

НАНОМОДИФІКАЦІЯ ЦЕМЕНТНИХ СИСТЕМ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ РОЗЧИНІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

NANOMODIFICATION OF CEMENT SYSTEMS AS AN EFFECTIVE WAY TO IMPROVE THE QUALITY OF SPECIAL-PURPOSE BUILDING MORTARS

Пушкарьова К.К., д.т.н, професор, ORCID 0000-0001-7640-8625, Кочевих М.О., к.т.н., доцент, ORCID 0000-0002-6201-3507, Марціх А.С., к.т.н., доцент, ORCID 0000-0003-3695-5450, Терещенко Л.В., аспірант, ORCID 0000-0001-9860-2226, (Київський національний університет будівництва і архітектури)

Pushkarova K., doctor of technical sciences, professor, ORCID 0000-0001-7640-8625, PhD in technical sciences, associate professor, ORCID 0000-0002-6201-3507, Martsich A., PhD in technical sciences, associate professor, ORCID 0000-0003-3695-5450, Tereshchenko L., postgraduate, ORCID 0000-0001-9860-2226, (Kyiv National University of Construction and Architecture)

Запропоновано принципи композиційної побудови наномодифікованих будівельних розчинів спеціального призначення з покращеними експлуатаційними характеристиками, що передбачають оптимізацію процесів структуроутворення не тільки на нанорівні, але й на мікро- та мезорівнях їх структури. Досліджено властивості гідроізоляційних розчинів на основі цементних систем, модифікованих вуглецевими нанотрубками, що відрізняються покращеними характеристиками. Також розглянуто властивості оптимізованих декоративних штукатурних розчинів на основі білого цементу, модифікованого нанокарбонатними добавками у присутності полікарбоксилатного суперпластифікатора, які характеризуються довговічністю, низькою пористістю, достатньо високою міцністю, тріщиностійкістю, що досягається керуванням процесами структуроутворення штучного каменю як на нано-, так й на мікро- та мезорівнях.

The principles of compositional construction of nanomodified special-purpose mortars with improved performance characteristics are proposed, which involve optimization of the processes of structure formation not only at the nanolevel, but also at the micro- and meso-levels of their structure. The

properties of waterproofing mortars based on cement systems modified with carbon nanotubes, which are distinguished by improved properties, are studied. The properties of optimized decorative plaster mortars based on white cement modified with nanocarbonate additives in the presence of a polycarboxylate superplasticizer are also considered, which are characterized by durability, low porosity, sufficiently high strength, crack resistance, which is achieved by controlling the processes of structure formation of artificial stone both at the nano-, micro- and meso-levels.

Ключові слова: цементні системи, наномодифікація, вуглецеві нанотрубки, нанокарбонатні добавки, полікарбоксилатні суперпластифікатори, меламінформальдегідні пластифікатори, епітаксiальні нарощування.

Cement systems, nanomodification, carbon nanotubes, nanocarbonate additives, polycarboxylate superplasticizers, melamine formaldehyde plasticizers, epitaxial growth.

Вступ. Застосування наноматеріалів для підвищення функціональних властивостей будівельних матеріалів і виробів є новим перспективним напрямом в будівельному матеріалознавстві, що дозволить скоротити матеріальні та трудові витрати, збільшити термін служби та, відповідно, підвищити рівень ергономічності, екологічності будівельної продукції. Останні дослідження застосування наноматеріалів у будівництві підкреслюють їхній значимі матеріалознавстві потенціал для покращення властивостей матеріалів та зменшення впливу на навколишнє середовище.

Аналіз останніх досліджень До наноматеріалів умовно відносять такі речовини, що містять структурні елементи (наноблоки, кластери, кристали), геометричні розміри яких хоча б в одному напрямку не перевищують 100 нм та мають якісно нові функціональні та експлуатаційні властивості (твердість, міцність на згин або на стиск, зносостійкість, коефіцієнт тертя тощо) [1]. Дослідження показують, що включення до бетону таких нанодобавок як нанокремнезем, графен, вуглецеві нанотрубки, нанокарбонати, нанокристалічний оксид титану сприяє ущільненню структури штучного каменю та покращенню його експлуатаційних властивостей [2].

