

УДК 691-4, 69.001.5, 69.07

к.т.н., доцент Кривенко О.В.,
knuba.o.v.k@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1709-2621,
Київський національний університет будівництва та архітектури

ДО ПИТАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ В ВИСОТНОМУ БУДІВНИЦТВІ

Досліджується розвиток будівельних матеріалів та технологій з прив'язкою до вирішення задач висотної забудови (у період з кінця 19 сторіччя до нашого часу). Більше уваги приділено сучасним інноваційним можливостям щодо застосування наноматеріалів та нанотехнологій у висотній забудові. Визначені характеристики основних будівельних матеріалів при застосуванні нанотехнологій, що використовуються у висотному будівництві. Аналіз використання наноматеріалів у конструктивних рішеннях та опорядженні висотної будівлі представлено на прикладі перспективного проекту висотної будівлі.

Ключові слова: висотна забудова, будівельні матеріали та технології, наноматеріали та нанотехнології

Постановка проблеми та аналіз досліджень. Історія розвитку висотних будівель ґрунтується на еволюції матеріалів та технологій [1,2]. Характерною особливістю всіх етапів розвитку висотної забудови було застосування в них новітніх на свій період часу інженерно-технічних систем та будівельних матеріалів. Саме такий підхід забезпечував розвиток і надбання висотної та надвисотної забудови.

Сучасна висотна забудова визначається різними підходами щодо вирішення завдань подолання висоти, забезпечення міцності, стійкості, довговічності, пожежної безпеки, дотримання енергоефективних та екологічних вимог, які нормуються [3]. Вимоги до будівельних матеріалів та технологій при зведенні висотних будівель є складними та мають відповідати відразу багатьом параметрам. Відповідно до сучасних вимог будівельні матеріали, з яких виконують конструкції висотних будівель, мають бути надміцними при зменшенні їх ваги та об'ємів та при підвищенні опору дії вогню, воді та інших чинників. Сучасні будівельні матеріали, крім забезпечення звичних функцій (конструктивні, огорожуючі, оздоблювальні), мають виконувати інші функції - по енергозабезпеченню будівель, контролю за станом конструкцій, мати можливості самовідновлення, самоочищення та інше.

Поява нових форм і вимог до сучасних висотних будівель визначила появу інноваційних будівельних матеріалів, технологій з параметрами, які задовольняють новим комплексним експлуатаційним вимогам та раніше були недоступні з технічної точки зору.

Мета статті – зробити аналіз та визначити напрями використання інноваційних матеріалів і технологій при проектуванні та будівництві висотних будівель

Об'єкти дослідження – висотні та надвисотні будівлі.

Предмет дослідження – характеристики та особливості застосування інноваційних будівельних матеріалів, технологій при проектуванні та будівництві висотних будівель.

Основна частина. Будівельні матеріали та технології відіграють рушійну роль в розвитку висотної забудови. Саме застосування сталевих каркасів на межі 19 - 20 сторіч надало можливість зменшити вагу конструкцій, відійти від кам'яних матеріалів та стінової конструктивної системи, що забезпечило зростання будівель вгору. Сталеві каркаси переважали при будівництві хмарочосів до кінця 20 сторіччя (рис.1а) та довели свою надійність, якість та довговічність.

З кінця 20 сторіччя новітні тенденції в об'ємно-планувальних рішеннях хмарочосів, підвищення вимог до стійкості, надійності при збільшенні їх висоти дали новий поштовх до розвитку та застосування інноваційних будівельних матеріалів та технологій. Вже у 2010 році висотність хмарочосів сягає відмітки 828м – зводиться надвисотна будівля Бурдж Халіфа, м.Дубаї, ОАЕ, де застосовуються новітні технології по виготовленню та зведенню бетонних конструкцій.

Відповідно до статистичних даних [4], частка бетону як основного конструктивного матеріалу у 2018 році, склала 62,9% - із 143 новозбудованих хмарочосів висотою 200 метрів і вище 90 будівель зведені з залізобетону (рис. 1 б).

