

Аналіз ефективності використання високоміцних бетонів у стиснутих елементах монолітних каркасних будівель

Analysis of the effectiveness of using high-strength concrete in compressed elements of monolithic frame buildings

**Ротко С.В., к.т.н., доц., Ужегова О.А., к.т.н., доц.,
Задорожнікова І.В., к.т.н., доц., Рябий О.І., магістр (Луцький
національний технічний університет, Луцьк)**

**Rotko S., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Uzhehova O.,
Ph.D. in Engineering, Zadoroznikova I., Ph.D. in Engineering, Associate
Professor, Ryabiy O.I., master (Lutsk National Technical University, Lutsk)**

У роботі наведено матеріали з дослідження ефективності використання високоміцних бетонів при зведенні багатопверхових монолітних каркасних будівель. Встановлено, що використання бетонів високих класів замість традиційних у колонах нижніх поверхів дозволяє одержати економію на матеріалах за рахунок зменшення їх поперечного перерізу.

Traditionally, reinforced concrete is the most common material for constructing multi-story civil buildings. Modern construction is characterized by a significant increase in the number of storeys of buildings and at the same time a significant increase in the complexity of architectural solutions. Therefore, high-strength concretes are quite popular materials, especially in implementing ambitious architectural projects, where it is necessary to ensure high strength and reliability of structural elements.

The issue of increasing the strength and durability of concrete has long been on the agenda of scientists around the world. Many of them believe that the main method of improving the physical, mechanical construction, and operational indicators of concrete is to ensure the quality of its micro- and mesostructure, i.e., high density, impermeability, and minimal cracking.

It has been proven that the use of high-quality aggregates, highly active cement, and a low W/C ratio is the simplest and most economical way to obtain high-strength concrete using traditional manufacturing technology.

Among the advantages of using high-strength concretes are higher early strength, the possibility of early stripping (and therefore, earlier commissioning of the facility), increased load-bearing capacity, reduced costs for formwork due to a reduction in the cross-section of structural elements (respectively, a reduction in the weight of the latter, and therefore, the load on the structures below). This, in turn, will contribute to a reduction in the volumes of concrete and reinforcement, i.e., the installation mass of the elements, and, accordingly, a reduction in transport costs for the delivery of materials. Important advantages are also higher density, water and gas impermeability due to a reduction in

capillary pores, increased resistance to chemically active substances; high corrosion resistance, and therefore, protection of reinforcement; and reduced costs for formwork.

The paper studies the feasibility of using high-strength concrete for the manufacture of vertical elements operating in compression - columns and pylons of multi-story residential buildings.

To study the effectiveness of the use of high-strength concrete, a monolithic 13-story frame residential building with commercial premises located on the first floor was taken. The calculation was carried out in the MONOMAKH-SAPR PC using the finite element method (FEM).

The study found that replacing concrete in columns of class C20/25 with concrete of class C50/60 allowed a total economic effect of 223,693 thousand UAH due to the reduction in the cross-sectional dimensions of the columns and the reduction in the cost of reinforcing steel. The savings on materials amounted to 17.9%. It is also important that the useful area of the building increased when the cross-sections of the columns were reduced, which will also have a significant economic effect.

Therefore, we can conclude that it is economically feasible to use high-strength concrete for columns of multi-story buildings, especially in high-rise construction.

Ключові слова: високоміцні бетони, колони, каркасні будівлі економічна ефективність.

Keywords: high-strength concrete, columns, frame buildings, cost-effectiveness.

Вступ. Традиційно протягом останніх десятиліть найпоширенішим матеріалом для зведення багатопверхових цивільних будівель є залізобетон. Сучасне будівництво характеризується значним ростом поверховості будівель і водночас – суттєвим підвищенням складності архітектурних рішень. А тому високоміцні бетони є досить затребуваними матеріалами, особливо – при реалізації амбітних архітектурних проєктів, де необхідно забезпечити високу міцність і надійність конструктивних елементів.

Аналіз досліджень і публікацій. Питання підвищення міцності та довговічності бетонів уже давно стоять на порядку денному перед вченими всього світу. Багато з них вважає, що основним методом підвищення фізико-механічних і будівельно-експлуатаційних показників бетону є забезпечення якості його мікро- та мезоструктури, тобто, висока щільність, непроникність і мінімальне тріщиноутворення [1, 2, 6, 7].

