, що на будівельному ринку сьогодні переважають більш дешеві цементи з високим вмістом C_3A , оскільки, отримання білого цементу з пониженим цього мінералу потребує додаткових технологічних прийомів, що значно збільшує затрати на його виробництво. Враховуючи особливості будівельного ринку, для досліджень були вибрані цементы як з мінімальною кількістю C_3A , так і з максимальною.

При додаванні до білого портландцементу з низьким рівнем C_3A , полікарбоксилатних суперпластифікаторів підтверджено ефективність полікарбоксилатних суперпластифікаторів. Але на ранніх етапах твердіння (3 доба) найбільша міцність цементного каменю досягається при використанні суперпластифікаторів з довгими гідрофобними боковими ланцюгами та високою й середньою щільністю заряду, відповідно в кількості 1...1,5% від маси цементу. У більш пізні терміни твердіння пластифікатор Melflux 5581 F у кількості 1,5%, підвищує міцність в 1,5 рази у порівнянні з контрольними зразками.

При введенні суперпластифікатора у кількості до 1% до білого цементу з високим вмістом C_3A спостерігаємо спад міцності до 15% у віці 28 діб. Це пояснюється тим, що при введенні пластифікуючої добавки до цементу з високим вмістом C_3A вона абсорбується на його поверхні і її залишку недостатньо для диспергування силікатних фаз і зниження в'язкості в системі. При додаванні більшої кількості пластифікуючої добавки явища спаду міцності немає.

Введення пластифікуючої добавки до цементної системи з низьким вмістом C_3A більш ефективно і при меншому дозуванні.

Модифікація цементних систем нанокarbonатними добавками сприяє стабілізації фазового складу новоутворень та гарантує довговічність отриманого цементного каменю, оскільки змінює склад новоутворень у напрямку формування більш термодинамічно стабільних сполук, що нівелює спад міцності в білих

цементів з підвищеним вмістом C_3A . Це підтверджується результатами дослідження мікроструктури цементного каменю, де можемо спостерігати заростання пор при додаванні нанокарбонатної добавки. Можливість протікання такого процесу також підтверджується кристалохімічною подібністю нанокарбонатної добавки, карбонатного еtringіту та тобермориту та можливістю їх зрощення по кристалографічним площинам, що проходять по прошарку CaO .

На наступному етапі досліджень вивчали роль окремих мінералів C_3A та C_3S в синтезі міцності штучного каменю на основі модифікованого білого портландцементу. Для цього були використані синтезовані мінерали C_3S і C_3A . Для досліджень використовували композиції на основі цих синтезованих мінералів, приготовлених у вигляді суспензій, зміни в складі яких на ранніх термінах гідратації, зафіксовані за допомогою оптичного мікроскопа зі збільшенням у 400 разів.

Одразу після замішування композиції на основі мінералу C_3A , пластифікатора та нанокарбонатної добавки, суміш виглядає однорідною. Після 10 хвилин гідратації починається процес структуроутворення і спостерігається формування центрів кристалізації новоутворень. Через 2 та 3 години від початку замішування, кількість центрів кристалізації новоутворень зростає.

За даними мікроскопії після 7 діб твердіння фазовий склад продуктів гідратації представлений переважно аморфізованою глобулярною масою, і тільки при збільшенні до 10000 разів деякі новоутворення можна ідентифікувати як гексагональні пластинки гідроалюмінатів та гідрокарбоалюмінатів кальцію.

Це підтверджується й результатами рентенофазового аналізу. Можемо припустити, що нанокарбонатні добавки відіграють роль кристалохімічних підложок і сприяють прискоренню процесу кристалізації гідратних новоутворень подібних до карбонатного еtringіту.

Аналогічні дослідження було проведено з мінералом C_3S . Аналіз наведених даних дозволяє зафіксувати збільшення кількості бугорків росту (внаслідок початку гідратації мінералу C_3S) та відмітити, що при гідратації мінералу в

присутності тільки пластифікатора має місце деяке гальмування процесу структуроутворення.