З кінця 20 сторіччя на заміну бетону та сталі у «чистому вигляді» приходять нові композитні матеріали, а також змішані системи з використанням різних будівельних матеріалів по висоті будівлі. Так, у 2018 році частка висотних будівель, де були застосовані композитні структури, які використовують більше одного матеріалу в основних і допоміжних елементах, становила 35% (50 будівель). "Змішані" структури, які використовують різні будівельні матеріали по висоті будівлі, склали 1,4% від загальної кількості висотних будівель, а сталеві конструкції лише 0,7% від загальної кількості висотних новобудов у 2018р [4] .

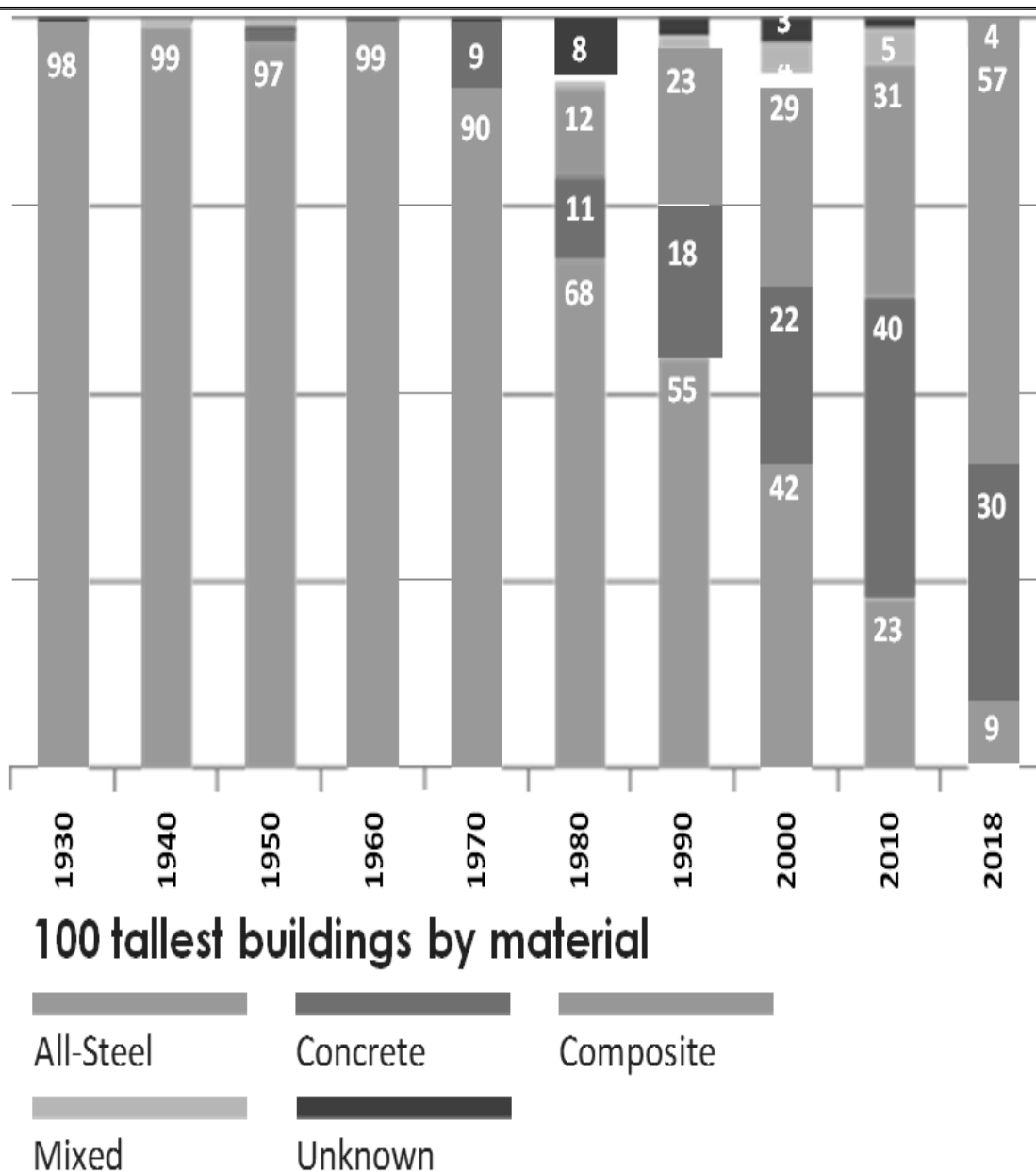
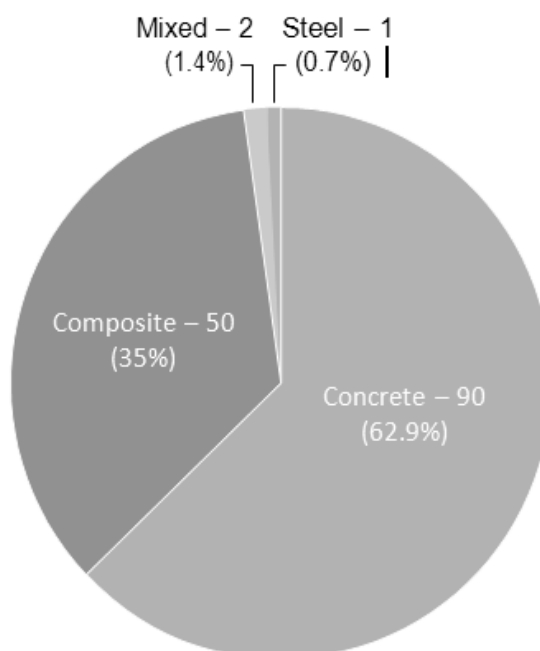