Високоміцними конструкційними (важкими та надважкими) бетонами вважають бетони з міцністю на стиск 60-130 МПа [3] або міцність яких вища за 6000 psi, тобто понад 41 МПа [4].

Згідно з вітчизняними стандартами [5], що адаптовані до Європейських норм EN 206-1:2000, високоміцний бетон відповідає класу за міцністю вище C50/60 (до C100/115). Отже, кубикова міцність бетону має бути не нижче 60 МПа.

Основними перевагами високоміцних бетонів вважають серед іншого високу ранню міцність, яка дозволяє швидше зняти опалубку, підвищену несучу здатність, можливість зменшувати перерізи конструктивних елементів, а отже, знижувати витрати бетону та арматури, матеріалів на опалубку. Можна говорити також про зниження транспортних витрат на доставку матеріалів. Зменшені перерізи конструкцій передаватимуть менше навантаження на нижчерозташовані конструкції, зокрема, на фундаменти, що знову ж таки дозволить суттєво зекономити на матеріалах.

До важливих переваг високоміцних бетонів над традиційними можна віднести вищу щільність структури, водо- та газонепроникність – через зменшення капілярних пор. А ще – підвищену хімічну та корозійну стійкість, а отже, захист арматури [1, 2, 6, 7, 9].

Завдяки використанню високоякісних бетонів нового покоління, стійких до впливу морської води, світ побачив за останні десятиліття чимало унікальних проектів мостів. Серед них – Akashi Kaikyo Bridge (Японія) – один із найдовших підвісних мостів у світі, Erasmusbrug (Роттердам, Голандія), Rùnyáng Chángjiāng Dàqiáo (Жуньянський міст, Китай), залізничний міст Цинма (Гонконг, Китай), міст-акведук (Магдебург, Німеччина) [8].

Відомі хмарочоси Burj Khalifa (Дубай), Shanghai Tower (Шанхай), PETRONAS (Куала-Лумпур, Сінгапур), Абрадж аль-Бейт (Мекка, Саудівська Аравія), Taipei 101 (Тайбей), Two Prudential Plaza (Чикаго, США) зведені з використанням високоміцних бетонів для забезпечення стійкості до сильних вітрів і землетрусів [8].

В Україні теж зводять висотні будівлі, на сьогодні їх 31 (20 – висотою від 100 до 125 м, 9 – від 125 до 150 м, 2 – понад 200 м). Загалом у Києві збудовано понад тисячу будівель висотою понад 35 м, це дозволяє столиці займати восьме місце у світовому рейтингу (після Нью-Йорка (6097), Торонто (2393), Дубая (1574), Токіо (1319), Гонконгу (1293), Шанхая (1234) і Чикаго (1233) [10]. Тому тема використання високоміцних бетонів є актуальною.

Мета роботи – дослідити ефективність використання високоміцних бетонів для виготовлення вертикальних елементів, що працюють на стиск, – колон і пілонів багатоповерхових житлових будівель.

Виклад основного матеріалу. У дослідженні було розглянуто монолітну 13-ти поверхову каркасну житлову будівлю з комерційними приміщеннями на першому поверсі. Розрахунок виконували у ПК МОНОМАХ-САПР методом скінченних елементів (МСЕ). Розрахункова модель наведена на рис.1.

Будівлю розраховували на всі діючі навантаження: постійне – від власної ваги конструкцій (при цьому навантаження від перегородок

задавали навантаженням на плиту), змінне – корисне на перекриття, короточасні – снігове на покриття і вітрове згідно з [11].

