

DOI: 10.32347/2076-815x.2023.82.95-113

УДК 620.3

к.т.н., доцент **Голик Й.М.**,
g.jolana@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5135-0711,
к.фіз.-мат.н., доцент **Кайнц Д.І.**,
diana.kaynts@uzhnu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-7242-027X,
Вантюх Д.Е.,
dianavantuykh@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6096-7016,
Ужгородський національний університет

РІЗНОВИДИ НАНОМАТЕРІАЛІВ ТА МОЖЛИВОСТІ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ У БУДІВНИЦТВІ

Розглянуто поняття наноматеріалів, їх класифікацію за розмірами частинок, різновиди та фізико-хімічні властивості, сучасні можливості отримання за допомогою нанотехнологій. Досліджено перспективи застосування наноматеріалів у будівельній галузі. Зокрема, висвітлено властивості наномодифікованих бетонів, сталі, арматури, кераміки, скла. Досліджено закордонний досвід використання наноматеріалів у будівництві. Висвітлено стан та перспективи використання модифікованих наночастинками будівельних матеріалів в Україні, а також пошук альтернативних методів шляхом введення до їх складу речовин, доступних у видобутку і, водночас, здатних покращити ресурс роботи виробів при модифікації частинками децю більшого розміру.

Ключові слова: наноматеріали; нанотехнології; наноструктури; будівельні матеріали; конструкційні композити; нанокомпозитна арматура.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвиток суспільства нерозривно пов'язаний з удосконаленням технологій отримання і використання матеріалів, причому одним з найбільш пріоритетних його напрямків є активне впровадження наноматеріалів і нанотехнологій [3, 6, 24]. В Україні за умов інтенсифікації будівельної галузі з метою спорудження нових об'єктів, збільшення поверховості будівництва, необхідності зведення надійних укриттів і відбудови напівзруйнованих внаслідок війни будівель і споруд, завдання розробки і застосування в будівельній галузі нових та модифікованих матеріалів з поліпшеними фізико-механічними та експлуатаційними показниками є вельми актуальним.

Останнім часом питання запровадження нанотехнологій для виробництва різноманітних композиційних будівельних матеріалів та виробів будівельного

призначення користуються підвищеною увагою, причому, найбільш поширеним напрямком покращення властивостей матеріалів є запровадження технології наномодифікації, а саме – подрібнення вихідного матеріалу до наностану або ж введення наночастинок до основного складу сировини будівельного матеріалу [7, 14-16]. Дедалі більшу зацікавленість викликає застосування нанотехнологій для покращення структури бетонів, а також виробів з кераміки й скла, які активно застосовується в енергетиці, будівельній, ракетно-космічній, верстатобудівній, оборонній та авіаційній промисловості. При цьому ресурс роботи виробів з наноматеріалів зазвичай перевищує їх звичайні аналоги в 30–100 разів і вище, що підкреслює актуальність дослідження [6, 18, 19].

Водночас, питання вартості наномодифікованих матеріалів диктують необхідність пошуку дешевших можливостей при максимальному збереженні корисних властивостей матеріалів для сучасного будівництва. Певною альтернативою може слугувати введення до складу будівельних матеріалів речовин, доступних у видобутку і, водночас, здатних покращити ресурс роботи виробів при модифікації частинками дещо більшого розміру.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Необхідні теоретичні дані про особливості наноматеріалів наведені згідно з інформацією, розміщеною у вітчизняних посібниках авторів Заячука Д.М., Богуслаєва В.А. та співавторів, Присяжної О.В., Сігова В.І. та співавторів. Проблема та перспективам розвитку нанотехнологій як напряму інноваційної діяльності у будівництві в Україні та світі присвятили свої роботи вчені Балан О.С. Дерев'янку В.Н. і співавторів, Згалат-Лозинська Л.О., Згалат-Лозинський О.Б., Мороз Л.В. Фесенко О.М., Ковальчук С.В., Ницик Р.А. Практичний досвід використання наноматеріалів у закордонному будівництві висвітлений Ahmed M.A., Hassanean Y.A., Assaf K.A., Shawkey M.A., Hossain K., Rameeja Sh., Krystek, M., & Górski, M., Land G., Stephan D., Mohajerani A., Burnett L., Smith J.V., Moini M., Zavattieri P.D., Youngblood J.P., Peyvandi A., Utsev T., Zelenskii O.

Мета статті полягає в аналізі літературних джерел щодо різновидів наноматеріалів, особливостей їх основних експлуатаційних властивостей, можливостей застосування у виробництві композиційних будівельних матеріалів, а також дослідженні зарубіжного досвіду використання наномодифікованих матеріалів у будівельній галузі з визначенням перспектив їх застосування в Україні та пошуками альтернативи.

Виклад основного матеріалу. На сьогодні існує декілька підходів до того, як визначити, що входить у поняття «наноматеріали», тому термінологія щодо наноматеріалів і нанотехнологій в даний час тільки встановлюється [14]. Найпростіший підхід пов'язаний з геометричними розмірами будови таких

матеріалів. Згідно з таким підходом, матеріали з характерним розміром мікроструктури від 1 до 100 нм називаються наноструктурованими (або інакше нанофазними, нанокристалічними, супрамолекулярними) [11]. Вибір такого діапазону визначається існуванням ряду розмірних ефектів і збігом розмірів кристалітів з характерними для різних фізичних явищ розмірами. Нижня межа вважається пов'язаною з нижньою межею симетрії нанокристалічного матеріалу, оскільки в міру зменшення розмірів кристалу настає момент, коли відбудеться втрата деяких елементів симетрії. Другий підхід пов'язаний з величезною роллю численних поверхонь наноматеріалів у формуванні їх властивостей. [9, 14-15].

Існує також підхід, згідно з яким для наноматеріалів найбільший розмір одного з їх структурних елементів повинен дорівнювати або бути меншим за розмір, характерний для певного фізичного явища. Так, за властивостями міцності це буде розмір бездефектного кристалу, за магнітними властивостями – розмір однодомного кристалу, для електропровідності – довжина вільного пробігу електронів [2].