Рис.1 Застосування будівельних матеріалів в висотному будівництві згідно даних CTBUH Year in Review: Tall Trends of 2018 [4]; а – аналіз 100 найвищих будівель за будівельними матеріалами в світі у період з 1930-2018 рік; б – використання будівельних матеріалів в хмарочосах висотою 200м у світі у 2018 році



У 21 сторіччі висотність будівель продовжує зростати. На сьогодні будуються та проектується будівлі, які сягають висотної відмітки у 1000 метрів. Основою такого розвитку висотної забудови є науково-технічний прогрес, в тому числі управління якостями матеріалів на нано рівні.

«Нано» (nanos грецькою - карлик) - означає одну мільярдну долю метра $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$. Як зазначив відомий фізик, Нобелівський лауреат Ж. Алфьоров: «Якщо при зменшенні об'єму якоїсь речовини по одній, двом чи трьом координатам до розмірів нанометрового масштабу виникає нова якість чи ця якість виникає в композиції з таких об'єктів, у такому випадку такі утворення можна віднести до наноматеріалів, а технології їх утворення та подальшу роботу з ними – до нанотехнологій» [5,6].

Застосування наноматеріалів та нанотехнологій може здійснити революцію в висотному будівництві. Нанотехнології надають технічні рішення, що потребують для їх реалізації мінімальну кількість речовини та енергії. Вже сьогодні за рахунок застосування нанотехнологій забезпечується: посилення арматури, сталі і бетону при зменшенні їх ваги та об'ємів, підвищення опору будівельних матеріалів дії вогню і води; збільшення ефективності сонячних батарей та багато іншого.

Основними будівельними матеріалами, в яких використовуються нанотехнології у висотному будівництві є: цемент, бетон, кераміка, ізоляційні матеріали, скло, фарби, арматура. Розглянемо більш детально деякі з них.

Нанотехнології в бетоні. Бетон - капілярно-пористий матеріал. У його пори потрапляє вода та інші агресивні речовини, що знижує його довговічність. Якщо пористу структуру бетону заповнити іншим матеріалом, наприклад полімером, - ми отримуємо практично непроникний бетон з високою морозостійкістю з підвищеною міцністю. Якщо звичайний бетон має міцність в 20 МПа, нанобетон - 200 МПа. Переваги наномодифікованого бетону: зменшення ваги, матеріаломісткості, збільшення хімічної стійкості та довговічності до 500 років [5] .