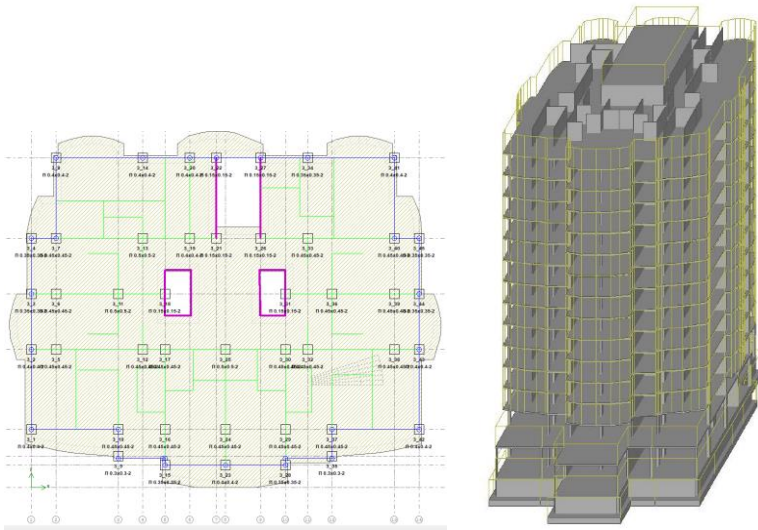


Рис. 1. Розрахункова схема типового поверху та 3D-модель будівлі

Оскільки найбільш завантаженими в багатопверхових будівлях є колони та пілони нижніх поверхів, то очевидно, що саме в цих елементах буде максимальна кількість підбраної програмою арматури. Конструювання елементів виконується програмою згідно з [12, 13].

При проведенні дослідження у першому варіанті для вертикальних конструкцій будівлі було задано бетон класу C20/25. При цьому в першому наближенні розміри перерізу колон не фіксували. У результаті отримали підібраний програмою переріз середніх колон першого поверху 450x450 і 500x500 мм і крайніх – 400x400 мм.

Далі клас бетону колон було змінено на C50/60 і знову проведено розрахунок у першому наближенні, без фіксації розмірів перерізів колон. Результатом цього розрахунку стали підібрані програмою перерізи середніх колон першого поверху 350x350 і 400x400 мм і крайніх – 300x300 мм.

Після детального аналізу отриманих результатів зміни перерізів колон з висотою, було виконано фіксацію і уніфікацію розмірів перерізів і заново виконано розрахунки. При цьому брали до уваги зміну перерізів по висоті для кожного варіанта. Так, для першого (C20/25) на нижніх трьох поверхах середні колони прийнято перерізом 500x500 мм, а крайні – 400x400 мм. Починаючи з четвертого, розміри перерізу зменшено до 450x450 мм і 350x350 мм, відповідно. З сьомого перерізи зменшені до

400х400 мм і 300х300 мм. З десятого – до 300х300 мм і 250х250 мм, відповідно.

Для другого варіанту з урахуванням оптимального використання високоміцного бетону (C50/60) на нижніх трьох поверхах середні колони прийнято перерізом 400х400 мм, а крайні – 300х300 мм. Починаючи з четвертого поверху, розміри перерізу зменшено до 350х350 мм і 300х300 мм, відповідно. З сьомого перерізи зменшені до 300х300 мм і 250х250 мм і клас бетону прийнято C20/25. З дев'ятого поверху перерізи всіх колон становитимуть 250х250 мм (клас бетону – C20/25).

Результати дослідження

У таблиці 1 наведені результати аналізу загальних витрат бетону та арматури за обома варіантами для зведення колон багатоповерхової будівлі. Вартість матеріалів (бетону та арматури) розрахована за цінами заводів-виробників [14, 15].

Таблиця 1
Обчислення економічного ефекту застосування високоміцного бетону для колон

Вар-т розр.	Витрати арматури, т	Варт. 1т арматури А500С, грн.	Об'єм бетону, м³	Ціна 1м³ бетону, грн.	Сумарна вартість матеріалів, тис. грн.	Економ. ефект, тис. грн. %
1	20,453	31849	188,98	3150 (C20/25)	1246,694	-
2	16,309	31849	45,26	3150 (C20/25)	1023,001	<u>1246,694</u> 17,9%
			71,46	5042 (C50/60)		

Аналізуючи одержані результати, робимо висновок про те, що заміна бетону колон класу C20/25 на бетон C50/60 дозволила одержати сумарний економічний ефект у розмірі 223,693 тис. грн., за рахунок зменшення розмірів поперечного перерізу колон і зниження витрат арматурної сталі.

У результаті зменшення розмірів поперечних перерізів (за рахунок використання бетону C50/60) середніх колон нижніх трьох поверхів з 500х500 мм до 400х400 мм і крайніх колон з 400х400 мм до 300х300 мм, з четвертого по шостий поверх – з 450х450 мм до 350х350 мм і з 350х350 мм до 300х300 мм, відповідно, а з сьомого до дев'ятого (бетон C20/25) – з 400х400 мм до 300х300 і з 300х300 мм до 250х250 мм, економія на матеріалах склала 17,9%. Важливим є й той факт, що при зменшенні перерізів колон збільшилась корисна площа будівлі, що теж матиме економічний ефект.

