

АНОТАЦІЯ

Гоголь М.М. Фотокаталітичні композиційні в'язучі та наномодифіковані оздоблювальні розчини на їх основі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192. Будівництво та цивільна інженерія (19 – Архітектура та будівництво). – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню завдання одержання наномодифікованих оздоблювальних розчинів на основі розроблених фотокаталітичних композиційних в'язучих, які отримуються шляхом змішування композиційного портландцементу СЕМ ІІ/В-М (S-P-L) 32,5R з мінеральними добавками різних типів та наномодифікаторами.

У розділі 1 «Стан питання та теоретичні передумови досліджень» розглянуто та проаналізовано сучасні тенденції в екологічному будівництві згідно Європейського Зеленого Курсу (Green Deal), серед пріоритетних напрямків якого важливе місце відводиться забезпеченню екологічної безпеки відповідно до новітньої стратегії Національної безпеки України. Показано, що в умовах сучасних викликів для всього людства у вигляді пандемій вірусу, перенаселення та погіршення екології, розробка самоочисних покриттів для будівель та споруд є пріоритеною темою дослідження багатьох провідних дослідників у будівельній галузі. Актуальність розроблення фотокаталітичних матеріалів, які зможуть не лише очищати поверхню, але й знищувати забрудники в повітрі, впливаючи на екологічний стан середовища, витікає з необхідності вирішення соціальних, економічних та екологічних завдань та вирішується за рахунок створення цементуючих матеріалів нового покоління, що зможуть одночасно набувати властивостей різного характеру.

Зроблено аналітичний огляд літературних джерел і показано, що розроблення поліфункціональних структурних матеріалів із покращеною фотокаталітичною діяльністю викликає значні технологічні та конструктивні проблеми, пов'язані з створенням гібридних фотокаталізаторів, які активуються

видимим світлом, а також підвищенням ефективності фотокаталізаторів для поглинання забруднюючих речовин повітря, збереження довгострокової фотокаталітичної активності та мінімізацією утворення шкідливих побічних продуктів під час фотохімічної дії реакції. Відзначено, що нанотехнологічний підхід в поєднанні з багатофункціональними цементуючими матеріалами дозволяє отримати нові вдосконалені інженерні конструкційні та опоряджувальні матеріали підвищеної якості та довговічності з оновленням цивільної інфраструктури.

Аналіз даних у області будівельного матеріалознавства, а також відомих закономірностей формування структури штучного каменю із заданими властивостями дозволяє висунути робочу гіпотезу про доцільність розроблення принципово нової концепції створення фотокаталітичних багатокомпонентних цементів та модифікованих будівельних розчинів на їх основі, що дозволяє проводити опоряджувальні, ремонтні, реставраційні та інженерно-технічні роботи згідно сучасних тенденцій у будівництві. Дана концепція базується на розкритті закономірностей структуроутворення модифікованих будівельних розчинів на основі фотокаталітичних багатокомпонентних цементів за рахунок поглибленого вивчення взаємодії нанорозмірних модифікаторів різного призначення з урахуванням взаємозв'язку мікро- та мезоструктури модифікованих будівельних розчинів, їх технологічних і фізико-механічних властивостей.

У розділі 2 «Характеристика вихідних матеріалів та методи досліджень» описано методіку проведення експериментальних досліджень та наведено характеристику використаних матеріалів. Наведено загальну послідовність проведення досліджень у вигляді блок-схеми. Представлено фізико-механічні властивості, мінералогічний та гранулометричний склади портландцементів СЕМ I 42,5R та СЕМ II/B-M (S-P-L) 32,5R, а також криві розсіювання кварцового піску Велико-Глібовицького родовища. Наведено характеристику та хімічний склад мінеральних добавок – вапняку Дубівецького родовища та тонкодисперсного каоліну. Надано характеристику модифікаторів: мікро- TiO_2 (Бельгія), нано- TiO_2 P25 (Німеччина) та нанокompозиту $\text{TiO}_2/\text{S,C}$, допованого

сіркою та вуглецем (Україна). Представлено технічні властивості, типи структур та розміри частинок наномодифікаторів. Також наведено характеристику добавок: фунгициду тіосульфатного типу ETS (Україна), суперпластифікатора полікарбоксилатного типу Master Glenium Ace 430, повітровтягувальної добавки Master Air 81 та прискорювача тверднення типу X-SEED 100 (BASF, Німеччина). Фізико-механічні випробування в'язучих та будівельних розчинів проводили у відповідності з чинними ДСТУ, ISO та EN. Описана характеристика основних приладів, за допомогою яких було проведено фізико-хімічні дослідження, а саме: ультразвукова ванна, діодні лазери різної інтенсивності, світловий спектрометр, раманівський спектрометр, тензіометр, лазерний аналізатор та мікроскопи атомно-силового, скануючого та оптичного типів.