Композитна арматура. Перспективною альтернативою звичайному сталевому аналогу фахівці вважають композитну арматуру. Композитна арматура – неметалеві стрижні із скляних, базальтових, вуглецевих волокон, які просочені полімерами. Такий наноматеріал має цілий ряд унікальних властивостей. Так, композитна арматура володіє малою питомою вагою (в 4-5 разів менше ніж сталь), хімічно стійка та високоміцна, має підвищені деформаційні властивості, що дає можливість приймати різну форму при армуванні чи транспортуванні. Композитна арматура відноситься до діелектриків, має низьку теплопровідність і не схильна до корозії. У перспективі композитна арматура може стати «розумною» і запам'ятовувати

різні форми та змінювати свої характеристики залежно від температурних або інших впливів [6].

Вуглецеве волокно це матеріал на основі вуглецю. Вуглецеві волокна і вуглецеві стрічки володіють низькою питомою вагою, низьким коефіцієнтом температурного розширення, хімічною стійкістю і високою силою натягу. Вуглецеве волокно і вуглецеві стрічки використовуються для посилення будівельних конструкцій. Наприклад, вуглеволокно застосовується для підвищення міцності та несучої спроможності перекриттів, колон, фундаментних плит [7].

Нанопарба - рідкий керамічний теплоізолятор. Має структуру, яка працює як багатопшарова фольга, що має в якості прошарків розріджене повітря. Таким чином - 1 м² поверхні товщиною 1мм відбиває інфрачервоне тепло так само ефективно як 50 м² фольги з камерами з розрядженого повітря між ними. Крім того, нанопарба (наприклад керамоізол) стійка до атмосферних опадів і перепадів температур, до впливу сонячного і радіаційного випромінювання, має низький коефіцієнт теплопровідності, антикорозійні та водонепроникнені властивості, стійка до механічних ушкоджень та інше [6,7].

Кремнієві сонячні панелі. Для підвищення ефективності перетворення сонячного світла в електричну енергію пропонуються нанотехнології, які зменшують вартість кремнієвих сонячних елементів у десять разів. Це органічні тонко плівкові та пластикові сонячні елементи, в основі яких лежить використання наночастинок та полімерів (наприклад, нанокристалічні кремнієві чорнила). Перевагою органічних тонких плівок є їх гнучкість, що дозволяє подолати естетичні та функціональні проблеми, з якими стикаються архітектори при інтегруванні у фасади будівлі звичайних жорстких плоских сонячних панелей[10].

Нанодатчики. За їх допомогою проводиться моніторинг показників стану оточуючого середовища (вологості, температури, швидкості вітру), контроль за станом матеріалів та конструкцій (рівень зношеності, корозії, цикли замороження – відтавання та інше). В основі нанодатчиків використовуються мікроелектромеханічні системи (MEMs) з нано шкалою вимірювань. Розмір нанодатчиків 10⁻⁹, 10⁻⁵м, що дозволяє вбудовувати їх в структурні компоненти матеріалів [11].

Аналіз можливого використання наноматеріалів в конструктивних рішеннях та опорядженні висотної будівлі також представлений на прикладі перспективного проекту висотної будівлі, розробленого в рамках курсової роботи (рис 2,3).

Ядро жорсткості -

модифікований вуглецевими трубками нанобетон з композитною склоарматурою. Більша міцність на стиск та згин ніж у звичайного залізобетона та менша на третину власна вага, стійкість до утворення тріщин

Композитні ванги з

вуглетрубок/структурованого поліетилену. Надвисока міцність, стійкі до впливу середовища. Розрив тільки після видовження на 350% Модифікована наночастками Si сталь з композитним нанопокриттям. Надвисока міцність, довговічність, стійкість до корозії

Внутрішні колони з

композиту нанобетону, вуглетканини та склоарматури мають значно вищу несучу здатність за звичайний залізобетон, термін служби до 500 років, кращу вогнестійкість, меншу власну вагу. Інтегровані в матеріали нано сенсори/актуатори аналізують стан конструкцій дистанційно