Найбільш повноцінною на сучасному етапі є термінологія, яка визначає наноматеріали як такі дисперсні і масивні матеріали, які містять структурні елементи (зерна, кристаліти, блоки, кластери), геометричні розміри яких хоча б в одному вимірі не перевищують 100 нм і володіють якісно новими властивостями, функціональними і експлуатаційними характеристиками [5]. Згідно з цією термінологією, наноматеріали поділяють на чотири основні категорії [5, 9, 14-15]:

1. Наноматеріали з невеликою кількістю структурних елементів або наноматеріали у вигляді нановиробів. Сюди відносяться матеріали у вигляді твердих тіл, розміри яких в одній, двох або трьох просторових координатах не перевищують 100 нм. До таких матеріалів належать нанорозмірні частинки (нанопорошки), нанодроти і нановолокна, дуже тонкі плівки (товщиною менше 100 нм), нанотрубки і т.д. Такі матеріали можуть містити від одного елементу конструкції або кристаліту (для порошку) до декількох їх шарів (для плівки).

2. Наноматеріали з великою кількістю структурних елементів (кристалітів) або наноматеріалів у вигляді мікровиробів. До другої категорії відносяться матеріали у вигляді малогабаритних виробів з характерним розміром у діапазоні 1 мкм - 1 мм. Зазвичай це дроти, стрічки, фольги. Такі матеріали вже містять значну кількість елементів конструкції.

3. Масивні (або об'ємні) наноматеріали з розміром виробів з них в макродіапазоні (більше декількох мм). Такі матеріали складаються з дуже великої кількості нанорозмірних елементів (кристалітів) і фактично є полікристалічними матеріалами з розміром зерен 1 - 100 нм. У свою чергу,

третю категорію наноматеріалів можна розділити на два класи. До першого класу відносяться однофазні матеріали (відповідно до термінології мікроструктурно однорідних матеріалів), структура і / або хімічний склад яких варіюється в обсязі матеріалу тільки на атомному рівні. Їх структура, як правило, знаходиться в стані, далекому від рівноваги. До таких матеріалів відносяться, наприклад, скло, гелі, перенасичені тверді розчини. До другого класу відносяться мікроструктурно неоднорідні матеріали, які складаються з нанорозмірних елементів (кристалітів, блоків) з різною структурою і / або складом. Це багатофазні матеріали, наприклад, на основі металевих сплавів.

4. Композитні матеріали, що містять компоненти наноматеріалів. При цьому в якості компонентів можуть виступати наноматеріали, класифіковані в першій категорії (композити з наночастинками і / або нановолокнами, вироби зі зміненим іонною імплантацією поверхневим шаром або тонкою плівкою) і другої категорії (наприклад, композити, укріплені волокнами і / або частинками з наноструктурою, матеріали з модифікованим наноструктурованим поверхневим шаром або покриттям). Також можна виділити композитні матеріали зі складним використанням наноконпонентів [5, 9, 14-15].

На сучасному етапі існує чимало способів і технологій отримання наноматеріалів, серед яких найбільш перспективними вважаються наступні:

1. Кероване створення наноструктури в об'ємі матеріалу (прецизійна термічна обробка, інтенсивна пластична деформація, введення наночастинок).

2. Отримання вихідних матеріалів (дезінтегративно-активаційна технологія, високошвидкісне загартовування із розплаву, отримання нанопорошків хімічним, плазмохімічним методами).

3. Цілеспрямоване створення матеріалу (лазерне пошарове створення матеріалу заданого складу, структури та форми, спікання матеріалу у присутності електричного поля).

4. Інжиніринг поверхні матеріалу (нанесення функціонально-градієнтних покриттів, поверхнева обробка і зміцнення).

5. Поєднання матеріалів (лазерне і гібридні види зварювання) [14].

Незважаючи на те, що розвиток технологій в будівельній сфері спрямований у першу чергу на покращення функціональних характеристик будівлі, а не на впровадження нових будівельних матеріалів, світові нанотехнології знайшли широке застосування в цій галузі. На даний момент інженери вбачають наступні перспективи застосування наноматеріалів в будівництві: створення фундаментів з саморегуляцією усадки ґрунту; розробка конструктивних елементів, які реагують на пошкодження або деформацію; використання сонячних панелей в якості огорожувальних конструкцій;

створення функціональних покриттів; винайдення покриттів, сприйнятливих до психічного і фізичного стану людей; підвищення міцності і надійності будівель.

Забезпечити ці перспективні напрямки можна завдяки активному впровадженню на будівництві вже існуючого різноманіття наноматеріалів, серед яких найбільш поширені: високоміцний бетон з використанням наноконпозиційних порошкових добавок; конструкційні композити на металевій, керамічній або полімерній матриці; матеріали з контрольованою електропровідністю; посилена сталь; наноконпозиційні трубки; склопластикова композитна арматура; суперпластифікатори для контролю реологічних властивостей сумішей; в'язучі матеріали, модифіковані наночастками полімерів, їх емульсіями або полімерними наноплівками, наностержнями, нанотрубками, наноамортизаторами; матеріали з сенсорикою і заданими реакціями на температурні дії, вологість, напругу; безушкодні матеріали та матеріали з низьким температурним розширенням, з ефектом самозаліковування; нанопокриття, наногелі, що мають тепло-, звукоізоляційні, стерилізуючі, самоочисні, енергозберігаючі властивості [14, 16, 24].

До найбільш поширених серед усього спектру різновидів наноматеріалів у сучасному будівельному матеріалознавстві, насамперед, належать нанобетони. Одним з найважливіших напрямків є розробка високотехнологічних і швидкотверднучих нанобетонів з покращеними експлуатаційними властивостями. Характерною ознакою таких бетонів є багатокомпонентність, що передбачає використання різноманітних за гранулометричним і речовинним складом мінеральних добавок. Тому технологія будівельного виробництва передбачає вирішення задач управління процесами структуроутворення бетонів на мікро- і наноструктурних рівнях цементної матриці, що дозволяє забезпечити підвищення технологічних властивостей і функціональних характеристик для одержання високоякісних конструкційних матеріалів [8].