У розділі 3 «Дослідження фотокаталітичних композиційних в'язучих та оздоблювальних розчинів» досліджено вплив дисперсності компонентів на властивості композиційних в'язучих. Отримано результати гранулометричного складу композиційного портландцементу та нанодобавок TiO_2 ; проведена комплексна оцінка розподілу за розмірами їх частинок як за об'ємом, так і за питомою поверхнею. Встановлено, що нано- TiO_2 P25 та нанокompat TiO₂/S,C мають коефіцієнти поверхневої активності відповідно 14400 та 20000 мкм⁻¹·об. %, тобто характеризуються екстремально високою поверхневою активністю, яка визначає фотокаталітичні властивості цементних розчинів. Визначено коефіцієнти відбиття світла основних компонентів композиційних цементів, згідно яких нано- TiO_2 P25 володіє найвищим показником коефіцієнта відбиття на рівні 98%. Методом математичного планування експерименту проведено оптимізацію складу мультикомпонентного декоративного цементу. Згідно графічної інтерпретації отриманих залежностей встановлено, що введення добавок 3,0 мас.% каоліну та 0,4 мас.% мікро- TiO_2 забезпечує підвищені показники ранньої та марочної міцностей мультикомпонентних цементів при підвищеній рухливості (РК=140-150 мм).

Результати досліджень фізико-механічних властивостей фотокаталітичних композиційних портландцементів свідчать, що через 2; 7 та 28 діб міцність на

стиск в'язучого з добавками 2,0 мас. % нанокompозиту $\text{TiO}_2/\text{S,C}$ та 0,5 мас. % суперпластифікатора типу Glenium Ace 430 становить відповідно 43,2, 62,3 та 79,0 МПа і порівняно з бездобавочним складом збільшується на 72,8; 55,7 та 31,6%.

Досліджено вплив наномодифікаторів на фізико-механічні та структурні властивості гіпсових в'язучих. Міцність на стиск при модифікації гіпсового в'язучого з добавкою 2,0 мас. % нанокompозиту $\text{TiO}_2/\text{S,C}$ збільшується через 28 діб на 54% порівняно з бездобавочним зразком. При дослідженні макроструктури модифікованого гіпсового каменю встановлено, що в порах знаходяться агломерати допованого нанокompозиту, які ущільнюють мікроструктуру, заповнюючи пори, що сприяє підвищенню міцності матеріалу. При аналізі раманівських спектрів гіпсового каменю з добавкою 2,0 мас. % $\text{TiO}_2/\text{S,C}$, встановлено, що модифікований зразок характеризується наявністю анатазного діоксиду титану, для якого характерні смуги при 148 см^{-1} та 638 см^{-1} .

У розділі 4 «Розроблення наномодифікованих оздоблювальних розчинів на основі фотокаталітичних композиційних в'язучих» досліджено вплив наномодифікаторів TiO_2 на фізико-механічні властивості фотокаталітичного оздоблювального розчину. Так, міцність розчину на стиск з вмістом 2,0 мас. % $\text{TiO}_2/\text{S,C}$ через 7; 28 та 90 діб тверднення становить 16,1; 23,9 МПа і 25,6 відповідно, що на 67,7%, 75,0 % та 76,5% вище міцностей розчину контрольного складу. Це свідчить про те, що частинки нано- TiO_2 , дисперговані за допомогою ультразвуку, сприяють ущільненню та покращують механічні характеристики оздоблювальних розчинів.