Рис. 2. Використання наноматеріалів в несучих конструктивних елементах висотного будинку на прикладі перспективного проекту

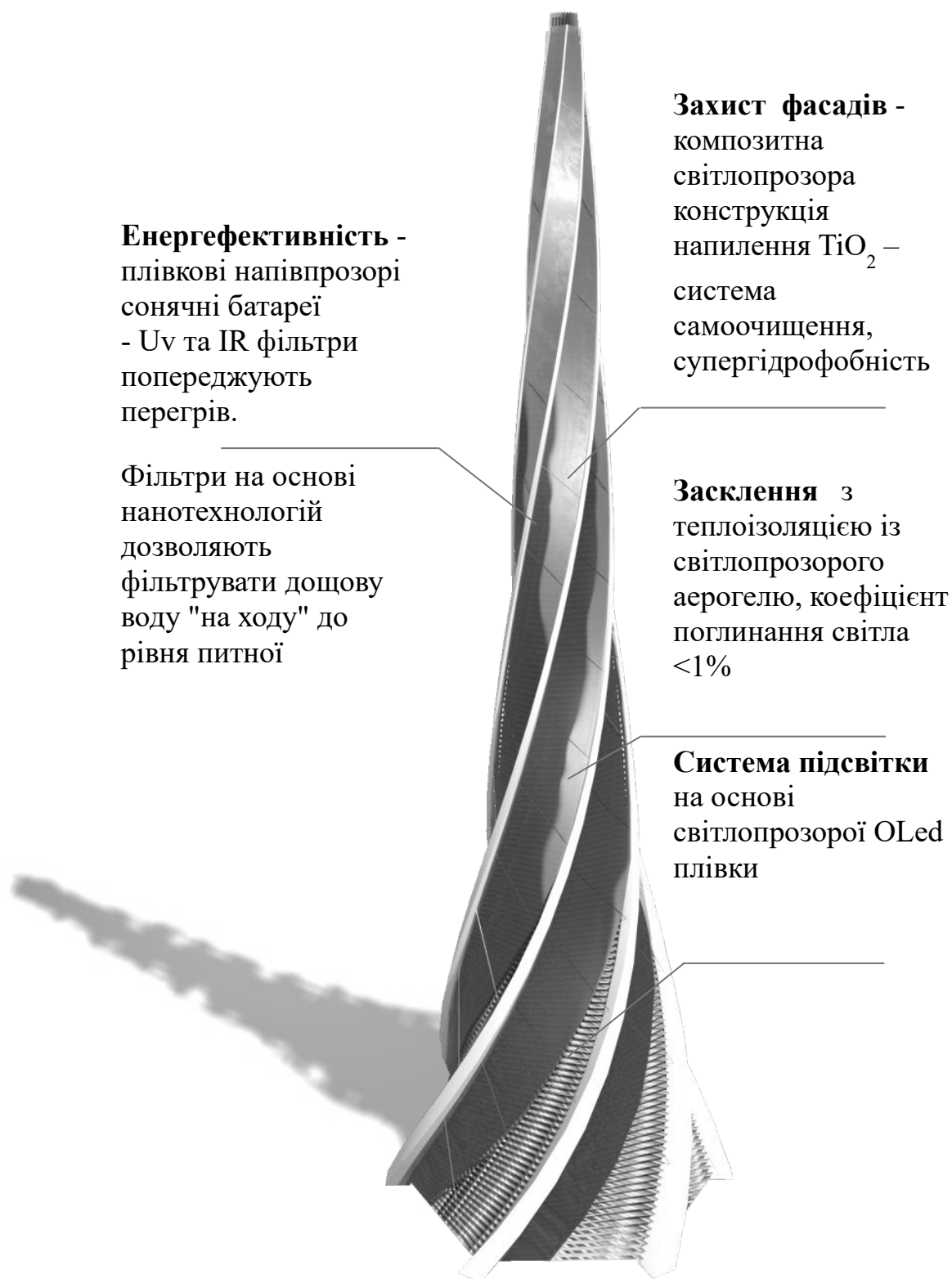


Рис. 3. Використання наноматеріалів в опорядженні висотного будинку на прикладі перспективного проекту

Висновки.