Відомо, що додавання вуглецевих нанотрубок у цементні розчини та бетони головним чином позитивно впливає на збільшення їх міцності на стиск та на згин. При цьому результати досліджень є неоднозначними і подекуди суперечливими: в ряді досліджень результати вказують на зростання міцності на стиск більше, ніж на 40% [3] і на згин 38% [4] відповідно, в той час як інші дослідження вказують на зростання цих же показників лише до 5% [5] і 10% [6] відповідно. Також цікавим є факт, що при додаванні вуглецевих нанотрубок до складу високоміцного бетону (0,05 мас%) , збільшення міцності на стиск спостерігається на рівні 4,63% [4].

Найбільше покращення міцності на стиск і згин спостерігалось на 83,33% [7] і 30% [8] для цементного тіста; приблизно 35% і 28% [9] для розчину; 38,62% для бетону [4] відповідно.

Дослідженнями [2] показано, що при введені до бетонної суміші вуглецеві нанотрубки армують цементний камінь, перетворюючи його у композиційний матеріал, що істотно впливає на характеристики його міцності. Згідно відомим даним спостерігається ефект спрямованої кристалізації новоутворень цементного каменю на підложці, роль якої виконують вуглецеві нанотрубки. Даний метод втручання у процеси структуроутворення дозволяє на 30...40% підвищити міцність цементного каменю. Але міцність бетону при цьому збільшується незначно (приблизно на 10%), оскільки армування відбувається на мікрорівні, а на характеристики міцності бетону куди істотніше впливає його структура на макрорівні.

Додавання нанокарбонатної добавки до цементної системи сприяє зародженню і росту гідроалюмосилікатів кальцію на ранніх стадіях, а також є джерелом карбонатних іонів для участі в реакціях з алюмінатними фазами портландцементного клінкеру [9]. Дослідженнями [10] підтверджено, що заміна 5% цементу нанокарбонатною добавкою не тільки прискорює гідратацію, а й сприяє скороченню термінів тужавіння. Окрім того зазначається, що розмір частинок карбонатних добавок значно впливає на міцність цементних систем. Показано, що карбонатні добавки по-різному впливають на механізм гідратації окремих мінералів портландцементного клінкеру [11].

Таким чином можна вважати, що наномодифікація цементних розчинів і бетонів сприяє покращенню фізико-механічних властивостей, однак отриманий результат залежить не тільки від якості і кількості нанодобавок, але й від технології їх приготування та введення до складу будівельних розчинів та бетонів.

Постановка мети і задач досліджень. Аналіз результатів дослідження процесів наномодифікації будівельних розчинів та бетонів спеціального призначення обумовлює необхідність проведення досліджень щодо оптимізації процесів структуроутворення не тільки на нанорівні, але й на мікро-, мезорівнях структури цементовмісних систем. Метою роботи є розробка принципів композиційної побудови наномодифікованих будівельних розчинів спеціального призначення. Задачами досліджень є визначення впливу добавок вуглецевих нанотрубок на властивості гідроізоляційних розчинів, що впливають на формування нано- та мікро- і мезоструктури штучного каменю, а також нанокарбонатних добавок на властивості декоративних штукатурних розчинів на основі білого цементу, модифікованого полікарбоксилатним пластифікатором.