Наведено характеристику самоочисних властивостей розчинів на основі фотокаталітичного композиційного в'язучого. Отримані результати тензіометрії свідчать, що найбільший кут контакту води з поверхнею ($120,8^\circ$) досягається на поверхні зразка, модифікованого 2,0 мас.% $\text{TiO}_2/\text{S,C}$, що свідчить про надання поверхні гідрофобних властивостей. Виявлено, що модифікатори TiO_2 P25 та $\text{TiO}_2/\text{S,C}$ значно знижують вільну енергію поверхні. Так, для цементного розчину, модифікованого 2,0 мас. % $\text{TiO}_2/\text{S,C}$, показник вільної енергії поверхні складає $40,1\text{ мДж/м}^2$, тоді як для контрольного зразка - $64,1\text{ мДж/м}^2$. Це свідчить,

що при використанні нанокompозиту на основі модифікованого діоксиду титану поверхня цементного розчину набуває гідрофобних властивостей, що сприяє процесам самоочищення.

Дослідженнями фотокаталітичності поверхонь оздоблювальних розчинів встановлено, що у видимому спектрі світла зразок з 2,0 мас. % $\text{TiO}_2/\text{S,C}$ проявляє найвищий рівень фотокаталітичної активності (87 %), тоді як для зразків з наномодифікатором TiO_2 P25 цей показник складає всього 44 %. Це свідчить про властивість нанокompозиту $\text{TiO}_2/\text{S,C}$ працювати саме у видимому спектрі світла. Встановлено, що зразки з нанокompозитом $\text{TiO}_2/\text{S,C}$ здатні ініціювати реакції фотокаталізу саме у видимому спектрі світла, генеруючи вільні радикали і, тим самим, знешкоджувати забруднювачі на поверхні без додаткового ультрафіолетового опромінення.

Проведеними дослідженнями фунгіцидних властивостей розроблених оздоблювальних розчинів визначено, що застосування комплексної добавки 2,0 мас.% нанокompозиту $\text{TiO}_2/\text{S,C}$ та 0,05 мас.% антимікотичного біоциду ETS здатне забезпечувати резистивність поверхні до ураження колоніями гриба *Aspergillus niger* у приміщеннях з підвищеною вологістю та відсутністю денного світла. При цьому комплексна добавка забезпечує утворення на поверхні зразка макропор, які збільшують питому площу поверхні штукатурки, за рахунок чого більша кількість молекул діоксиду титану може вступати в реакцію фотокаталізу. Така зміна мікроструктури поверхні оздоблювальних розчинів сприяє підвищенню бактерицидної дії комплексної добавки діоксиду титану та тіосульфону.

З метою оптимізації складу оздоблювального розчину проведено математичне моделювання в заданому інтервалі змін кількісних співвідношень компонентів. Відповідно до отриманих залежностей встановлено, що для званої марки будівельного розчину M50 оптимальний вміст композиційного портландцементу становить 160 кг на 1 м³ піску, а тонкодисперсного каоліну – 50 кг на 1 м³ піску; при цьому створюється можливість економії портландцементу до 20 % і отримання легковкладальної розчинової суміші з необхідною міцністю. Досліджено показники якості наномодифікованого

оздоблювального розчину з фотокаталітичними, самоочисними та біоцидними властивостями.

У розділі 5 «Промислове впровадження наномодифікованих оздоблювальних розчинів» представлено результати дослідно-промислової апробації фотокаталітичних композиційних в'язучих та наномодифікованих оздоблювальних розчинів на їх основі. Розроблена технологічна схема виготовлення композиційного в'язучого з фотокаталітичними властивостями та визначено показники якості сумішей для оздоблення відповідно до ДСТУ Б В.2.7-126:2011. Розроблено поліфункціональні нанорідини з фотокаталітичними властивостями для застосування на існуючих поверхнях та фотокаталітичні фарби для декоративного оздоблення фасадів, а також технічні умови ТУ У 23.5-02071010-179:2020 для виготовлення наномодифікованих фотокаталітичних оздоблювальних матеріалів. Наведені будівельно-технічні властивості наномодифікованих фотокаталітичних оздоблювальних розчинів, виготовлених на ТзОВ «Капрол Україна». Показано, що фотокаталітичні матеріали можна застосовувати не лише для фасадних покриттів, а й для інтер'єрного оздоблення. Впровадження гібридного нанокompозиту $\text{TiO}_2/\text{S,C}$ з фотокаталітичними властивостями у видимому діапазоні світла у будівельну сферу відкриває широкі можливості для виготовлення самодезинфікуючих поверхонь, переважно для громадських місць, які потребують високого рівня гігієни, наприклад, у лікарнях, школах та ін. Представлена техніко-економічна та екологічна ефективність фотокаталітичних композиційних в'язучих та наномодифікованих штукатурних розчинів для опоряджувальних робіт. Проведено оздоблення фасаду площею 762 м² та встановлено, що річний економічний ефект складає 30,78 тис. грн в цінах 2021 р.