Отже, можна зробити висновок про економічну доцільність використання високоміцного бетону для колон багатоповерхових будівель, особливо при висотному будівництві.

Проте комплексна оцінка економічної ефективності використання високоміцних бетонів вимагає урахування низки факторів, таких, як: можливі додаткові витрати на проектування конструкцій, необхідність спеціального обладнання і кваліфікованого персоналу, ретельніший контроль якості за технологією виготовлення та укладання тощо.

Висновки та перспективи подальших досліджень

На прикладі 13-ти поверхової монолітної каркасної житлової будівлі було виконано розрахунок витрат бетону та арматури для колон у двох варіантах – із використанням традиційного важкого бетону класу C20/25 і високоміцного – класу C50/60. Встановлено, що високоміцний бетон дозволяє зменшити перерізи колон. У результаті заміни класу бетону на C50/60 кількість арматури колон зменшилась на 4,144 т у порівнянні з першим варіантом. Зменшення перерізів колон дозволило знизити витрати бетону на 72,26 м³, зменшивши цим навантаження на фундаментну плиту на 180,65 тонн. Економічний ефект від використання високоміцного бетону лише за матеріалами колон (бетон+арматура) склав 1246,694 тис. грн. (17,9%). Водночас, зменшення перерізів колон дозволяє збільшити корисну площу приміщень, що теж матиме суттєвий економічний ефект, особливо для багатоповерхових будівель.

Високоміцний бетон забезпечить підвищену міцність конструкцій, що особливо важливо для нижніх поверхів, які сприймають найбільші навантаження, та сейсмостійкість будівлі, що зменшить ризики руйнування та зменшує витрати на відновлення після землетрусів.

Проте при визначенні економічної ефективності від застосування високоміцних бетонів потрібно провести комплексну оцінку із урахуванням низки факторів. Зокрема, той факт, що високоміцний бетон вимагає ретельнішого контролю якості, дотримання технології виробництва та укладання, спеціального обладнання та кваліфікованого персоналу, може збільшити витрати на будівництво. Можливі також додаткові витрати на розрахунок і проектування конструкцій. Для оптимізації витрат варто застосовувати спеціалізоване програмне забезпечення.

References

1. Vysokomitsni shvydkotverdnuhi betony ta fibrobetony: monohrafiia / L.I. Dvorkin, Ye.M. Babych, V.V. Zhytkovskyi, O.M. Bordiuzhenko, S.V. Filipchuk, D.V. Kochkarov, I.V. Kovalyk. Rivne: NUVHP, 2017. 331 s.
2. Sydor N.I. Vysokomitsni betony z pidvyshchenoiu udarnoiu viazkistiu dlia promyslovykh pidloh: kand. tekhn. nauk (doktora filosofii): spets. 192. Budivnytstvo ta tsyvilna inzheneriia. Lviv: Nats. un-t «Lviv. Politekhnik», 2021.