Матеріали та методи досліджень. Для проведення досліджень при отриманні гідроізоляційних розчинів як сировинні матеріали застосовано: портландцемент ПЦ-I 500 ($S_{\text{пшт}}=350 \text{ м}^2/\text{кг}$); шлакомісткий портландцемент

ПЦ-П/А-Ш 400 ($S_{\text{пит}}=350 \text{ м}^2/\text{кг}$). Для регулювання властивостей гідроізоляційних розчинів на нанорівні було застосовано неочищені багатошарові вуглецеві нанотрубки фулероїдного типу, що вкриті шаром аерогелю кремнію, з міжплощинними відстанями $0,34\ldots 0,36 \text{ нм}$ і розміром частинок $10\ldots 40 \text{ нм}$. Нанотрубки (ТУ У 24.1-03291669-009:2009, виробник ТМ «Спецмаш») вводили до складу матеріалу в кількості $0,005\ldots 0,015\%$ від маси в'язучої речовини.

З метою регулювання властивостей розчину на мікрорівні, було використано алюмосилікат шаруватої будови у вигляді бентонітової глини Дашуківського родовища, розміленої до питомої поверхні понад $1000 \text{ м}^2/\text{кг}$. Для регулювання властивостей наномодифікованого гідроізоляційного розчину на мезорівні, як дрібний заповнювач застосовували фракціонований дніпровський кварцовий пісок з крупністю зерна менше $0,63 \text{ мм}$.

Для отримання декоративних штукатурних розчинів як вихідні матеріали використовували: білий портландцемент СЕМ I 52.5 фірми Adana (Туреччина), що характеризується наступним мінералогічним складом, мас %: $\text{C}_3\text{S} - 73,0$, $\text{C}_2\text{S} - 7,0$, $\text{C}_3\text{A} - 3,0$, $\text{C}_4\text{AF} 1,0$ та має питому поверхню $390 \text{ м}^2/\text{кг}$ за Блейном, суперпластифікатор на основі полікарбоксилатів, нанокарбонатну добавку, тонкодисперсну активну мінеральну добавку на основі мікрокремнезему, в якості дрібного заповнювача - пісок дніпровський річковий кварцовий визначеного гранулометричного складу.

Як нанокарбонатну добавку використано технічний продукт Норвезької фірми «Nordcalk» з розміром частинок $d_{50} - 130 \text{ нм}$, $d_{90} - 300 \text{ нм}$ у вигляді дисперсії «Enrich C 50» з вмістом сухої речовини 50% , середньою густиною $1,45 \text{ г}/\text{см}^3$, та у вигляді сухого порошку «Enrich C».

Ідентифікацію новоутворень та встановлення особливостей структуроутворення у досліджених композиціях було виконано за допомогою рентгенофазового, диференційно-термічного аналізів та електронної мікроскопії. Фізико-механічні властивості зразків-балочок цементно-піщаного розчину та зразків кубів визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-187:2009 та ДСТУ Б В.2.7-96-2000 відповідно. Міцність, капілярне водопоглинання, коефіцієнт водопоглинання, водонепроникність, тріщиностійкість, адгезію покриттів, нанесених на основу, досліджували згідно з ДСТУ Б В.2.7-126:2011. Довговічність будівельних розчинів оцінювали за результатами дослідження їх водонепроникності, тріщиностійкості, морозо- та корозійної стійкості.

Результати досліджень. Для оптимізації складів гідроізоляційних будівельних розчинів вивчали процеси структуроутворення наномодифікованих цементних композицій з використанням вуглецевих трубок. Встановлено, що найбільший вплив на зниження пластичної міцності цементного тіста та підвищення міцності цементного каменю у часі спостерігається при введенні 1% дисперсії нанотрубок в пластифікаторі мелаїнформальдегідного складу (Muraplast FK-98): має місце збільшення

міцності цементного каменю на стиск на 21...39%, та на згин – на 13...24% відповідно, порівняно з міцністю зразків з добавкою тільки пластифікатора. Вірогідно, що ефективність співпраці нанотрубок з пластифікатором пов'язана з хімічним складом останнього, а також його будовою, яка містить бензолні кільця.