Наномодифікування портландцементів включає як введення нанорозмірних спеціально синтезованих складників (вуглецеві наночастинки фулероїдного типу, нано-SiO₂ та ін.), так і безпосередній синтез наномасштабних об'єктів у об'ємі матеріалу чи на границі розділу фаз. Вирішення завдань одержання швидкотверднучих бетонів з необхідними показниками якості в значній мірі вирішуються за рахунок створення багатоступеневого рівня їх структури, яка досягається розробленням композиційних портландцементів з оптимізованим міжзерновим простором шляхом модифікування нанодисперсними мінеральними добавками і пластифікаторами полікарбоксилатного типу [20, 23].

Економічний ефект розроблення швидкотверднучих бетонів визначається зниженням матеріаломісткості, зменшенням енерго- та трудовитрат і

застосуванням техногенних відходів, значним збільшенням довговічності, і, як наслідок, збільшенням терміну міжремонтної експлуатації і зниженням експлуатаційних витрат, пов'язаних із функціонуванням будівель та споруд та з проведенням ремонтних робіт, що стало можливим завдяки забезпеченню високих показників експлуатаційної надійності бетону [17].

При переході до композиційних портландцементів основним фактором, що обмежує вміст у ньому мінеральних добавок, є гранично допустиме зниження міцності, особливо в ранні терміни тверднення. Тому для портландцементів з мінеральними добавками надзвичайно актуальним є пошук шляхів підвищення кінетики наростання їх міцності в ранньому віці [17, 22]. Резерви підвищення ефективності використання композиційних портландцементів та збільшення їх міцності полягають у зменшенні міжзернової та капілярної пористості. Ефективним способом підвищення швидкості процесів раннього структуроутворення є механоактивація, при якій у подрібнених твердих матеріалах відбуваються різні фізико-хімічні процеси, а одержані активовані речовини характеризуються термодинамічною нестійкістю, що сприяє підвищенню їх реакційної здатності [22].

Одним із найбільш доступних способів регулювання властивостей цементних систем є застосування хімічних добавок-модифікаторів, що забезпечує ефективність укладання бетонної суміші, розпалублення монолітних споруд у якнайкоротші терміни при достатній якості останніх, можливість проведення будівельних робіт при понижених температурах. Так, зниження витрати води досягається при введенні добавок пластифікуючої групи на основі поверхнево активних речовин [20].

Для інтенсифікування процесів гідратації та тверднення портландцементів використовують прискорювальні добавки. В основі їх дії лежить збільшення розчинності вихідного в'язучого та кінцевих продуктів, його гідратації внаслідок зміни іонної сили розчину. Серед відомих прискорювачів, які широко використовують, є сульфат натрію Na_2SO_4 . Він характеризується відносно низькою розчинністю, при цьому не викликає корозії арматури [8].

Пришвидшення тверднення композиційних портландцементів, що містять золу, природний цеоліт також досягається за рахунок введення луговмісних добавок. Розроблено високоміцні лужні цементы, що характеризуються підвищеною водонепроникністю, стійкістю до агресивного середовища та довговічністю, проте такі в'язучі ще не отримали достатньо широкого застосування у будівництві [8].

Водночас, на сучасному етапі для найбільш відчутного підвищення функціональних властивостей бетонів застосовують нанодомішки, найбільш поширеною з яких є nano-SiO_2 , вміст якого визначає ключові характеристики і

властивості одержуваних матеріалів. Зокрема, нанодобавки SiO_2 застосовують в цементних композитах для модифікації реологічних характеристик, підвищення реакційної здатності активних мінеральних добавок, суттєвого підвищення міцності та довговічності.

Отже, введення наночастинок різної природи до складу цементних розчинів або бетонів забезпечує збільшення їх міцності на 10-100%. При цьому наночастинки «контролюють» процес формування структури цементної матриці бетону на нанорівні за рахунок спрямованого синтезу нанорозмірних кристалогідратів цементного каменю, які забезпечують інтенсивну взаємодію між основними складниками цементу з одержанням щільної структури [1]. Ефекти модифікування підсилюються комплексною взаємодією з суперпластифікаторами, що дозволяє зменшити можливість введення дороговартісного наномодифікатора та знизити витрату портландцементу. Так, в університеті Purdue проводяться дослідження щодо зміцнення бетону нанокристаллами целюлози. Дані кристали повинні зробити бетон міцнішим завдяки хімічній реакції, яка збільшує гідратацію частинок цементу [22].

Перспективними напрямками використання високоміцного бетону є будівництво залізобетонних конструкцій довжиною понад 74 м, об'єктів з підвищеними вимогами до пожежної безпеки та сейсмостійкості, зокрема, хмарочосів, великопрольотних мостів, захисних оболонок атомних реакторів, дамб, магістралей, шлюзів морських та річкових портів, аеродромів, тощо [1].

Однак, варто зазначити, що застосування наночастинок в бетоні залишається обмеженим через високу вартість, пов'язану з виробництвом наноматеріалів. Окрім того, до недоліків нанодобавок також відносять високу водопотребу, в результаті чого цементні розчини втрачають рухливість [1].

Вироби із сталі одні з найширше використовуваних будівельних матеріалів завдяки довговічності. Вони мають найвище відношення міцності до маси, порівняно з іншими будівельними матеріалами. Крім того, сталь вогнестійка, отже, під час пожежі вона не згорить. Це відмінний будівельний матеріал, оскільки його можна постійно переробляти, і цей процес не шкодить його властивостям. Дослідження вчених у галузі наномодифікацій металів та їх сплавів дозволили отримати високоміцну наносталь, яка не має в даний час аналогів за параметрами міцності та в'язкості. Застосування таких наноматеріалів ідеально підходить для будівництва різних гідротехнічних і дорожніх об'єктів. При цьому нанотехнології у будівництві дозволяють створити на сталевих конструкціях полімерні та композитні нанопокриття: вони в десятки разів підвищують стійкість сталі від корозії та в кілька разів збільшують термін служби металу, навіть якщо очікується робота в агресивних середовищах. Водночас, на сучасному етапі виробляються більш міцні типи

сталі шляхом додавання наночастинок у фарбу для покриття арматури бетонної конструкції. Цю арматуру виконують із мікрокомпозитної багатоструктурної плавильної сталі завдяки корозійній стійкості та довговічним властивостям. У звичайній сталі нерівність поверхні спричинює підвищення напруги, а отже, втомне розтріскування. Застосовуючи наночастинок як модифікатор, можна суттєво зменшити розтріскування. Крім того, ефекти водневої крихкості та міжгранулярної фази цементиту зменшуються завдяки вдосконаленню мікроструктури сталі. [1].