Результати експериментальних досліджень і промислового впровадження використано в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» при викладанні дисциплін «Інноваційні технології виготовлення сучасних будівельних матеріалів і виробів» та «Новітні технології в будівництві» для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Ключові слова: екологічне будівництво, фотокаталітичні композиційні в'язучі, наномодифікатори, допований нанодіоксид титану, оздоблювальні розчини, вільна енергія, біоцидні та гідрофобні властивості, самоочисні та самодезинфікуючі поверхні.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Kropyvnytska T., Sanytsky M., Kotiv R., Gogol M. Decorative plasters for finishing works // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Теорія і практика будівництва». 2014. № 18. С.101-104.

2. Кропивницька Т., Гоголь М., Прогонюк О., Мазурак О. Модифіковані оздоблювальні розчини з добавкою каоліну // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Теорія і практика будівництва». 2015. № 823. С.185-190.

3. Гоголь М. Показники енергоефективності мультикомфортних будинків // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Теорія і практика будівництва». – 2019. № 912. С.35-40.

4. Ілів В., Брайченко С., Гоголь М., Терлюжак Я. Шляхи підвищення ефективності будівельних матеріалів гідрофобізацією // Вісник ОДАБА. 2020. №.79. С. 85-91. (DOI: 10.31650/2415-377X-2020-79-85-91).

Статті у наукових періодичних виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз:

5. Hohol M., Lubenets V., Komarovska-Porokhnyavets O., Sanytsky M. Effect of nano-TiO₂ and ETS antifungal agent addition on the mechanical and biocidal properties of cement mortars /// EcoComfort 2020. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol 100. P.134-141 (DOI: 10.1007/978-3-030-57340-9_17).

6. Hohol, M., Sanytsky, M., Kropyvnytska, T., Barylyak, A., Bobitski, Y. (2020). The effect of sulfur- and carbon-codoped TiO₂ nanocomposite on the photocatalytic and mechanical properties of cement mortars // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 4, №6 (106) P. 6 -14.

Стаття у науковому періодичному виданні іншої держави:

7. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Hohol M., Kotiv R. Nanomodified cementing composites for self-cleaning building materials // Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym. 2020. Vol. 9. № 1/2020. P. 7-14.

Патент:

8. Патент на корисну модель 102599 Україна, МПК (2015.01) C04B 28/00. Будівельний розчин. Т.П. Кропивницька, М.А. Саницький, Р.М. Котів, М.В. Котів, І.М. Гев'юк, М.М. Гоголь – u201504020; опубл. 10.11.2015, Бюл. №21. 2 с.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Гоголь М., Кропивницька Т. Ефективні оздоблювальні будівельні розчинів з добавкою незбагаченого каоліну // Тези доповідей 6-ї міжнародної науково-технічної конференції. Полтава, 2014. С. 70–74.

10. Гоголь М.М. Синергетичний підхід при аналізі властивостей багатокомпонентних тіоцементів // Тези доповідей міжнародної конференції «Структурутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій». Одеса, 2018. С. 17–19.

11. Hohol M., Sikora P. Research of nanomodified multicomponent cements for self-cleaning plasters // Тези доповідей 2-ї міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні технології в архітектурі та дизайні». Харків, 2018. С. 117–118.

12. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Hohol M., John E., Stephan D., Sikora P. Effects of nanocrystalline calcium silicate hydrates and nanosilica on the hardening of Portland composite cements // Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Nanotechnology and nanomaterials 2019», Львів, 2019. С. 104.