Процес гідратації C_3S в присутності нанокарбонатної добавки прискорюється за рахунок скорочення індукційного періоду. Це відбувається внаслідок внаслідок кристалохімічної подібності гідросилікатних сполук та нанокарбонатної добавки яка виступає як «підкладка» для кристалізації гідросилікату кальцію, сприяє проявленню ефекту нуклеації, забезпечуючи додаткові центри зародкоутворення.

Слід зазначити, що при введенні нанокарбонатної добавки структура є більш щільною порівняно з структурою без нанокарбонатної добавки.

Зміна механізму гідратації мінералу C_3S в присутності нанокарбонатної добавки підтверджується результатами рентгенофазового аналізу, на рентгенограмі ідентифіковані дифракційні відображення не тільки портландиту але й тобермориту та скоутиту, що свідчить про хімічну взаємодію гідросилікатної фази з карбонатною складовою.

На наступному етапі досліджено зміну міцності зразків на основі білого цементу з різними пластифікаторами у кількості 1,5% з додаванням неорганічних пігментів зеленого, синього та червоного кольорів. Пігменти вводили в кількості 3, 6 та 9% від кількості цементу. Зі збільшенням кількості пігментів міцність зразків зменшується. При цьому, найбільше зменшення міцності спостерігається на зразках, забарвлених червоним пігментом – міцність зменшується на 20%

На фотографіях мікроструктури сколу цементного каменю на основі білого портландцементу та неорганічних пігментів різного кольору можемо спостерігати наявність розвиненої порової структури. Хоча характер пор схожий при додаванні пігментів різного кольору, але при введенні пігменту червоного кольору, утворюються пори більшого розміру. Ознак наявності процесів заростання пор не спостерігається, що пояснює спад міцності цементного каменю.

З метою підтвердження впливу нанокарбонатних добавок на процеси формування кристалічних новоутворень було досліджено мікроструктуру трьох зразків цементного каменю різного складу у більш пізньому віці (90 діб). Структура цементного каменю без додавання пігменту більш однорідна, а при

додаванні червоного пігменту утворюються мікротріщини. При введенні нанокарбонатної добавки, можемо спостерігати досить однорідну структуру, зарощення тріщин та пор, що утворились внаслідок додавання пігменту.

В результаті проведених досліджень на зразках цементного каменю у формі кілець виявлено, що введення до пластифікованої цементної системи пігменту зменшує час до появи тріщин на 0,5 години. Додавання нанокарбонатної добавки збільшує час до появи тріщин пропорційно кількості добавки.

На наступному етапі досліджень було визначено вплив неорганічних пігментів на водопотребу цементних систем. на основі білого портландцементу без пластифікатора та з додаванням пластифікатора у кількості 1,5%. Збільшення кількості пігменту, незалежно від його кольору, призводить до збільшення водопотреби цементної системи, однак, при введенні пластифікатора вплив пігмента не є таким чуттєвим. Слід зазначити, що при введенні нанокарбонатної добавки водопотреба цементних систем знижується в середньому на 5 %. Консистенція цементного тіста при цьому стає більш еластичною.

Визначення впливу пігментів на терміни тужавіння цементних систем на основі білого портландцементу без добавок та на цементних системах на основі білого портландцементу, модифікованого полікарбоксилатним суперпластифікатором Melflux 1641 F у кількості 1,5% від маси цементу. При цьому, пігменти, залежно від їх кольору та дозування, чинять різний вплив як на терміни початку, так і на терміни кінця тужавіння. Початок тужавіння цементної системи без пластифікатора при введенні пігментів скорочується, за виключенням пігментів синього кольору, які збільшують час початку тужавіння. Зі збільшенням вмісту пігменту, час кінця тужавіння збільшується, за виключенням пігменту жовтого кольору, який, навпаки, скорочує його. Введення пластифікатора збільшує час початку тужавіння непігментованої цементної системи на 24%, а кінець – на 113% порівняно з цементом без введення пластифікатора. При цьому введення пігментів до пластифікованих цементних систем збільшує і час початку і час кінця тужавіння.