Розвиток висотних будівель в наш час виходить на рівень зведення інтелектуальних споруд із наближенням принципів їх функціонування аналогічно до природних систем (наприклад, біорозкладні, що не впливають на екологію). Досвід запровадження нанотехнологій в будівництві показує перспективність їх подальшого розвитку із підвищенням характеристик з економії енергії, зниженням залежності від ресурсів, зменшенням відходів та викидів, зручністю в обслуговуванні, забезпеченням здорового середовища. Переваги для будівництва висотних будівель із застосуванням інноваційних матеріалів та технологій і саме нанотехнологій, перш за все стосуються використання ізоляційних матеріалів, досягнень в області сонячної енергетики, освітленості, конструкційних матеріалів, очищення води та повітря, протипожежного захисту. Досягнення щодо інтеграції нанотехнологій в будівництво висотних будівель наближають їх до нового рівня якості в забезпеченні екологічного та енергоефективного, довговічного та безпечного середовища висотної забудови.

Але слід зазначити і проблеми застосування нанотехнологій, які обмежують їх розвиток у будівництві висотних будівель. До них слід віднести: обмеження по застосуванню через високу собівартість продукції та неефективну застарілу виробничу базу; недостатню обізнаність щодо потенційного впливу на оточуюче середовище та здоров'я людей при виробництві, транспортуванні, використанні та утилізації наноматеріалів [12].

Проведення подальших тематичних досліджень щодо області застосування, впливу та обмежень при застосуванні наноматеріалів та нанотехнологій призведуть до більш свідомого та безпечного використання цих інноваційних технологій у висотному будівництві [13].

Апробація результатів досліджень

Результати досліджень запровадженні в навчальний процес при викладанні курсу «Сучасні конструкції» для студентів шостого курсу архітектурного факультету в лекційному курсі та при розробці курсових робіт.

Список використаних джерел

1. Ковальський Л.М., Кузьміна Г.В., Г.Л.Ковальська. Архітектурне проектування висотних будинків. Навчальний посібник за загальною редакцією Л.М. Ковальського. – К.: КНУБА, 2010. – 123 с
2. Маклакова, Т.Г. Высотные здания. Градостроительные и архитектурно-конструктивные проблемы проектирования: монография / Т.Г. Маклакова. - М.: Издательство АСВ, 2008. - 160 с.

3. ДБН В.2.2-24-2009. Проектування висотних житлових і громадських будинків. – Введено вперше. – Чинні від 2009-09-01. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 105 с.
4. Tall Building Completions Maintain Momentum in 2018 : CTBUH Year in Review: Tall Trends of 2018 <http://www.skyscrapercenter.com/year-in-review/2018>, available online: <http://www.skyscrapercenter.com/year-in-review/2018>
5. F. Pacheco-Torgal, S. Jalali, S., “Nanotechnology: Advantages and drawbacks in the field of construction and building materials”, *Construction and Building Materials*, 25, 2011, pp. 582-590
6. A.K. Rana, S.B. Rana, A. Kumari, V. Kiran, V., “Significance of Nanotechnology in Construction Engineering”, *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 1(4), 2007, pp. 46-48.
7. J. Saurav, “Application of nanotechnology in building materials”, *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2 (5), 2012, 1077-1082.
8. P.J.M. Bartos, “Nanotechnology in construction: a roadmap for development”, In Z. Bittnar, P. J. M. Bartos, J. Nemecek, V. Smilauer, J. Zeman (eds.), *Nanotechnology in Construction: Proceedings of the NICOM3 (3rd International Symposium on Nanotechnology in Construction)*, Prague, 2009, pp. 15–26.
9. J.E. Ioeppel, “Mimicking biological systems, composite material heals itself,” press release, University of Illinois at Urbana-Champaign, available online: <http://www.news.uiuc.edu/scitips/01/0214selfheal.html> [Accessed on April 2014].
10. B. Walsh, “Environmentally Beneficial Nanotechnologies”, *Food and Rural Affairs*, May 2007, available online: www.defra.gov.uk/environment/nanotech/policy/pdf/envbeneficial-report.pdf Accessed on May 2014.
11. G. Song, H. Gu, Y. Mo, “Smart aggregates: Multi-functional sensors for concrete structures—a tutorial and a review”, *Smart Materials and Structures*, 17 (3), 2008, 033001.
12. M.R. Weisner, G.V., Lowry, P. Alvarez, D. Dionysiou, P. Bisnas, “Assessing the risk of manufactured nanomaterials”, *Environmental Science and Technology*, 40 (14), 2006, pp. 4336-4345.
13. J. Lee, S. Mahendra, P. J. J. Alvarez, “Potential environmental and human health impacts of nanomaterials used in construction industry”, In Z. Bittnar, P.J.M. Bartos, J. Nemecek, V. Smilauer, J. Zeman (eds.), *Nanotechnology in Construction: Proceedings of the NICOM3 (3rd International Symposium on Nanotechnology in Construction)*, Prague, 2009, pp. 1-14.