Інша проблема, пов'язана зі сталлю – це міцність зварювання. Ділянка зварювального шва, піддана нагріванню, може бути крихкою та часом виходити з ладу. Додавання наночастинок, таких як магній і кальцій, може допомогти вирішити цю проблему, зробивши «зерна зони термічного впливу більш дрібними в листовій сталі, що призводить до зміцнення зварних швів [1].

На думку фахівців, застосування у металургії нанопорошків допоможе підвищити механічні характеристики сталей. Існують різні методи їх введення в метал: компактування та спікання нанопорошків у порошковій металургії, інтенсивна пластична деформація, обробка заготовок потоком високоенергетичних частинок, нанесення зміцнювальних металевих покриттів, кристалізація наночастинок з аморфного стану та внесення наночастинок-модифікаторів. Перспективною також є будівельна склопластикова композитна арматура, яка має в 4 рази меншу, ніж у сталі, питому вагу, характеризується хімічною стійкістю і високою міцністю. При цьому композитна арматура відноситься до діелектриків, має низьку теплопровідність і не піддається корозії, завдяки чому її використовують у будь-якому типі будівництва [1].

Наступними за поширеністю є цегла та кераміка. Цегла використовується як будівельний матеріал протягом століть. Вона складається з 50 %-80 % глини, а решта – пісок та інші гранульовані матеріали. Зв'язані між собою за дії високих температур, вони набувають міцності, що робить цеглу винятковим будівельним матеріалом. Однак, звичайна цегла не демонструє хорошої міцності на стиск. Водночас, 5 % включення наноглини може забезпечити цеглі міцність на стиск, яка в 4,8 рази перевищує міцність звичайної глини [25]. Основними недоліками звичайної кераміки також є крихкість та низька міцність. Міцність може бути посилена збільшенням в'язкості руйнування або зменшенням критичного розміру дефекту. В'язкість руйнування може бути підвищена шляхом включення елементів, що розсіюють енергію. Арматування може застосовуватися для зміни напрямку тріщин або для створення місткових елементів, що заважають подальшому розкриттю тріщин. Основною проблемою при виготовленні керамічних матеріалів є отримання рівномірної дисперсії нанотрубок у керамічній матриці. Вдосконалення структури кераміки

здійснюють шляхом введення в сировинну композицію нанорозмірних компонентів, таких як гідрозолі оксидів алюмінію та кремнію [25].

Окремо хотілося б звернути увагу на структурні композити. Вони представляють собою широкий клас конструкційних матеріалів, які мають полімерну, металеву або керамічну матрицю. Типовим прикладом таких композитів є вуглецеві волокна - це композити з вуглецевими волокнами та полімерною матрицею. Найбільше поширення з метою наномодифікації будівельних матеріалів отримали вуглецеві нанооб'єкти [21]. Комп'ютерні технології та розвиток електроніки дозволили більш ретельно дослідити можливості та різноманіття вуглецевих наночасток. Завдяки властивості часток вуглецю до варіювання s- та p- атомних зв'язків, які можуть виникати при формуванні nC-молекул, в залежності від умов їх виникнення, вуглецеві наночастки мають високу алотропність, утворюючи різноманітні сполуки, від діаманту до графіту та нафти. Ця ж властивість різноманіття форм і структур вуглецевих наночасток є причиною їх широкого застосування у нанотехнологічних процесах, де використання вуглецевих наночасток дозволяє вирішити технічні задачі надмікроскопічного рівня [7].

Розрізняють такі види наночасток: нанотрубки, нановолокна, фулерени, фулеріти, грушовидні наночастки, наноплівки, нанокристали, нанокристалічні матриці, графени, тощо [13]. Найбільш поширеними для застосування у наномодифікаціях є нанотрубки та нановолокна. Перспективними для будівельної галузі є й фулерени, які після обробки у водному середовищі стають гідратованими і утримують на своїй поверхні шар орієнтованих молекул води завтовшки 20-80 нм, що значно підвищує рухливість та міцність бетону. Однак вартість нанотрубок і фулеренів достатньо висока, що обмежує їх широке застосування у будівництві. Здешевити їх виробництво поки що неможливо без різкого падіння їх корисних властивостей [1-2, 7, 21].

Поширеним також є використання наноскла. Порівняно зі звичайним склом, нанесення в поверхневі шари скла іонів срібла дозволяє руйнувати обмін речовин мікроорганізмів. Подібне скло здатне знищувати до 99, 9% бактерій, що потрапляють на його поверхню, стійких до дії антибіотиків, і з часом антибактеріальні властивості скла не втрачаються. Його пропонують використовувати в лікарнях, а також у ванних кімнатах житлових будинків [10]. Якщо при виготовленні наноскла піролізом нанести тонкі шари оксидів металів In-SnO₂, то коефіцієнт його теплопередачі знижується на 70-80%. А нанесення наночастинок TiO₂ забезпечує нейтралізацію органічних сполук на поверхні скла і повну його гідрофілізацію, тобто вода з брудом не затримуватимуться на склі. Таке скло виробляють і в Європі, незважаючи на високу собівартість [25].