13. Гоголь М., Котів М., Кіракевич І. Структурутворення цементних композитів з фотокаталітичними властивостями // Тези доповідей міжнародного семінару «Моделювання та оптимізація будівельних композитів». Одеса, 2019. С. 23–25.

14. Гоголь М., Коваль І. Самоочисні покриття для мультикомфортних будинків // Тези доповідей 2-ї міжнародної конференції «Фізичні процеси в енергетиці, екології та будівництві». Одеса, 2019. С. 39–40.

15. Гоголь М., Хабарова В. Вплив нанодисперсного діоксиду титану на міцність самоочисних декоративних штукатурок // Тези доповідей 2-ї науково-практичної конференції «Теорія і практика актуальних наукових досліджень». Дніпро, 2020. С. 106–109.

16. Гоголь М., Терлюжак Я. Вплив діоксиду титану на антигрибкові властивості декоративних штукатурок // Тези доповідей 3-ї міжнародної конференції «Фізичні процеси в енергетиці, екології та будівництві», Одеса, 2020. С. 14–15.

17. Hohol M., Sanytsky M., Kirakevych I. Photocatalytic self-cleaning decorative plasters // Тези доповідей міжнародного семінару «ISCESCE 2020». Львів, 2020. С. 13.

18. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Hohol M. Effect of TiO₂-based nano-liquids on the photocatalytic activity and mechanical properties of plasters // Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Nanotechnology and nanomaterials 2020». Львів, 2020. С. 206.

19. Гоголь М., Хабарова В. Екоцементи з біоцидними та самоочисними властивостями // Тези доповідей міжнародного молодіжного конгресу «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування». Львів, 2021. С. 41.

ABSTRACT

Hohol M. M. Photocatalytic composite binders and nanomodified finishing mortars on their basis. On rights of the manuscript.

PhD thesis (Doctor of Philosophy) in Engineering sciences by specialty 192. “Construction and civil engineering” (19 – Architecture and Construction). – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine. – Lviv, 2021.

The dissertation is devoted to solving the problem of obtaining nanomodified finishing mortars on the basis of developed photocatalytic composite binders, which

are obtained by mixing composite Portland cement CEM II / B-M (S-P-L) 32,5R with mineral additives of different types and nanomodifiers.

Section 1 "Status of the issue and theoretical prerequisites for research" considers and analyzes current trends in environmental construction according to the European Green Deal, among the priority areas of which an important place is given to environmental safety in accordance with the latest National Security Strategy of Ukraine. It is shown that in the context of modern challenges for all mankind in the form of pandemics of the virus, overpopulation and environmental degradation, the development of self-cleaning coatings for buildings and structures is a priority research topic of many leading researchers in the construction industry. The urgency of developing photocatalytic materials that can not only clean the surface but also destroy air pollutants, affecting the ecological state of the environment, stems from the need to solve social, economic and environmental problems by creating a new generation of cementing materials that can simultaneously acquire different properties, ie have multifunctional properties.

An analytical review of the literature and showed that the development of functional structural materials with improved photocatalytic activity causes technological and design problems associated with the creation of hybrid photocatalysts that are activated by visible light, as well as improving the efficiency of photocatalysts during long-term pollution and minimization of the formation of harmful by-products during the photochemical action of the reaction. It is noted that the nanotechnological approach in combination with multifunctional cementing materials allows to obtain new improved engineering construction and finishing materials of high quality and durability with the renewal of civil infrastructure.

Analysis of data in the field of building materials science, as well as known patterns of the structure formation of artificial stone with given properties allows to put forward a working hypothesis about the feasibility of development fundamentally new concept of creating photocatalytic multicomponent cements and modified mortars based on them, which will allow finishing, repair and restoration work in accordance with current trends in construction. This concept is based on the disclosure of patterns of structure formation of modified mortars based on photocatalytic multicomponent

cements due to in-depth study of the interaction of nanosized modifiers for various purposes, taking into account the relationship of micro- and mesostructure of modified mortars, their technological and physical-mechanical properties.