З метою підтвердження впливу вуглецевих нанотрубок на процеси кристалізації новоутворень з використанням растрового електронного мікроскопу РЕММА-102 було досліджено зразки цементного каменю, модифікованого 1% дисперсією нанотрубок у пластифікаторі Muraplast FK-98. Аналіз мікроструктури каменю (рис.1) дозволяє зазначити, що неочищені вуглецеві нанотрубки сприяють утворенню пластинчатих гідросилікатів кальцію гексагональної форми, які пошарово нарощуються, утворюючи досить щільну та міцну структуру (рис. 1, б, в). Такі новоутворення в продуктах гідратації контрольного зразка взагалі відсутні (рис. 1, а). З часом, присутність нанотрубок сприяє повній перекристалізації голчатих кристалів у пластинки (рис. 1, в), які розташовані одна поверх одної і за формою нагадують кристалічну решітку графіту. Це явище може бути пояснене епітаксialним нарощуванням гідросилікатів кальцію за рахунок формування кристалів на поверхні вуглецевих нанотрубок, які сформовані з декількох згорнутих гексагональних графітових площин.

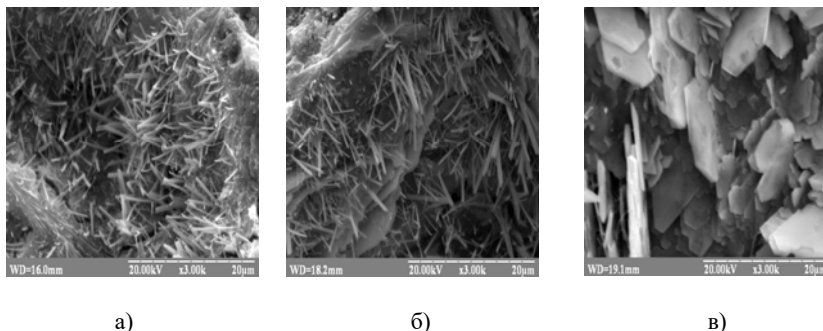


Рис. 1. Мікроструктура штучного каменю на основі: портландцементу з добавкою пластифікатора Muraplast FK-98 (після твердіння протягом 7 діб) (а) та з добавкою 1 мас.% дисперсії неочищених вуглецевих нанотрубок в пластифікаторі Muraplast FK-98 (після твердіння протягом 7 та 90 діб відповідно) (б, в)

З метою оптимізації структури розчину на мікрорівні було досліджено вплив алюмосилікатних добавок шаруватої будови (бентонітової глини) на фізико-механічні показники наномодифікованих цементних композицій. Показано, що введення алюмосилікатних добавок до складу в'язучих композицій призводить до зменшення ранньої міцності, в той же час використання комплексної добавки, що включає алюмосилікати та дисперсії вуглецевих нанотрубок в пластифікаторах, дозволяє частково компенсувати втрату міцності.

При оптимізації мезорівня розроблених гідроізоляційних розчинів найнижчими значеннями коефіцієнтів водопоглинання при відносно високій міцності характеризуються склади розчинів, які передбачають використання фракціонованого піску (фракція $< 0,63$ мм) та в'язучої речовини, що модифікована комплексною добавкою, яка включає дисперсію вуглецевих нанотрубок у пластифікаторі Muraplast FK-98 та бентонітову глину в кількості 7,5% при витраті піску на 1 частину в'язучої речовини – 1:1,5, причому подальше збільшення кількості алюмосилікатної складової до 10% призводить до значного підвищення водопоглинання та різкого спаду міцності.

Основні характеристики оптимізованого складу наномодифікованого гідроізоляційного розчину відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7-126:2011: міцність на 28 добу твердіння становить 49 МПа; коефіцієнт водопоглинання: $0,013 \text{ кг/м}^2 \cdot \sqrt{\text{год}}$; капілярне водопоглинання – 0,1 мл; відносна усадка на 28 добу – $13,5 \cdot 10^{-4}$; коефіцієнт корозійної стійкості у розчинах солей 0,71 – 0,84; міцність зчеплення з основою 1,8 – 2,0 МПа; водонепроникність – 0,087 МПа; морозостійкість – F200.