Закордонний досвід застосування наноматеріалів. Розвинуті країни (Ізраїль, США, Ватикан, Швеція, ОАЕ та ін.) широко застосовують наноматеріали при розробці проектів будівель незвичайних конструкцій, які самостійно реагують на кліматичні зміни: силу вітру, зміну температур та доби. Серед реєстру будівельних матеріалів найбільшим попитом там користуються нанопокриття, що самоочищаються, і дивовижні фарби для фарбування стін, які крім довгої і бездоганної стійкості до кліматичних перепадів, мають здатність з часом їх посилювати. При обіцяному терміні два десятиліття, нанофарба практично вічна, бо здатна відновлювати сама нанесені ушкодження [6, 10].

Справжнім відкриттям у закордонній будівельній індустрії стала інноваційна плівка, призначена для захисту кольорових пластикових вікон від інфрачервоного випромінювання. Інноваційні плівки мають спеціальні пігменти, що відображають до 80% інфрачервоних променів і не дозволяють конструкціям перегріватися. В результаті така плівка захищає як вікна, так і приміщення від перегріву, подовжуючи цим термін служби конструкції і знижуючи витрати на кондиціювання. При цьому кольорова плівка, яка наноситься при ламінації на профіль, здатна надавати рамі візуальний ефект 3D, що відбувається завдяки використанню діамантових фарб. [4].

У Китаї (м. Шанхай) вперше на вікнах будинків з'явилися наноплівки, які накопичують енергію Сонця вдень, і ввечері безкоштовно віддають її як економне освітлення [25]. У шанхайському музеї Науки наноплівкою будівельники обробили стіни, забезпечивши «ефект термосу» (рис. 1).



Рис. 1. Музей Науки в Шанхаї (Китай)

<https://www.callisonrtkl.com/projects/shanghai-science-and-technology-museum/>

Подібні плівки можуть виконувати роль адсорбентів, каталізаторів і модифікаторів хімічних реакцій, технологічних і конструктивних властивостей матеріалів, що виготовляються з їх застосуванням. А в Пекінському Палаці Спорту нанотехнологічне покриття стелі дозволило отримати чудову шумоізоляцію, самоочищення та збільшило міцність купола (рис. 2).



Рис. 2. Палац Спорту в Пекіні (Китай)

<https://www.archdaily.com/946387/bit-sports-center-atelier-alter-architects>

Великим досягненням в області нанопокриттів стала імітація ефекту пелюсток лотоса, які є абсолютно невразливими для води. В результаті в Пекіні з'явилася будівля Великого національного театру, купол якого оброблений нанопокриттям, яке не забруднюється і не змочується опадами (рис. 3).



Рис. 3. Великий національний театр у Пекіні (Китай)

<https://www.beijing-visitor.com/beijing-attractions/national-grand-theater>

Поверхня, що має в своєму складі наночастинки TiO_2 (або вкрита плівкою з наночастинок TiO) стає сприйнятливою до змочування – гідрофільною, тобто замість утворення крапель вода рівномірно по ній розтікається. Цю технологію використано для будівництва церкви Dives in Misericordia ("Щедрий в милосерді") в Римі, що була зведена в 2003 році італійською компанією Centro Technico di Gruppo за проектом американського дизайнера Річарда Мейера (рис. 4). Для вирішення цих завдань фахівці вибрали цемент, виготовлений за новою технологією, в склад якого входять наночастки діоксиду титану (TiO_2) [6].



Рис. 4. Церква Dives in Misericordia у Римі (Італія)

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.frener-reifer.com%2Fpreferences%2Fparish-church-dives-in-misericordia%2F&psig=AOvVaw1QqZj2PqKKxE8Ba9SKhwA3&ust=1673780879639000&source=images&cd=vfe&ved=0CBEQjhxqFwoTCJCf31xvwCFQAAAAAdAAAAABAD>

Використовуючи виявлену фотокаталітичну активність діоксиду титану анатазної модифікації, в кінці 90 - х років минулого століття фірма Pilkington розробила технологію виробництва самоочисного скла, який отримав найменування Pilkington Aktiv (рис. 5). При нанесенні на поверхню флоат-скла безпосередньо при його виготовленні тонкого шару з оксидів металу In_2SnO_2 (методом піролізу), коефіцієнт теплопередачі його значно знижується, а теплопровідність склопакета зменшується в 222,5 рази [6].



Рис. 5. Приклад використання самоочисного скла Pilkington Aktiv

https://www.archiproducts.com/ru/%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82%D1%8B/pilkington-italia/%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BA%D0%BB%D0%BE-pilkington-aktiv_12647

Метали та їх сплави, що використовуються у будівництві – предмет пильної уваги та вдалих рішень нанодослідників інших країн. Спільні розробки вчених Норвегії, Швейцарії та інших держав подарували світові сталь такої незвичайної в'язкості та міцності, що та, якою користуються сьогодні, видається глиною. Сфера її використання – будівництво залізниць та автошляхів у складних умовах, будівництво конструкцій на воді [2, 6, 13].

В даний час завдяки неперевершеним властивостям наноматеріалів в закордонному будівництві широко застосовують створені на їх основі теплоізоляційні матеріали, фасадні водонепроникні фарби, емалі, лаки тощо [2].

Перспективи подальшого розвитку нанотехнологій. Впровадження нанотехнологій у будівництво найближчим часом створить справжній бум щодо використання наноматеріалів і вже в 2025 році 50% будівельних матеріалів міститимуть наночастинки. Фантастично виглядають перспективи подальшого розвитку нанотехнологій у будівництві: зведення будівель з саморегулюючою системою компенсації усадок ґрунтів; несучі конструкції будівель, що здійснюють моніторинг власного напружено-деформованого стану, захищають конструкції та покрівлі, акумулюють енергію Сонця тощо. Також одним із актуальних напрямків застосування наноматеріалів буде енергозбереження, адже без застосування нанотехнологій неможлива повноцінна реалізація проектів енергонезалежного «пасивного будинку». Основною особливістю «пасивного будинку» (екодому, англ. *passivehouse*) є мале енергоспоживання та майже повна енергонезалежність, що забезпечується використанням всього спектру можливостей збереження тепла та самовиробництва енергії. Наприклад, напівпрозорі нанопокриття мають властивість накопичувати сонячну енергію як сонячні батареї, що значно знизить витрати на електричну енергію. Високі звуко- та теплоізоляційні характеристики мають такі наноматеріали як прозорі наногелі (аерогелі), тому їх починають застосовувати в енергозберігаючих покрівельних системах з верхнім світлом [1, 7, 15].