Для оцінки впливу нанокарбонатної добавки на терміни тужавіння цементних систем було порівняно раніше отримані результати з термінами тужавіння пластифікованої цементної системи з вмістом червоного пігменту 6 % та додаванням до них нанокарбонатної добавки у кількості 2,5...4,5 %. Зі збільшенням кількості введеної нанокарбонатної добавки пропорційно скорочуються терміни початку та кінця тужавіння. Дослідження зміни температури розігріву цементного тіста, термоізолюваного від навколишнього середовища, в перші 20 годин гідратації підтверджує вплив нанокарбонатної добавки на терміни тужавлення.

На наступному етапі досліджували вплив нанокарбонатної добавки на здатність цементної системи до самоочищення та проводили оцінку висолоутворення отриманих кольорових цементів. Додавання нанокарбонатної добавки, хоч і не забезпечує виконання вимог, що висувуються до фотокаталітично активних в'язучих, але збільшує здатність системи до самоочищення. Введення нанокарбонатної добавки до цементних систем на основі фотокаталітично активних в'язучих дозволяє зменшити кількість напівпровідникового фотокаталізатора вдвічі. Ущільнення цементної системи лише нанокарбонатною добавкою не здатне зупинити процес висолоутворення. Оптимальним рішенням є використання в складі кольорового цементу комплексної добавки, що містить 4,5 % нанокарбонатної добавки та 15 % мікрокремнему.

Проектування складу сухих будівельних сумішей зводиться до визначення оптимального зернового складу дрібного заповнювача (для оптимізації мезорівня), вмісту наповнювача у вигляді мармурового борошна (для оптимізації мікрорівня) та цементно-піщаного відношення. Підбір зернового складу дрібного заповнювача проводиться методом чергових наближень (ітерації), який полягає в почерговому змішуванні крупних та дрібних фракцій піску в різних пропорціях та визначенні кожен раз насипної густини. Найбільша густина суміші досягається при використанні фракцій (1...2 мм) та (0,1...0,4 мм) у кількості 65% та 35%, відповідно. Оптимізація складу модифікованого будівельного розчину було проведено з застосуванням двохфакторного методу планування експерименту, в

якому як змінні фактори обрано вміст мармурового борошна (5...15мас.%) від маси дрібного заповнювача та цементно-піщане відношення (1:2,5...1:3,5). Функцією відгуку обрано міцність розчину при стиску у віці 3, 7 та 28 діб.

На основі проведеного двофакторного експерименту та аналізу побудованих поверхонь відгуку, запроектовано склад декоративного розчину із застосуванням двофакторного методу планування експерименту та встановлено, що використання мармурового борошна у кількості 15% від маси дрібного заповнювача забезпечує ефект «щільної упаковки» зерен, що дозволяє досягти міцності на 28-му добу на рівні 9,6 МПа. Це значно перевищує стандартні вимоги до декоративних розчинів. Окрім того, високий вміст мармурового борошна надає розчину необхідної пластичності, що критично важливо для нанесення тонким шаром. Це мінімізує водопоглинання основи та запобігає появі усадкових тріщин. Прийняте цементно-піщане відношення 1:3,0 гарантує високу ранню міцність на 3-тю добу (3,33 МПа).

Наукова новизна:

- досліджені процеси структуроутворення цементної матриці не тільки на мезо-, але й на мікро- та нанорівнях, в результаті чого синтезуються низькоосновні волокнисті гідросилікатні фази, що гарантує стабільність фізико-механічних характеристик цементного каменю у часі;
- з використанням комплексу фізико-хімічних методів дослідження проаналізовано зміну фазового складу новоутворень цементного каменю при введенні нанокарбонатних добавок та показано, що при використанні нанокарбонатної дисперсії має місце не тільки проявлення нуклеаційного ефекту, але й збільшується швидкість зв'язування вільного портландиту в низькосновні гідросилікати кальцію. Також вірогідно утворення гідросилікатних фаз, подібних до скоутиту, що зв'язують карбонатну складову в термодинамічно стабільні сполуки;
- визначено синергетичний вплив сумісної дії нанокарбонатної добавки разом з полікарбоксилатною пластифікуючою добавкою внаслідок чого виникає можливість стабілізації новоутворень та фізико-механічних характеристик