За вищенаведеними принципами була виконана оптимізації складів на всіх рівнях структури наномодифікованих декоративних штукатурок, отриманих з використанням в'язучих систем на основі білого цементу Adana (Туреччина), суперпластифікатора полікарбоксилатного типу та нанокarbonатної добавки.

При додаванні нанокarbonатної добавки у вигляді дисперсії на мікрорівні відбувається зменшення інтенсивності процесу перекристалізації еtringіту в моносulfатну форму та утворення carbonатного еtringіту, який в подальшому є підкладкою для направленої кристалізації та епітаксiального нарощування волокнистих гідросилікатів кальцію. Також має місце формування новоутворень типу скоутиту, що зв'язують carbonатну складову в термодинамічно стабільні сполуки. За рахунок цього, забезпечується набір міцності штучного каменю у часі, оскільки волокнисті гідросилікати кальцію сприяють мікроармуванню цементної матриці.

За даними рентгенофазового аналізу після 28 діб твердіння в складі новоутворень зафіксовані портландит ($d=0,493; 0,263; 0,193; 0,149$ нм); тоберморит 11,3 А ($d= 0,307; 0,297; 0,228; 0,193; 0,176$ нм); $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$ ($d=0,493; 0,304; 0,273$ нм), а також можуть бути мікрокристалічні включення скоутиту $\text{Ca}_7(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{CO}_3) 2 \text{H}_2\text{O}$.

Після 365 діб твердіння наномодифікованих портландцементних композицій в складі новоутворень крім гіллебрандиту та тобермориту 11,3 А ($d = 0,307; 0,297; 0,228; 0,215; 0,193; 0,176$ нм) фіксується скоутит $6\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ($d= 0,303; 0,301; 0,277; 0,227; 0,207; 0,193; 0,176; 0,163; 0,148$ нм). Вищеназвані сполуки мають подібні параметри кристалічної решітки і можуть зростатися між собою, що сприяє синтезу міцності штучного каменю у часі. Результати рентгенофазового аналізу

підтверджуються результатами електронної растрової мікроскопії. При гідратації білого цементу тільки в присутності полікарбоксилатного пластифікатора має місце утворення переважно пластинчастих гідратних фаз (рис.2, а), а при введенні пластифікатора разом з нанокарбонатною дисперсією переважають гідратні структури волокнистої форми. Після 28 діб твердіння у складі новоутворень починають переважати низькоосновні гідросилікати кальцію (рис. 2, б), що сприяють зарощуванню пор.

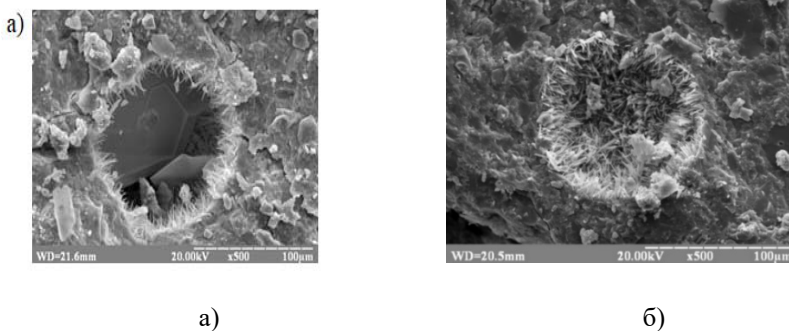
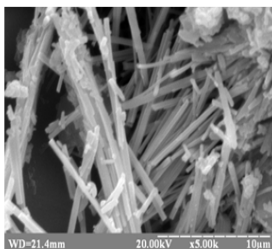