Майбутнє будівельного матеріалознавства багато в чому пов'язане із застосуванням нанотехнологічних підходів до дизайну матеріалу чи виробу, що полягає в контрольованому та керованому впливі на процес структуроутворення, починаючи з нанорозмірного рівня. Результатом такого підходу буде одержання нових за складом та конструкційних, теплоізоляційних, оздоблювальних та інших матеріалів, що повністю відповідають сучасним тенденціям розвитку архітектурних форм, конструктивних рішень та технології зведення об'єктів промислового і цивільного призначення. Водночас, варто пам'ятати, що одним із основних недоліків впровадження нанотехнологічних інновацій у будівельну галузь

служить їхня кінцева собівартість. Так, наприклад, вартість синтетичних вуглецевих нанотрубок діаметром 40...60 нм вказана 250 у. о. за 1 грам. Було розраховано, що за вартості наноматеріалів 3 у. о. за 1 грам, навіть з введенням їх кількості 0,005 % від маси цемент, вартість модифікованого продукту збільшується приблизно у 2 рази. Тому раціональним є пошук технологій синтезу наномодифікаторів вартістю не вище 2 грн. за 1 грам [12].

Для серійного запровадження нанотехнологій та наноб'єктів у виробництві будівельних матеріалів необхідно запровадити виробництво доступних наноматеріалів та створення технології їх синтезу, яка задовольнила будівельну галузь своєю якістю та ціною. В Україні вже розроблено і запатентовано 2 способи одержання нанотрубок. Перший спосіб полягає в отриманні нанотрубок з різних продуктів та відходів коксування (кокс, смола, пековий кокс, пил), що значно знизує їх вартість. Отримані таким чином вуглецеві нанооб'єкти можна використати як компоненти композиційних матеріалів, домішки до бетону, пігменти. За другим способом цільовий продукт вилучають з циркулюючої води циклу мокрого гасіння кам'яновугільного коксу. Спосіб дозволяє отримувати наноматеріали з вугільної шихти, що дає можливість в декілька разів зменшити вартість та запровадити ширше використання даного наноматеріалу [12].

Висновки та пропозиції. Будівництво є тією галуззю, від стану якої залежить майбутнє країни. Перед будівельною галуззю стоїть серйозне завдання щодо зміцнення своїх позицій на вітчизняному ринку та виходу на зовнішні ринки. Як ніколи сьогодні потрібні новаторські ідеї по розвитку будівельної галузі, нові будівельні технології і матеріали майбутнього. Це, передусім, наноматеріали і нанотехнології, оскільки вони мають високий потенціал для застосування в цивільному будівництві завдяки їх унікальним властивостям: надзвичайній міцності, довговічності, енергозбереженню. Крім того, наночастинки також можуть забезпечити абсолютно нові можливості структурних композитів, а саме самоочищення, самовідчуття та антимикробну дію. Майбутнє будівельного матеріалознавства – отримання нових по складу і таких, що якісно відрізняються по структурі і властивостям конструкційних, теплоізоляційних, обробних і інших матеріалів, що повною мірою відповідають сучасним тенденціям розвитку архітектурних форм, конструктивних рішень і технології зведення об'єктів промислового і цивільного призначення. Перспективними напрямками використання високоміцного нанобетону є будівництво залізобетонних конструкцій, об'єктів з підвищеними вимогами до пожежної безпеки та сейсмостійкості, зокрема, хмарочосів, великопрольотних мостів, захисних оболонок атомних реакторів, дамб, магістралей, шлюзів морських та річкових портів, аеродромів.

В Україні перспектива розвитку виробництва будівельних наноматеріалів і нанотехнологій може полягати в розробці і впровадженні власних наукових методик і технологій виготовлення на основі власної дешевої сировини (різних продуктів та відходів коксування, металургійної промисловості). Окрім того, цікавими є перспективи введення частинок дещо більшого, ніж нано-, розмірів задля здешевлення технології отримання.

Список літератури

1. Балан О.С. Нанотехнології в будівництві. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 5. С. 7-14.
2. Волчок І.П., Капустян О.Є. Фундаментальні основи нанотехнологій: конспект лекцій для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя: НУ "Запорізька політехніка", 2021. 209 с.
3. Дерев'янюк В.Н., Кушнерова Л.О., Мороз Л.В., Мороз В.Ю. Технології та використання наносистем у виробництві будівельних матеріалів. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі і споруди. Збірник наукових праць*. м. Рівне. 2020. Вип 38. С. 140-147.
4. Дудикевич В.Б., Собчук І.С., Ракобовчук В.О. Пасивний захист інформації від лазерного випромінювання. *Вісник національного університету "Львівська політехніка"*. м. Львів. 2013. Вип. 753. С. 118-123.
5. Заячук Д.М. Нанотехнології і наноструктури: навч. посібник для студ. вищ. навч. закл. Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2009. 581 с.
6. Згалат-Лозинська Л.О., Згалат-Лозинський О.Б. Активізація використання наноматеріалів та нанотехнологій як напрям інноваційної діяльності у будівництві. *Будівельне виробництво*. 2019. №68. С. 30-38.
7. Корольов Е.В. Нанотехнології в будівельному матеріалознавстві. Аналіз стану та досягнень. Шляхи розвитку. *Будівельні матеріали*. 2014. №11. С. 47-77.
8. Мороз Л.В. Модифікація в'язучих та бетонів шляхом нанотехнологій. Огляд досягнень. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2020. № 3(90). С. 44-51.
9. Наноматериалы и нанотехнологии: учеб. для студентов вузов / В.А. Богуслаев, А.Я. Качан, Н.Е. Калинина [и др.]. Запорожье: Мотор Сич, 2014. 207 с.
10. Наноматеріали і нанотехнології: навч. посіб. / М.О. Азаренков, І.М. Неклюдов, В.М. Береснев [та інш.]. Харків: Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, 2014. 323 с.
11. Нанотехнології і наноматеріали. URL: <https://materials-lab.com.ua/Nanotehnologiyi-i-Nanomaterialy>. (дата звернення 12.01.23).
12. Панов Є.М., Шилович Т.Б., Шилович Я.І. Перспективи розробки та дослідження наномодифікованих композиційних будівельних матеріалів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. м. Вінниця. 2018. Вип. 3. С. 7-13.
13. Поплавко Ю.М., Борисов О.В., Якименко Ю.І. Нанофізика, наноматеріали, наноелектроніка: навч. посіб. Київ: Національний технічний університет України "КПІ", 2012. 299 с.
14. Присяжна О.В. Основи нанотехнологій функціональних та конструкційних матеріалів: навч. посіб. для студентів усіх спец. КНУБА / О.В. Присяжна; Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. Київ: КНУБА, 2014. 179 с.

