

УДК 691:662.6 [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-9\(19\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-9(19)-12)

**ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ БАГАТОКОМПОНЕНТНОГО
ЛИТОГО БЕТОНУ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТА МОДЕРНІЗАЦІЇ
ОБ'ЄКТІВ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ МІСТА**

**RESEARCH OF THE STRENGTH OF MULTICOMPONENT CAST
CONCRETE FOR THE RECONSTRUCTION AND MODERNIZATION
OF HEAT SUPPLY FACILITIES OF THE CITY**

Ксьоншкевич Л.М., к.т.н., доц., Барабаш І.В., д.т.н., професор (Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса), Синій С.В., к.т.н., доц. (Луцький національний технічний університет, Луцьк), Крантовська О.М., к.т.н., доц., Мостовий С.М., інженер (Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса)

Ksonshkevych L.M., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Barabash I.V., Doctor of Engineering, Professor (Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa), Synii S.V., Ph.D. in Engineering, Associate Professor (Lutsk National Technical University, Lutsk), Krantovska O.M., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Mostovyi S. M., engineer (Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa)

Розглянуто застосування багатокомпонентного литого бетону із використанням золи-винесення (матеріалу відходів теплових станцій) при проведенні робіт з реконструкції та модернізації об'єктів генерації та постачання теплової енергії, які у складі інженерних мереж належать до критичної інфраструктури. Застосування дослідженого литого бетону (з підвищенням вмісту золи-винесення у в'язучому на 15-20 % без зниження при цьому міцності бетонних зразків) дозволяє збільшити ефективність його використання для монолітних перекриттів будівель та споруд генерації тепла та мереж теплопостачання при впровадженні сценаріїв теплопостачання у схемах теплопостачання міст враховуючи формування інтегрованих теплових мереж.

The application of multi-component cast concrete with the use of fly ash (waste material of thermal stations) in the reconstruction and modernization of facilities of generation and supply of thermal energy, which are part of engineering networks a belong to critical infrastructure, is considered.

Deals with the impact of mechanical activation on the change in strength characteristics of cast concrete on a cement-sol binder with the addition of fiber and plasticizing additives. The share of fly ash in the binder was taken from 0 to 80 %. C-3 superplasticizer was used to increase the performance of the concrete mixture. Vauson-basalt basalt fiber with a length of 6-12 mm and a diameter of 13-18 μm was a filler (it was dosed in a dry mixture). The preparation of the concrete mixture was carried out in

a forced action laboratory mixer. Portland cement, fly ash and basalt fiber were dosed by weight. Two parallel series of experiments were performed (according to traditional technology; using mechanoactivation of the suspension). After mixing for 120 seconds, water with a dosed amount of the additive was introduced into the mixture. Concrete strength was determined for 7 and 28 days. A joint study of influencing factors - mechanical activation, fly ash, with a determined concentration of C-3 and basalt fiber, allows to increase the strength at the 28th day of age by 25-30 %.

The use of the studied cast concrete (with an increase in the content of fly ash in the binder by 15-20% without reducing the strength of concrete samples) allows to increase the efficiency of its use for monolithic ceilings of buildings and structures of heat generation and heat supply networks when implementing heat supply scenarios in schemes heat supply of cities, taking into account the formation of integrated heat networks.

Ключові слова: зола-винесення, литий бетон, механоактивація, базальтова фібра, суперпластифікатор, реконструкція, модернізація, теплопостачання.

Keywords: fly ash, cast concrete, mechanical activation, basalt fiber, superplasticizer, reconstruction, modernization, heat supply.