к.т.н., доцент Кривенко О.В.,

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ В ВЫСОТНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В статье исследуется развитие строительных материалов и технологий с привязкой к решению задач высотной застройки (в период с конца 19 века до наших дней). Проанализированы последние статистические данные использования строительных материалов при строительстве небоскребов в мире.

Цель статьи - сделать анализ и определить направления использования инновационных материалов и технологий при проектировании и строительстве высотных зданий. Объекты исследования - высотные и сверхвысотные здания. Предмет исследования - характеристики и особенности применения инновационных строительных материалов, технологий при проектировании и строительстве высотных зданий.

В XXI веке высотность зданий продолжает расти, строятся и проектируются здания, которые достигают высотной отметки в 1000 метров. При высоких требованиях по обеспечению в них надежности, экологичности и энергоэффективности. Потому особое внимание следует уделить использованию современных инновационных возможностей по применению наноматериалов и нанотехнологий в небоскребах. Уже сегодня за счет применения нанотехнологий обеспечивается: усиление арматуры, стали и бетона при уменьшении их веса и объемов, повышения сопротивления строительных материалов действию огня и воды, увеличение эффективности солнечных батарей и многое другое.

Определены характеристики основных строительных материалов при применении нанотехнологий и рассмотрены более подробно: нанотехнологии в бетоне, композитная арматура, углеродное волокно, нанокраски, кремниевые солнечные панели, нанодатчики. Определены существующие ограничения по их использованию.

Проведен анализ применения наноматериалов в конструктивных решениях и отделке высотного здания на примере перспективного проекта высотного здания.

Ключевые слова: высотная застройка, строительные материалы и технологии, наноматериалы и нанотехнологии

Ph.D in Technical Science, Senior Research Associate Krivenko O.V.,
Kyiv National University of Building and Architecture

TO A QUESTION OF USE OF INNOVATIVE CONSTRUCTION MATERIALS AND TECHNOLOGIES IN HIGH-RISE CONSTRUCTION

This article examines development of construction materials and technologies for high-rise buildings (in a period from the end of 19 century to our days). The latest statistical data of use of building materials at the construction of skyscrapers in the world have been analysed.

The purpose of article is analysis and definition of the direction of use of innovative materials and technologies at design and construction of high-rise buildings. The objects of a research are high-rise and superhigh-rise buildings. The subject of research is characteristics and features of use of innovative construction materials, technologies at design and construction of high-rise buildings.

In the 21st century altitude of buildings continues to grow. The buildings, which reach the an elevation mark of 1000 meters with high requirements to ensure their reliability, environmental friendliness and energy efficiency are being designed and built. Special attention should be paid to use of modern innovative opportunities for use of nanomaterials and nanotechnologies in skyscrapers. Already today through the use of nanotechnology it is provided: strengthening of fittings, steel and concrete while reducing their weight and volumes, increases the resistance of construction materials to the action of fire and water, increasing the efficiency of solar cells and much more.