штучного каменю, що дозволяє ефективно використовувати білі цементи з підвищеним вмістом C_3A як основи для отримання оздоблювальних матеріалів;

- показано, що введення до складу пігментованої цементної системи нанокарбонатної добавки у вигляді суспензії, сприяє формуванню більш досконалої щільної та однорідної структури цементного каменю та забезпечує набір міцності цементних систем у часі, нівелюючи негативний вплив пігментів на міцнісні характеристики;

- експериментально доведено, що при введенні до фотокаталітично активних в'язучих систем нанокарбонатної добавки, остання дозволяє вдвічі зменшити кількість напівпровідникового фотокаталізатора;

- показані шляхи боротьби з висолоутворенням за рахунок введення кремнеземистої складової, що сприяє збільшенню кількості гелевидної фази у вигляді низькоосновних гідросилікатів, які підвищують стійкість до висолоутворення.

Практична цінність роботи підтверджена впровадженнями її результатів в умовах МП «Силікат» де здійснено випуск дослідної партії сухої будівельної суміші для декоративного штукатурення та виконано впровадження шляхом оздоблення фасаду складської будівлі. Здійснено огляд декоративного штукатурного шару через 10 місяців після нанесення та підтверджено його задовільний стан (акт про впровадження №1607/25-1, від 16.07.2025 р.)

Ключові слова: цементні системи, білий цемент, декоративний цемент, кольоровий цемент, полікарбоксилатні пластифікатори, меламінформальдегідні пластифікатори, неорганічні пігменти, наномодифікація, наномодифіковані системи, мінерал C_3A , нано- $CaCO_3$, нанокарбонатні добавки, технологічні властивості, терміни тужавіння, водопотреба, міцність, мікроструктура, процеси гідратації, процеси структуроутворення, вуглецеві нанотрубки, епітексіальні нарощування, декоративні розчини, оздоблювальні розчини

ABSTRACT

Tereshchenko L.V. Nano-modified colored cements and finishing construction mortars based on them with improved operational characteristics – Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 192 – Building and Civil Engineering. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2026.

The dissertation research is devoted to the development and optimization of the compositions of finishing construction mortars based on colored cements modified with nanocarbonate additives, which will be distinguished by improved physical-mechanical and special characteristics and can be used for manufacturing architectural structures of the required color and a surface capable of self-cleaning. Achieving the set goal involves fulfilling the following tasks:

- to establish the mechanism of the influence of polycarboxylate and nanocarbonate additives on pigmented cement systems by investigating the structure-formation processes of artificial stone, as well as the physical-chemical regularities of the hydration processes of modified systems at both early and late stages of hardening;
- to consider the criteria for selecting pigments based on the nature of the interaction of the "mineral pigment – white cement – complex additive" system, to evaluate the properties of the nano-modified pigmented cement system (uniformity of coloration of hydration products, color intensity, lightfastness, weather resistance), the influence on setting times and uniformity of volume change, and the prevention of strength reduction during the introduction of pigments;
- to select the optimal ratio of polycarboxylate and nanocarbonate additives and mineral-based pigments during the hydration of colored cement to obtain finishing mortars with improved operational characteristics;
- to investigate the possibility of increasing the density of the cement stone structure, carbonation resistance, and color stability of the decorative mortar over time;

- to optimize the compositions of mortars based on colored modified cements and determine the technological and physical-mechanical characteristics of the developed systems;
- to investigate the possibility of obtaining finishing mortars capable of self-cleaning.

The relevance of the research lies in the fact that today one of the main directions of technological development in construction is the use of structures and products to which increased aesthetic requirements are imposed, including the color design of buildings. At the same time, the decorative materials used must meet high requirements for strength and color stability. When using concrete based on colored cements, there are certain limitations in their application due to the known disadvantages of such systems (strength loss of such concrete over time, color instability, efflorescence, increased shrinkage). Investigating the properties and studying the characteristics of modified colored cements and ensuring their high operational properties determine the relevance of this work.