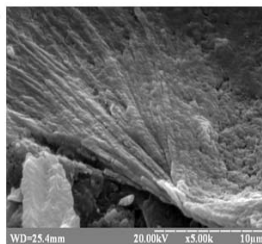
Рис.2. Порівняння характеру зарощення пор в мікроструктурах цементного каменю, отриманого на основі білого портландцементу з додаванням 1% пластифікатора (а) та 2.5% нанокарбонатної дисперсії (б) після 28 діб твердіння: збільшення : x 500

Після одного року твердіння цементних композицій, має місце направлена кристалізація гідросилікатних фаз, що підтверджується як характером основної мікроструктури каменю, так і характером зарощення пор (рис. 3, б).

Як показали попередні дослідження [12], при введенні до цементної системи на основі пластифікованого цементу, модифікованого нанокарбонатною дисперсією та добавкою мікрокремнезему в кількості (5-15)% для модифікації цементного каменю на мікрорівні, має місце направлене утворення гідросилікатних фаз, які сприяють не тільки синтезу міцності, але й мають певний вплив на реологічні та фізико-механічні властивості цементного тіста, при цьому забезпечується стабільний набір міцності каменю у часі, оскільки волокнисті гідросилікати кальцію сприяють мікроармуванню цементної матриці. Отримані декоративні розчини характеризуються підвищеними експлуатаційними характеристиками: порівняно з декоративним розчином без модифікації міцність на стиск підвищується на 35%, пористість зменшується на 9%, збільшується стійкість до появи тріщин. При цьому спостерігається значне зменшення висолоутворення модифікованих декоративних розчинів.



а)



б)

Рис.3. Мікроструктура штучного каменю на основі портландцементу, модифікованого нанокарбонатною дисперсією в присутності полікарбоксилатного пластифікатора після 28 (а) та 365 діб твердіння (б) збільшення x5000 разів

Висновки та рекомендації. В результаті досліджень доведено необхідність оптимізації процесів структуроутворення не тільки на нанорівні, але й на мікро-, мезорівнях структури цементних систем. Так, отримання гідроізоляційних будівельних розчинів з покращеними експлуатаційними властивостями, а саме зниженою величиною водопоглинання, підвищеною водонепроникністю, тріщиностійкістю, корозійною стійкістю та адгезією досягається шляхом регулювання структури матеріалу на всіх рівнях, в тому числі на мезорівні – за рахунок використання фракціонованого дрібного заповнювача, на мікрорівні – використанням алюмосилікатів шаруватої будови, та на нанорівні – введенням добавки дисперсії неочищених вуглецевих нанотрубок в пластифікаторі, в результаті чого має місце інтенсифікація кристалізації новоутворень та формування більш щільного водонепроникного гідросилікатного та гідроалюмосилікатного шару, обумовленого епітаксialним нарощуванням продуктів гідратації на поверхні вуглецевих нанотрубок.

Незважаючи на різну природу нанодобавок, така ж сама тенденція має місце при оптимізації складів декоративних розчинів, модифікованих нанокарбонатами. При введенні такої нанодобавки має місце регулювання структури на нано- та мікрорівні за рахунок зменшення інтенсивності процесу перекристалізації еtringіту в моносольфатну форму та утворення карбонатного еtringіту, який в подальшому являється підкладкою для направленої кристалізації волокнистих гідросилікатів кальцію. За рахунок цього, забезпечується набір міцності штучного каменю у часі, оскільки волокнисті гідросилікати кальцію сприяють мікроармуванню цементної матриці. Додаткове введення в систему 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.

1. Панов Є.М., Шилович Т.Б., Шилович Я.І. Перспективи розробки та дослідження наномодифікованих композиційних будівельних матеріалів, Вісник Вінницького політехнічного інституту, Вип. 3 – (ISSN 1997-9266), 2018, с. 7–13.