Section 2 "Characteristics of raw materials and research methods" describes the methodology of experimental research and describes the materials used. The general sequence of researches in the form of the block diagram is resulted. Physico-mechanical properties, mineralogical and granulometric structures of Portland cements CEM I 42.5R and CEM II / B-M (S-P-L) 32.5R, as well as scattering curves of quartz sand of Velyko-Hlibovytskiy deposit are presented. The characteristics and chemical composition of mineral additives - limestone of Dubivets deposit and fine kaolin are given. The characteristics of modifiers are given: micro-TiO₂ (Belgium), nano-TiO₂ P25 (Germany) and nanocomposite TiO₂/S,C, doped with sulfur and carbon (Ukraine).

The technical properties, types of structures and particle sizes of nanomodifiers are presented. The characteristics of additives are also given: thiosulfonate fungicide type ETS (Ukraine), superplasticizer polycarboxylate type Master Glenium Ace 430, air-repellent additive Master Air 81 and hardening accelerator type X-SEED 100 (BASF, Germany). Physico-mechanical tests of binders and mortars were performed in accordance with current DSTU, ISO and EN. The characteristics of the main devices used for physicochemical research are described, namely: ultrasonic bath, diode lasers of different intensity, light spectrometer, Raman spectrometer, tensiometer, laser analyzer and microscopes of atomic force, scanning and optical types.

Section 3 "Investigation of photocatalytic composite binders and finishing mortars" investigates the effect of component dispersion on the properties of composite binders. The results of particle size distribution of composite Portland cement and TiO₂ nanoadditives were obtained; a comprehensive assessment of the particle size distribution of both volume and specific surface area was performed. It is proved that nano-TiO₂ P25 and nanocomposite TiO₂/S,C, which have surface activity coefficients of 14400 and 20,000 μm⁻¹·vol.%, are characterized by extremely high surface activity, which determines the photocatalytic properties of cement mortars. The light reflection coefficients of the main components of composite cements were determined, according to which nano-TiO₂ P25 has the highest reflection coefficient at 98%. The composition

of multicomponent decorative cement was optimized by the method of mathematical planning of the experiment.

According to the obtained dependences, as well as their graphical interpretation, it was found that the introduction of 3,0 wt. % kaolin and 0,4 wt. % micro-TiO₂ provide increased performance of early and brand strength of multicomponent cements with increased workability (140-150 mm).

The results of studies of the physical and mechanical properties of photocatalytic composite Portland cements show that after 2; 7 and 28 days compressive strength of the binder with additives of 2,0 wt.% nanocomposite TiO₂/S,C and 0,5 wt.% of superplasticizer type Glenium Ace 430 is 43,2, 62,3 and 79,0 MPa, respectively, and compared to the non-additive sample increases by 72,8; 55,7 and 31,6%.

The influence of nanomodifiers on the physico-mechanical and structural properties of gypsum binders has been studied. Compressive strength in the modification of gypsum binder with the addition of 2,0 wt.% nanocomposite TiO₂/S,C increases after 28 days by 54% compared with the non-additive sample. The study of the macrostructure of the modified gypsum stone found that the pores contain agglomerates of doped nanocomposite, which seal the microstructure, filling the pores, which increases the strength of the material. In the analysis of the Raman spectra of the gypsum mortar of the non-additive sample and sample modified with 2,0 wt.% of TiO₂/S,C, it was found that the modified sample is characterized by the presence of anatase titanium dioxide, which is characterized by bands at 148 cm⁻¹ and 638 cm⁻¹.

Section 4 "Development of nanomodified finishing mortars based on photocatalytic composite binders" investigates the effect of TiO₂ nanomodifiers on the physical and mechanical properties of photocatalytic finishing mortar. Thus, the compressive strength of the mortar containing 2,0 wt.% TiO₂/ S,C through 7; 28 and 90 days of hardening is 16,1; 23,9 and 25,6 MPa, respectively, which is 67,7%, 75,0% and 76,5% higher than the strength of the mortar of the control composition. This indicates that nano-TiO₂ particles, pre-dispersed by ultrasound, promote compaction and improve the mechanical properties of finishing mortars.