The analysis of information sources in the field of obtaining finishing construction mortars based on modified colored cements allows us to hypothesize the possibility of producing materials with improved performance characteristics for architectural decoration, distinguished by long-term color stability, self-cleaning ability, high frost resistance, and long-term strength stability. This is achieved by modifying their structure with nanocarbonate additives that work in synergy with polycarboxylate superplasticizers, ensuring the directed synthesis of low-basic hydrosilicates, and at the meso-level - by regulating the particle size distribution of fine aggregates to reduce void content, thereby increasing the density of the resulting mortars.

At the first stage of the research, a comparison was made of the strength development of cement samples based on white cement from different manufacturers with varying contents of C_3A and C_3S minerals without additives. All cements showed stable strength gain over time, with the cement containing low C_3A levels exhibiting higher values than those with high levels. It should be noted that cheaper cements with high C_3A content currently dominate the construction market, as producing white cement

with a reduced content of this mineral requires additional technological measures that significantly increase production costs. Considering the specifics of the construction market, cements with both minimal and maximal C_3A content were selected for the study.

The kinetics of strength gain for cement compositions based on white Portland cement with low C_3A content, modified with polycarboxylate superplasticizers and obtained at the same cement paste consistency, is presented on the slide.

The effectiveness of polycarboxylate superplasticizers was confirmed when added to white Portland cement with low C_3A levels. However, at early stages of hardening (3 days), the highest strength of the cement stone is achieved using superplasticizers with long hydrophobic side chains and high or medium charge density, in quantities of 1...1.5% by weight of cement. At later stages of hardening, the Melflux 5581 F superplasticizer at 1.5% dosage increases strength 1.5 times compared to control samples.

When adding superplasticizer in amounts up to 1% to white cement with a high C_3A content, a strength decrease of up to 15% is observed at the age of 28 days. This is explained by the fact that when the plasticizing additive is introduced to cement with high C_3A content, it is adsorbed on its surface, and the remaining amount is insufficient to disperse the silicate phases and reduce the viscosity of the system. There is no strength decrease when a larger amount of plasticizing additive is added.

The introduction of a plasticizing additive into a cement system with a low C_3A content is more effective even at lower dosages.

The modification of cement systems with nanocarbonate additives promotes the stabilization of the phase composition of newly formed products and ensures the durability of the resulting cement stone, as it alters the composition of the new formations towards the synthesis of more thermodynamically stable compounds, thereby neutralizing strength loss in white cements with high C_3A content. This is confirmed by microstructural studies of the cement stone, where pore closure is observed upon the addition of nanocarbonate additives. The possibility of such a process is also supported by the crystallochemical similarity between the nanocarbonate additive, carbonate ettringite, and tobermorite, as well as the possibility of their intergrowth along crystallographic planes passing through the CaO layer.

In the next stage of research, the role of individual C_3A and C_3S minerals in the synthesis of artificial stone strength based on modified white Portland cement was studied using synthesized mineral suspensions. Changes in the composition during early hydration stages were recorded using an optical microscope at 400x magnification. Immediately after mixing the composition based on the C_3A mineral, plasticizer, and nanocarbonate additive, the mixture appears homogeneous. After 10 minutes of hydration, structure formation begins, and the formation of crystallization centers of new products is observed. After 2 and 3 hours, the number of these centers increases. According to microscopy data after 7 days of hardening, the phase composition of hydration products is represented mainly by an amorphized globular mass; only at 10,000x magnification can some new formations be identified as hexagonal plates of calcium hydroaluminates and hydrocarboaluminates. This is also confirmed by X-ray phase analysis results. We can assume that nanocarbonate additives act as crystallochemical substrates, accelerating the crystallization of hydrate products similar to carbonate ettringite.