Panov Ye.M., Shylovych T.B., Shylovych Ya.I. Perspektyvy rozrobky ta doslidzhennia nanomodyfikovanykh kompozytsiinykh budivelnikh materialiv, Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu, Vyp. 3 – (ISSN 1997-9266), 2018, s. 7–13.

2. Anwar Khitab, Sajjad Ahmad, Arsalan Rao, Imran Mehmood, Fracture toughness and failure mechanism of high performance concrete incorporating carbon nanotubes. *Frattura ed Integrità Strutturale*, vol. 11, n. 42, (ISSN 1971-8993), 2017, P.238-248. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.42.26>

3. C. Arvind Kumar, Panga Narasimha Reddy, S.A. Aejaz et al. Self-sensing concrete with recycled coarse aggregate sand multi-walled carbon nanotubes: A sustainable and effective method. *Research on Engineering Structures and Materials (RESM)* (2023). P. 41-56. <http://dx.doi.org/10.17515/resm2023.773ma0520>

4. Lu, L.; Ouyang, D.; Xu, W. Mechanical properties and durability of ultra high strength concrete incorporating multi-walled carbon nanotubes. *Journals Materials* 2016, 9(6), 419. <https://doi.org/10.3390/ma9060419>

5. Hu, S.; Xu, Y.; Wang, J.; et al. Modification Effects of Carbon Nanotube Dispersion on the Mechanical Properties, Pore Structure, and Microstructure of Cement Mortar. *Journals Materials* 2020, 13 (5), 1101. <https://doi.org/10.3390/ma13051101>

6. Xu, S., Liu, J., Li, Q. Mechanical properties and microstructure of multi-walled carbon nanotube-reinforced cement paste. *Constr. Build. Mater.* 76, (2015). P.16–23. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.049>

7. Cerro-Prada E., Pacheco-Torres R., Varela F. Effect of Multi-Walled Carbon Nanotubes on Strength and Electrical Properties of Cement Mortar. *Journals Materials* 2021, 14(1), 79, <https://doi.org/10.3390/ma14010079>

8. Irshidat, M. R., Al-Nuaimi, N., Salim, S. *et al.* Carbon nanotubes dosage optimization for strength enhancement of cementitious composites. *Proced. Manuf.* 44, (2020). P.366–370 <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.282>

9. Dale P. Bentz, Ahmad Ardani, Tim Barrett, *et al.* Multi-scale investigation of the performance of limestone in concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 75, (2015) P. 1-10, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.042>

10. Kakali G., Tsvivilis S., Aggeli E, Bati M.. Hydration products of C_3A , C_3S and Portland cement in the presence of $CaCO_3$, *Cement and Concrete Research*, Volume 30, Issue 7, 2000, P. 1073-1077, ISSN 0008-8846, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00292-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00292-1).

11. Пушкарьова К.К., Гадайчук Д.Р., Кушнерова Л.О. та ін. Кристалохімічні аспекти гідратації процесу гідратації мінералу C_3S в присутності нанокarbonатних добавок. Науково-технічний збірник Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка, № 60. – (ISSN 2413-7693), (2019), 2021.-Київ. – с.34-44

Pushkarova K.K., Hadaichuk D.R., Kushnierova L.O. ta in. Krystalokhimichni aspekty hidratatsii protsesu hidratatsii mineralu C_3S v prysutnosti nanokarbonatnykh dobavok. Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk Budivelni materialy, vyroby ta sanitarna tekhnika, № 60. – (ISSN 2413-7693), (2019), 2021.-Kyiv. – s.34-44

12. Pushkarova, K., Kochevykh, M., Honchar, O. *et al.* Features of Hardening and Utilization of Modern Cement Compositions with Nanomodifying Additives For Repair And Restoration Works. *International Journal of Conservation Science*, 15, (2024). 157–168. <https://doi.org/10.36868/IJCS.2024.si.13>