15. Системи високих технологій: навч. посібник / В.І. Сігова, В.Г. Хижняк, І.А. Медведєв [та ін.]; МОНМС України, Сум. обл. ін-т післядиплом. пед. освіти. Суми: Ніко, 2013. 396 с.
16. Фесенко О.М., Ковальчук С.В., Ницик Р.А. Проблеми та перспективи розвитку нанотехнологій в Україні та світі. *Маркетинг і менеджмент інновацій*. 2017. №1. С. 170-179.
17. Ahmed M.A., Hassanean Y.A., Assaf K.A., Shawkey M.A. Fascinating improvement in mechanical properties of cement mortar using multiwall carbon nanotubes and ferrite nanoperticles. *Int. J. Struct. Civ. Eng. Res.* 2015. Vol.4. P. 159-170.
18. Hossain K., Rameeja Sh. Importance of Nanotechnology in Civil Engineering. *European Journal of Sustainable Development*. 2015. Vol. 4. № 1. P. 161-166. Doi: 10.14207/ejsd.2015.v4n1p161.
19. Krystek, M., & Górski, M. (2018). Nanomaterials in Structural Engineering. In M.R. Pagnola, J.U. Vivero, & A.G. Marrugo (Eds.), *New Uses of Micro and Nanomaterials*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79995>.
20. Land G., Stephan D. Controlling cement hydration with nanoparticles. *Cement & Concrete Composites*. 2015. Vol. 57. P. 64–67.
21. Mohajerani A., Burnett L., Smith J.V. et al. Nanoparticles in Construction Materials and Other Applications, and Implications of Nanoparticle Use. *Materials (Basel)*. 2019. Vol. 12. №19:3052. doi: 10.3390/ma12193052.
22. Moini M., Zavattieri P. D., Youngblood J. P. Early-age buildability-rheological properties relationship in additively manufactured cement paste hollow cylinders. *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 131. №3: 104538. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2022.104538.
23. Peyvandi A., Sbia. L., Soroushian P., Sobolev K. Effect of the cementitious paste density on the performance efficiency of carbon nanofiber in concrete nanocomposite. *Construction and Building Materials*. 2013. №48. P. 265-269.
24. Utsev T., Tiza T. M., Mogbo O. et al. Application of nanomaterials in civil engineering. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 62, № 8. P. 5140-5146. Doi: 10.1016/j.matpr.2022.02.480.
25. Zelenskii O., Shmalko V., Panov E., Shylovykh T., Shylovykh Y., Rudkevich M. Modification of ceramics and ceramic glazers with carbon nanoadditives, and properties of the modified materials. *Chemistry & Chemical Technology*. 2019. Vol. 13, No 2. P. 247 – 253.

PhD, associate professor **Holyk Jolana**,
PhD, associate professor **Diana Kajnts**,
PhD student **Diana Vantyukh**,
Uzhhorod National University

CLASSIFICATION OF NANOMATERIALS AND THE OPPORTUNITIES OF THEIR USE IN CIVIL ENGINEERING

The article analyzes the concept of nanomaterials, their classification by particle size, varieties and physicochemical properties, modern possibilities of obtaining nanomaterials using nanotechnology. According to the terminology above, nanomaterials can be divided into four main categories: nanomaterials with little

number of structural elements or nanomaterials in the form of nanoproducts; nanomaterials with many structural elements (crystallites) or nanomaterials in the form of microproducts; massive (or bulk) nanomaterials with the size of products from them in the macro range; composite materials containing components of nanomaterials. The prospects for the use of nanomaterials in civil engineering were investigated. Methods of obtaining nanomaterials (controlled creation of a nanostructure in the bulk of the material, obtaining raw materials, purposeful creation of material, material surface engineering) are described.

In particular, the properties of nanomodified concrete, steel, reinforcement, ceramics, and glass are highlighted. The foreign experience of using nanomaterials in civil engineering was studied. The state and prospects of the use of nanoparticle-modified building materials in Ukraine are highlighted. The search for alternative methods of obtaining nanomaterials by introducing into their composition economically justified substances, available at the time of obtaining and, at the same time, capable of improving the service life of products when modifying particles of several increased sizes, was carried out. The search for alternative methods of obtaining nanomaterials by introducing into their composition economically justified substances, available at the time of obtaining and, at the same time, capable of improving the service life of products when modifying particles of several increased sizes, was carried out.

Key words: nanomaterials; nanotechnologies; nanostructures; building materials; structural composites; nanocomposite fittings.