Analogous studies were conducted with the C_3S mineral. Analysis of the data reveals an increase in the number of growth tubercles (due to the onset of C_3S hydration). It was noted that when the mineral hydrates in the presence of only a plasticizer, there is some inhibition of the structure formation process. The hydration of C_3S in the presence of a nanocarbonate additive is accelerated due to the shortening of the induction period. This occurs because of the crystallochemical similarity between hydrosilicate compounds and the nanocarbonate additive, which acts as a "substrate" for calcium hydrosilicate crystallization, promoting a nucleation effect and providing additional crystallization centers. It should be noted that with the introduction of the nanocarbonate additive, the structure is denser compared to the structure without it. The change in the C_3S hydration mechanism is confirmed by X-ray phase analysis, where diffraction reflections of not only portlandite but also tobermorite and scawtite were identified, indicating a chemical interaction between the hydrosilicate phase and the carbonate component.

The next stage examined the strength of white cement samples with different plasticizers (1.5% dosage) and inorganic pigments (green, blue, red) introduced at 3, 6,

and 9% by weight of cement. Strength decreases with increasing pigment content, with the most significant reduction (up to 20%) observed in red-pigmented samples. Microstructure images of the cement stone reveal a developed pore structure; although the pore nature is similar across pigments, red pigment leads to larger pores, explaining the strength decline. To confirm the influence of nanocarbonate additives, three cement stone samples were studied at 90 days. The structure without pigment is homogeneous, while the addition of red pigment causes microcracks. With the nanocarbonate additive, a highly homogeneous structure is observed, with the healing of cracks and pores caused by the pigment. Furthermore, tests on ring-shaped cement stone specimens showed that adding pigment to a plasticized system reduces the time to crack appearance by 0.5 hours, whereas the nanocarbonate additive increases this time proportionally to its dosage.

Regarding water demand, increasing pigment content increases water requirements for white Portland cement systems, although the plasticizer dampens this effect. The nanocarbonate additive reduces water demand by an average of 5%, making the cement paste consistency more elastic. The influence of pigments on setting times varies by color and dosage; generally, pigments (except blue) shorten the initial set time of unplasticized cement. The introduction of a plasticizer increases the initial set time of non-pigmented cement by 24% and the final set time by 113%. Adding pigments to plasticized systems further increases both initial and final set times. Increasing the nanocarbonate additive dosage proportionally shortens both initial and final setting times, confirmed by temperature monitoring during the first 20 hours of hydration.

Finally, the nanocarbonate additive was shown to increase the self-cleaning capacity of the cement system. While it does not fully meet requirements for photocatalytically active binders, it allows the amount of semiconductor photocatalyst to be halved. Since nanocarbonate additives alone cannot stop efflorescence, the optimal solution for colored cement is a complex additive containing 4.5% nanocarbonate additive and 15% microsilica. The design of dry building mixtures involves optimizing the grain size of fine aggregate (for meso-level optimization) and the marble dust content (for micro-level optimization). The optimal density was achieved using a 65:35 ratio of (1–2 mm) and (0.1–0.4 mm) fractions. Using 15% marble dust by weight of fine aggregate

ensures a "dense packing" effect, reaching a 28-day strength of 9.6 MPa, providing the plasticity necessary for thin-layer application, and minimizing water absorption and shrinkage cracking, while a 1:3.0 cement-sand ratio ensures high early strength (3.33 MPa at 3 days).

Scientific novelty:

- the processes of structure formation of the cement matrix were investigated not only at the meso-, but also at the micro- and nano-levels, resulting in the synthesis of low-basic fibrous hydrosilicate phases, which guarantees the long-term stability of the physical and mechanical characteristics of the cement stone;
- using a complex of physical-chemical research methods, the change in the phase composition of the cement stone's new formations upon the introduction of nanocarbonate additives was analyzed; it was shown that the use of a nanocarbonate dispersion not only exhibits a nucleation effect but also increases the rate of binding of free portlandite into low-basic calcium hydrosilicates. The formation of hydrosilicate phases similar to scawtite, which bind the carbonate component into thermodynamically stable compounds, is also probable;
- the synergistic effect of the joint action of a nanocarbonate additive and a polycarboxylate plasticizing additive was determined, which results in the possibility of stabilizing the new formations and the physical-mechanical characteristics of the artificial stone, allowing for the effective use of white cements with an increased C_3A content as a base for obtaining finishing materials;
- it was shown that the introduction of a nanocarbonate additive in the form of a suspension into the composition of a pigmented cement system contributes to the formation of a more perfect, dense, and homogeneous structure of the cement stone and ensures strength gain of cement systems over time, neutralizing the negative impact of pigments on strength characteristics;
- it was experimentally proven that when a nanocarbonate additive is introduced into photocatalytically active binder systems, it allows for reducing the amount of the semiconductor photocatalyst by half;

– ways to combat efflorescence by introducing a silica component were shown, which contributes to an increase in the amount of gel-like phase in the form of low-basic hydrosilicates, which increase resistance to efflorescence.

Practical value:

The practical value of the work is confirmed by the implementation of its results at the MP "Silicat" enterprise, where an experimental batch of dry building mixture for decorative plastering was produced and implemented by finishing the facade of a warehouse building. An inspection of the decorative plaster layer was carried out 10 months after application, and its satisfactory condition was confirmed (Implementation Act No. 1607/25-1, dated July 16, 2025).

Keywords: cement systems, white cement, decorative cement, colored cement, polycarboxylate plasticizers, melamine-formaldehyde plasticizers, inorganic pigments, nano-modification, nano-modified systems, C_3A mineral, nano- $CaCO_3$, nanocarbonate additives, technological properties, setting times, water demand, strength, microstructure, hydration processes, structure formation processes, carbon nanotubes, epitaxial growth, decorative mortars, finishing mortars.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових періодичних виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

1. Пушкарьова К.К., Терещенко Л.В. Оцінка впливу неорганічних пігментів на технологічні властивості декоративних цементів. *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Будівельне виробництво – Київ, ДП «НДІБВ», 2023. №76. – С. 37-42. <https://doi.org/10.36750/2524-2555.76.37-42> Особистий внесок здобувача: встановлено, що введення неорганічних пігментів до складу цементних систем чинить вплив на технологічні властивості цементів, що призводить і до погіршення їх міцнісних характеристик.*

2. Пушкарьова К.К., Терещенко Л.В. Дослідження сумісного впливу неорганічних пігментів та нанокарбонатних добавок на синтез міцності декоративних цементів. *Збірник наукових праць «Ресурсоекономні матеріали,*

конструкції, будівлі та споруди». – Рівне: НУВГП, 2024. Вип. 45. – С. 68-75. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i45.08> *Особистий внесок здобувача: досліджено сумісного впливу неорганічних пігментів та нанокарбонатних добавок на синтез міцності декоративних цементів.*

3. Пушкарьова К.К., Терещенко Л.В. Фізико-хімічні особливості процесів гідратації модифікованого кольорового портландцементу. *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Будівельне виробництво – Київ, ДП «НДІБВ», 2024. №78. – С. 51-56. <https://doi.org/10.36750/2524-2555.78.51-56> Особистий внесок здобувачки: показано можливість отримати стійку до появи мікротріщин цементну систему з меншою пористістю шляхом введення нанокарбонатних добавок.*

4. Пушкарьова К.К., Терещенко Л.В. Наномодифікація цементних систем як ефективний спосіб підвищення якості будівельних розчинів спеціального призначення. *Збірник наукових праць «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди». – Рівне: НУВГП, 2025. Вип. 47. – С. 202-210. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i47.23> Особистий внесок здобувача: встановлено, що додаткове введення до складу розчинових сумішей мікрокремнезему та фракціонованого кварцового піску впливає на регулювання процесів на мікро- та мезорівні, забезпечуючи не тільки стабільний набір міцності в часі, підвищення щільності каменю, але й відсутність процесів висолоутворення, що є особливо важливим для декоративних розчинів.*

Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus

1. Pushkarova, K., Kushnierova, L., & Tereshchenko, L. Devising approaches to adjusting a strength gain by modified white cements with different C_3A content. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2024, 6 (12(132), 44–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.317201> *Особистий внесок здобувачки: встановлено, що введення комплексної нанокарбонатної та пластифікуючої добавки забезпечує стабілізацію новоутворень, внаслідок чого, покращуються міцнісні показники цементних систем на основі білих цементів з підвищеним вмістом C_3A .*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації: тези доповідей на конференціях:

1. К.К. Пушкарьова, Л.В. Терещенко. Вплив нанокарбонатних добавок на властивості кольорових цементів, «Build-Master-Class-2022» *Proceedings of International Scientific – Practical Conference of Young Scientists* (30.11-02.12.2022 In Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine), Pp. 141-142 https://drive.google.com/file/d/1bdS399kcf280b39UYVG3xFQlbPHy5Ht_/view

Особистий внесок здобувача: показано, що при введенні пігменту до складу цементної системи, збільшується її пористість.

2. Пушкарьова К.К., Терещенко Л.В. Цементні системи, здатні до самоочищення. *Актуальні питання науки, освіти та технологій в умовах сучасних викликів: збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції* (Кременчук, 9 травня 2023 р.): у 2 ч. Кременчук: ЦФЕНД, 2023. Ч. 2. С. 64 <https://www.economics.in.ua/2023/05/9-1.html> *Особистий внесок здобувача: досліджено можливості оптимізації складу цементних систем, здатних до самоочищення*

3. Pushkarova K., Tereshchenko L. Photoactivation as one of self-cleaning processes in cement systems. *Proceedings of XI international scientific and practical conference*, July 13-15, London 2023, p. 81 <https://sci-conf.com.ua/xi-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-and-innovation-of-modern-world-13-15-07-2023-london-velikobritaniya-arhiv/> *Особистий внесок здобувача: досліджено можливість отримати цементні системи, здатні до самоочищення за рахунок ущільнення системи шляхом введення нанодобавок.*

4. К.К. Пушкарьова, Л.В. Терещенко. Процеси самоочищення та фотоактивації в цементних системах, «Build-Master-Class-2023» *Proceedings of International Scientific – Practical Conference of Young Scientists* (29.11-01.12.2023 In Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine), Pp. 195-196 https://drive.google.com/file/d/1UTz7ErwYUJnzZZ_N1TxB1cuqTCIR_mJc/view

Особистий внесок здобувача: досліджено можливість використання в цементних системах наноматеріалів, для отримання будівельних матеріалів, здатних до

самоочищення завдяки формуванню електрогетерогенних контактів, що сприяє отриманню цементних систем з покращеними експлуатаційними властивостями.

5. К.К. Пушкарьова, М.О. Кочевих, Л.О. Кушнерова, Л.В. Терещенко Вплив мінералогічного складу на процеси структуроутворення наномодифікованого білого портландцементу. *Тези доповідей 10-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» 20-22 листопада 2024 року, м. Харків* <https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2024/09/tezi-transbud-2024-1.pdf> *Особистий внесок здобувача: показано можливість регулювання міцнісних характеристик цементних систем на основі білих цементів з підвищеним вмістом C_3A та зниженим вмістом C_3S .*

Статті у наукових періодичних виданнях, не включених до переліку наукових фахових видань України:

1. Пушкарьова К.К., Терещенко Л.В. Оцінка впливу нанокарбонатних добавок на здатність цементних систем до самоочищення. Будівельні матеріали та виробы, № 1-2 (103)- 2023.- Київ.- с. 26-29 https://www.researchgate.net/publication/376494259_Ocenka_vliania_nanokarbonatnyh_dobavok_na_sposobnost_cementnyh_sistem_k_samoocistke. *Особистий внесок здобувача: проаналізовано процеси самоочищення цементних систем, в тому числі й процеси фотокаталізу, що виникають при потраплянні світла на поверхні матеріалів, що містять фотокаталізатори.*