The self-cleaning properties of mortars based on photocatalytic composite binder are described. The obtained tensiometry results showed that the largest contact angle

of water with the surface is achieved on the surface of the sample modified with 2,0 wt.% of $\text{TiO}_2/\text{S,C}$ (120.8°), which indicates the surface hydrophobic properties. When determining the free surface energy, it was found that the modifiers TiO_2 P25 and $\text{TiO}_2/\text{S,C}$ reduce the free surface energy. The lowest value of free surface energy was recorded for cement mortar modified with 2,0 wt.% of $\text{TiO}_2/\text{S,C}$ ($40,1 \text{ mJ/m}^2$), while the control sample is characterized by the highest value of free surface energy ($64,1 \text{ mJ/m}^2$). This indicates that when using a nanocomposite based on modified titanium dioxide, the surface of the cement mortar acquires hydrophobic properties, which promotes self-cleaning processes.

Studies of the photocatalytic activity of the surfaces of finishing mortars have shown that in the visible light spectrum a sample of 2,0 wt.% $\text{TiO}_2/\text{S,C}$ shows the highest level of photocatalytic activity (87%), while for samples with nanomodifier TiO_2 P25 this figure is only 44%. This indicates the property of the nanocomposite $\text{TiO}_2/\text{S,C}$ to work in the visible light spectrum. It was found that samples with $\text{TiO}_2/\text{S,C}$ nanocomposite are able to initiate photocatalysis reactions in the visible light spectrum, generating free radicals and, thus, neutralize contaminants on the surface without additional ultraviolet radiation.

Studies of the fungicidal properties of the developed finishing mortars determined that the use of a complex additive of 2,0 wt.% nanocomposite $\text{TiO}_2/\text{S,C}$ and 0,05 wt.% antifungal biocide ETS can provide surface resistance to damage by colonies of the fungus *Aspergillus niger* in rooms with high humidity and lack of daylight. The complex additive provides the formation on the surface of the sample macropores, which increase the specific surface area of the plaster, due to which more molecules of titanium dioxide can enter into a photocatalysis reaction. This change in the microstructure of the surface of the finishing mortars helps to increase the bactericidal action of the complex additive of titanium dioxide and thiosulfonate.

In order to optimize the composition of the finishing mortar, mathematical modeling was performed in a given interval of changes in the quantitative ratios of the components in the mortar. According to the obtained dependences it is established that for the delivered class of mortar M50. The optimal content of composite Portland cement is 160 kg per 1 m^3 of sand, and fine kaolin - 50 kg per 1 m^3 of sand; this creates

the possibility of saving Portland cement up to 20 % and obtaining a lightweight mortar mixture with the required strength. The quality indicators of nanomodified finishing mortar with photocatalytic, self-cleaning and biocidal properties have been studied.

Section 5 "Industrial implementation of nanomodified finishing mortars" provides experimental and industrial testing of photocatalytic composite binders and nanomodified finishing mortars based on them. The technological scheme of manufacturing a composite binder with photocatalytic properties is presented and the quality indicators of mixtures for finishing in accordance with DSTU B B.2.7-126: 2011 are given. The technological scheme of manufacturing a multifunctional nanoliquid with photocatalytic properties for use on existing surfaces and photocatalytic paints for decorative facades has been developed.

Technical conditions of TU U 23.5-02071010-179: 2020 for production of nanomodified photocatalytic finishing materials are developed. The construction and technical properties of nanomodified photocatalytic finishing mortars manufactured at "Kaprol Ukraine" LLC are given. It is shown that the developed photocatalytic materials can be used not only for facades, but also for interior decoration. The introduction of a hybrid nanocomposite $\text{TiO}_2/\text{S,C}$ with photocatalytic properties in the visible light range in the construction industry opens wide opportunities for the manufacture of self-disinfecting surfaces, mainly for public places that require a high level of hygiene, such as hospitals, schools and others. The technical, economic and ecological efficiency of photocatalytic composite binders and nanomodified plasters for finishing works are calculated. The facade was decorated with an area of 762 m² and it was found that the annual economic effect is 30780 UAH (in prices of 2021).

The results of experimental research and industrial implementation were used in the educational process of the National University "Lviv Polytechnic" in disciplines "Innovative technologies for the manufacture of modern building materials and products" and "Newest technologies in construction" for students of speciality 192 "Construction and Civil Engineering".

Keywords: ecological construction, photocatalytic composite binders, nanomodifiers, doped titanium nanodioxide, finishing mortars, free surface energy, biocidal and hydrophobic properties, self-cleaning and self-disinfecting surfaces.