REFERENCES

1. Balan O.S. Nanotekhnologii v budivnytstvi. Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury. 2021. № 5. S. 7-14. {in Ukrainian}
2. Volchok I.P., Kapustian O.Ye. Fundamentalni osnovy nanotekhnologii: konspekt leksii dlia stud. vyshch. navch. zakl. Zaporizhzhia: NU "Zaporizka politekhnik", 2021. 209 s. {in Ukrainian}
3. Derevianko V.N., Kushnierova L.O., Moroz L.V., Moroz V.Yu. Tekhnologii ta vykorystannia nanosystem u vyrobnytstvi budivelnykh materialiv. Resursoekonomni materialy, konstruktzii, budivli i sporudy. Zbirnyk naukovykh prats. m. Rivne. 2020. Vyp 38. S. 140-147. {in Ukrainian}
4. Dudykevych V.B., Sobchuk I.S., Rakobovchuk V.O. Pasyvnyi zakhyst informatsii vid lazernoho vyprominiuvannia. Visnyk natsionalnogo universytetu "Lvivska politekhnik". m. Lviv. 2013. Vyp. 753. S. 118-123. {in Ukrainian}
5. Zaiachuk D.M. Nanotekhnologii i nanostruktury: navch. posibnyk dlia stud. vyshch. navch. zakl. Lviv: Vyd-vo Nats. un-tu "Lvivska politekhnik", 2009. 581 s. {in Ukrainian}

6. Zghalat-Lozynska L.O., Zghalat-Lozynskyi O. B. Aktyvizatsiia vykorystannia nanomaterialiv ta nanotekhnolohii yak napriam innovatsiinoi diialnosti u budivnytstvi. *Budivelne vyrobnytstvo*. 2019. №68. S. 30-38. {in Ukrainian}
7. Korolov E.V. Nanotekhnolohii v budivelnomu materialoznavstvi. Analiz stanu ta dosiahnen. *Shliakhy rozvytku. Budivelni materialy*. 2014. №11. S. 47-77. {in Ukrainian}
8. Moroz L.V. Modyfikatsiia viazhuchykh ta betoniv shliakhom nanotekhnolohii. *Ohliad dosiahnen. Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv*. 2020. № 3(90). S. 44-51. {in Ukrainian}
9. *Nanomaterialy y nanotekhnolohyy: ucheb. dlia studentov vuzov* / V.A. Bohuslaev, A.Ya. Kachan, N.E. Kalynyna [y dr.]. Zaporozhe: Motor Sych, 2014. 207 c. {in russian}
10. *Nanomaterialy i nanotekhnolohii: navch. posib.* / M.O. Azarienkov, I.M. Nekliudov, V.M. Beresniev [ta insh.]. Kharkiv: Kharkivskyi natsionalnyi universytet im. V.N. Karazina, 2014. 323 s. {in Ukrainian}
11. *Nanotekhnolohii i nanomaterialy*. URL: <https://materials-lab.com.ua/Nanotehnologiyi-i-Nanomaterialy>. Accessed on: January 12, 2023. {in Ukrainian}
12. Panov Ye.M., Shylovykh T.B., Shylovykh Ya.I. *Perspektyvy rozrobky ta doslidzhennia nanomodyfikovanykh kompozytsiinykh budivelnykh materialiv*. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. m. Vinnytsia*. 2018. Vyp. 3. S. 7-13. {in Ukrainian}
13. Poplavko Yu.M., Borysov O.V., Yakymenko Yu.I. *Nanofizyka, nanomaterialy, nanoelektronika: navch. posib.* Kyiv: Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy "KPI", 2012. 299 s. {in Ukrainian}
14. Prysiashna O.V. *Osnovy nanotekhnolohii funktsionalnykh ta konstruktsiinykh materialiv: navch. posib. dlia studentiv usikh spets.* KNUBA / O. V. Prysiashna; Kyiv. nats. un-t bud-va i arkhitektury. Kyiv: KNUBA, 2014. 179 c. {in Ukrainian}
15. *Systemy vysokykh tekhnolohii: navch. posibnyk* / V.I. Sihova, V.H. Khyzhniak, I.A. Medvediev [ta in.]; MONMS Ukrainy, Sum. obl. in-t pisliadyplom. ped. osvity. Sumy: Niko, 2013. 396 c. {in Ukrainian}
16. Fesenko O.M., Kovalchuk S.V., Nytskyk R.A. *Problemy ta perspektyvy rozvytku nanotekhnolohiyi v Ukraini ta sviti. Marketynh i menedzhment innovatsii*. 2017. №1. S. 170-179. {in Ukrainian}
17. Ahmed M.A., Hassanean Y.A., Assaf K.A., Shawkey M.A. Fascinating improvement in mechanical properties of cement mortar using multiwall carbon nanotubes and ferrite nanoperticles. *Int. J. Struct. Civ. Eng. Res.* 2015. Vol.4. P. 159-170. {in English}

18. Hossain K., Rameeja Sh. Importance of Nanotechnology in Civil Engineering. *European Journal of Sustainable Development*. 2015. Vol. 4. № 1. R. 161-166. Doi: 10.14207/ejsd.2015.v4n1p161. {in English}
19. Krystek, M., & Górski, M. (2018). Nanomaterials in Structural Engineering. In M.R. Pagnola, J.U. Vivero, & A.G. Marrugo (Eds.), *New Uses of Micro and Nanomaterials*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79995>. {in English}
20. Land G., Stephan D. Controlling cement hydration with nanoparticles. *Cement & Concrete Composites*. 2015. Vol. 57. R. 64–67. {in English}
21. Mohajerani A., Burnett L., Smith J.V. et al. Nanoparticles in Construction Materials and Other Applications, and Implications of Nanoparticle Use. *Materials (Basel)*. 2019. Vol. 12. №19:3052. doi: 10.3390/ma12193052. {in English}
22. Moini M., Zavattieri P. D., Youngblood J. P. Early-age buildability-rheological properties relationship in additively manufactured cement paste hollow cylinders. *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 131. №3: 104538. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2022.104538. {in English}
23. Peyvandi A., Sbia. L., Soroushian P., Sobolev K. Effect of the cementitious paste density on the performance efficiency of carbon nanofiber in concrete nanocomposite. *Construction and Building Materials*. 2013. №48. R. 265-269. {in English}
24. Utsev T., Tiza T. M., Mogbo O. et al. Application of nanomaterials in civil engineering. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 62, № 8. R. 5140-5146. Doi: 10.1016/j.matpr.2022.02.480. {in English}
25. Zelenskii O., Shmalko V., Panov E., Shylovykh T., Shylovykh Y., Rudkevich M. Modification of ceramics and ceramic glazers with carbon nanoadditives, and properties of the modified materials. *Chemistry & Chemical Technology*. 2019. Vol. 13, No 2. R. 247 – 253. {in English}