The characteristics of the main construction materials at application of nanotechnologies are determined and considered in more detail: nanotechnologies in concrete, composite fittings, carbon fiber, nanocolors nanopaints, silicon solar panels, nano-sensors. The existing restrictions on their use are defined.

The analysis of nanomaterials in constructive decisions and decoration of high-rise building on the example of the perspective project of the high-rise building is carried out.

Keywords: high-rise building, construction materials and technologies, nanomaterials and nanotechnologies.

REFERENCES

1. Kovalskyi L.M., Kuzmina G.V. Arkhitekturne proektuvannia vysotnykh budynkiv [Architectural design of skyscrapers]. Kyiv, KNUBA Publ., 2009. 121 p.

2. Maklakova T.G. Vysotnye zdaniya. Gradostroitelnye i arkhitekturno-konstruktivnye problemy proektirovaniya: monografiya [High-rise buildings. Urban planning and architectural design design issues]. Moscow, ASV Publ., 2008. 160 p
3. Minrehionbud Ukrayiny, 2009. DBN V.2.2-24-2009 Proektuvannya vysotnykh zhytlovykh i hromads'kykh budynkiv. Kyiv: Minrehionbud Ukrayiny. 105 p. (in Ukrainian).
4. Tall Building Completions Maintain Momentum in 2018 : CTBUH Year in Review: Tall Trends of 2018 <http://www.skyscrapercenter.com/year-in-review/2018>, available online: <http://www.skyscrapercenter.com/year-in-review/2018>.
5. F. Pacheco-Torgal, S. Jalali, S., “Nanotechnology: Advantages and drawbacks in the field of construction and building materials”, Construction and Building Materials, 25, 2011, pp. 582-590
6. A.K. Rana, S.B. Rana, A. Kumari, V. Kiran, V., “Significance of Nanotechnology in Construction Engineering”, International Journal of Recent Trends in Engineering, 1(4), 2007, pp. 46-48.
7. J. Saurav, “Application of nanotechnology in building materials”, International Journal of Engineering Research and Applications, 2 (5), 2012, 1077-1082.
8. P.J.M. Bartos, “Nanotechnology in construction: a roadmap for development”, In Z. Bittnar, P.J.M. Bartos, J. Nemecek, V. Smilauer, J. Zeman (eds.), Nanotechnology in Construction: Proceedings of the NICOM3 (3rd International Symposium on Nanotechnology in Construction), Prague, 2009, pp. 15–26.
9. J.E. Ioeppel, “Mimicking biological systems, composite material heals itself,” press release, University of Illinois at Urbana-Champaign, available online: <http://www.news.uiuc.edu/scitips/01/0214selfheal.html> [Accessed on April 2014].
10. B. Walsh, “Environmentally Beneficial Nanotechnologies”, Food and Rural Affairs, May 2007, available online: www.defra.gov.uk/environment/nanotech/policy/pdf/envbeneficial-report.pdf Accessed on May 2014.
11. G. Song, H. Gu, Y. Mo, “Smart aggregates: Multi-functional sensors for concrete structures—a tutorial and a review”, Smart Materials and Structures, 17 (3), 2008, 033001
12. M.R. Weisner, G. V., Lowry, P. Alvarez, D. Dionysiou, P. Bisnas, “Assessing the risk of manufactured nanomaterials”, Environmental Science and Technology, 40 (14), 2006, pp. 4336-4345.
13. J. Lee, S. Mahendra, P.J.J. Alvarez, “Potential environmental and human health impacts of nanomaterials used in construction industry”, In Z. Bittnar, P.J.M. Bartos, J. Nemecek, V. Smilauer, J. Zeman (eds.), Nanotechnology in Construction: Proceedings of the NICOM3 (3rd International Symposium on Nanotechnology in Construction), Prague, 2009, pp. 1-14.