3. SEV Bulletin of Information 197 – FIP, High strength concrete – State of the art report; SR 90/1-1990.
4. State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete // Reported by ACI Committee 363. ACI 363R-92 (Reapproved 1997), p. 363R-2.
5. DSTU B V.2.7-176:2008 Sumishi betonni ta beton. Zahalni TU. [Elektronnyi resurs]. – URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_2_7_176_2008_sumishi_betonni_ta_beton_zahalni_tu/5-1-0-1208.
6. Dvorkin L.I., Zhytkovskiy V.V., Makarenko R.M. Vysokomitsni betony: navchalnyi posibnyk / NUVHP, 2022. 216 s.
7. Dvorkin L.I. Betony spetsialnogo pryznachennia: navchalnyi posibnyk / K.: Vydavnychiy dim «Kondor», 2018. 354 s.
8. Kutsyk O. V. Analiz vykorystannia vysokomitsnogo betonu u suchasnomu budivnytstvi / O. V. Kutsyk, O. D. Zhuravskiy // Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia. 2016. Vyp. 61. S. 444-449. [Elektronnyi resurs]. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2016_61_57.
9. Rotko S.V., Riabyi O.I. Vysokomitsnyi beton: dotsilnist vykorystannia dlia kolon bahatopoverkhovykh budivel // Innovatsiini protsesy v haluzi dorozhnogo budivnytstva: zbirnyk tez dopovidei II Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii molodykh vchenykh ta studentiv (6 lystopada 2021 r., m. Lutsk) – Lutsk: Lutskiy NTU, 2024. – S. 73-75. [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: https://drive.google.com/file/d/1o_opa3hksqd3QCzy78yns-NxAOqcEhmR/view10. Naivyschi budivli v sviti 2024 rik. [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://proverka.com.ua/naivyschi-budivli-v-sviti.html>
11. DBN V.1.2-2:2006. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia. Kyiv: MINBUD Ukrainy, 2006. 75c.
12. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia: DBN V.2.6. 98:2009. [Chynnyi vid 01.06.2011]. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2011. 72 s.
13. DSTU B V.2.6-156: 2010. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii z vazhkoho betonu. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2010.
14. Beton vid Kovalskoi. [Elektronnyi resurs]. – URL: <https://beton.kovalska.com>
15. Armatura, klas A-400/500. [Elektronnyi resurs]. – URL: https://stalmira.ua/hot-rolled-steel/viewitem/armatura-40?gad_source=1&gclid=cj0kcqjwz7c2bhdkarisaa_szk5iwlcm2k3nzojobrqrqy_pihmxbe1oxaqgylt29o5syqebu0_g84aav3kealw_wcb

Література

1. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони: монографія / Л.Й. Дворкін, Є.М. Бабич, В.В. Житковський, О.М. Бордюженко, С.В. Філіпчук, Д.В. Кочкар'ов, І.В. Ковалик. Рівне: НУВГП, 2017. 331 с.
2. Сидор Н.І. Високоміцні бетони з підвищеною ударною в'язкістю для промислових підлог: канд. техн. наук (доктора філософії): спец. 192.

- Будівництво та цивільна інженерія. Львів: Нац. ун-т «Львів. Політехніка», 2021.
3. CEB Bulletin of Information 197 – FIP, High strength concrete – State of the art report; SR 90/1-1990.
 4. State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete // Reported by ACI Committee 363. ACI 363R-92 (Reapproved 1997), p. 363R-2.
 5. ДСТУ Б В.2.7-176:2008 Суміші бетонні та бетон. Загальні ТУ. [Електронний ресурс]. – URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_2_7_176_2008_sumishi_betonni_ta_beton_zagalni_tu/5-1-0-1208.
 6. Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Макаренко Р.М. Високоміцні бетони: навчальний посібник / НУВГП, 2022. 216 с.
 7. Дворкін Л.Й. Бетони спеціального призначення: навчальний посібник / К.: Видавничий дім «Кондор», 2018. 354 с.
 8. Куцик О. В. Аналіз використання високоміцного бетону у сучасному будівництві / О. В. Куцик, О. Д. Журавський // Містобудування та територіальне планування. 2016. Вип. 61. С. 444-449. [Електронний ресурс]. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2016_61_57.
 9. Ротко С.В., Рябий О.І. Високоміцний бетон: доцільність використання для колон багатоповерхових будівель // *Інноваційні процеси в галузі дорожнього будівництва: збірник тез доповідей II Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих вчених та студентів (6 листопада 2021 р., м. Луцьк)* – Луцьк: Луцький НТУ, 2024. – С. 73-75. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://drive.google.com/file/d/1o_opa3hksqd3QCzy78yNs-NxAOqcEhmR/view
 10. Найвищі будівлі в світі 2024 рік. [Електронний ресурс]. – URL: <https://proverka.com.ua/naivyshchi-budivli-v-sviti.html>
 11. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ: МІНБУД України, 2006. 75с.
 12. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6. 98:2009. [Чинний від 01.06.2011]. К.: Мінрегіонбуд України, 2011. 72 с.
 13. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. К.: Мінрегіонбуд України, 2010.
 14. Бетон від Ковальської. [Електронний ресурс]. – URL: <https://beton.kovalska.com>
 15. Арматура, клас А-400/500. [Електронний ресурс]. – URL: https://stalmira.ua/hot-rolled-steel/viewitem/armatura-40?gad_source=1&gclid=cj0kcqjwz7c2bhdkarisaa_szkb5iwlcm2k3nzojobrqrqy_pihmxbe1oxaqgyltz9o5syqebu0_g84aav3kealw_wcb