Постановка проблеми. Бетон залишається одним із найбільш широко застосовуваних будівельних матеріалів у світі [1-4 та ін.]. Актуальність використання його в сучасних умовах, що склалися на території України, беззаперечна. Адже наслідком цілеспрямованих воєнних дій є часткове чи повне руйнування на усій території країни значної кількості об'єктів критичної інфраструктури (особливо характерне для місць активних бойових дій та прифронтових територій), які потребують термінового відновлення. Причому, велика частка серед них припадає на об'єкти енергозабезпечення міста, враховуючи об'єкти теплопостачання – будівлі та споруди генерації та транспортування тепла (ТЕС, котельні, насосні станції і т.п.) у складі централізованих мереж теплопостачання промислової, громадської, житлової забудови та інших зон міської інфраструктури. У зв'язку з цим, актуальним для впровадження заходів удосконалення або створення нових сценаріїв теплопостачання у схемах теплопостачання міст враховуючи потребу розширення виробничих площ будівель та споруд для розвитку інтегрованих теплових мереж [5-7] є збільшення використання ресурсоекономних технологій виробництва та влаштування бетонних сумішей.

Сучасне виробництво цементу є енергомістким та екологічно шкідливим, тому застосування промислових відходів залишається одним з актуальних напрямків його розвитку у світі [1-4, 8-16]. До актуальних сировинних компонентів для виготовлення бетону належить такий матеріал відходів теплових станцій як зола-винесення [1, 3, 8-11, 14, 15].

Аналіз відомих досліджень і публікацій. Розвиток будівельної галузі під впливом високих екологічних та економічних вимог спричинив ріст світового виробництва бетонів зі зниженою витратою цементу, у тому

числі – за рахунок заміни частини цементу у в'язучому на зола-винесення [1, 3, 8-11, 14, 15]. Високу конкурентоспроможність таких бетонів в умовах існуючих в Україні потреб швидкої та масштабної відбудови та реконструкції об'єктів критичної інфраструктури забезпечує їх міцність, довговічність, економічність, краща екологічна безпека, стійкість до руйнувань будівельних конструкцій на їх основі, а також – широка доступність сировинних компонентів (поширена в усіх регіонах України багатолітня практика теплопостачання міст від ТЕС зумовила значні запаси золи-винесення, відповідно її склад може дещо різнитись [1 та ін.]). Ріст обсягів золи-винесення для виготовлення бетону сприяє її утилізації, а отже – покращенню екологічної ситуації територій розташування ТЕС. Зола-винесення має ряд властивостей, що позитивно впливають на цементний камінь та композити на його основі, її добавка підвищує пластифікуючу здатність портландцементу, знижує усадочні деформації, не потребує помелу [1 та ін.].

Однією з переваг застосування литого бетону є зручність технології його укладання при монолітному бетонуванні (передусім – за допомогою бетононасосів), а це спрощує та прискорює будівельні роботи, що особливо важливо для забезпечення їх високої продуктивності в існуючих чи перспективних для розвитку інтегрованих теплових мереж умовах відновлення, реконструкції, модернізації таких критично важливих об'єктів міської інфраструктури як об'єкти генерації та постачання теплової енергії (ТЕС, котельні, насосні та теплонасосні станції тощо). Застосуванням у литих сумішах пластифікаторів досягається суттєве скорочення їх водопотреби та зменшення навантаження на бетононасоси (також і за рахунок зменшення робочого тиску та його втрат), значне скорочення чи взагалі виключення використання вібраційних установок, тобто – зменшення енерговитрат, що особливо важливо для технології бетонування за умов використання електрогенераторів (мобільних електростанцій) через відсутність чи перерви електропостачання споживачів. Широкого поширення набуло застосування бетонів для влаштування промислових підлог, монолітних перекриттів [8-11]. Причому економічно ефективно та доцільно виконувати шари промислової підлоги, захищені зверху шаром покриття, з бетону нижчої міцності та довговічності ніж бетон покриття [9].

Збільшення цін на портландцемент, подорожчання енергоносіїв, палива актуалізує дослідження, направлені на вирішення задач зниження матеріало-, енергоємності: виробництва будівельних матеріалів та виробів, будівельних технологій. Введення в портландцемент золи-винесення спільно з високоефективним хімічним модифікатором та базальтовою фіброю забезпечує спрямоване структуроутворення тверднучого цементного каменю, підвищення його міцності, а відповідно і бетонів на їх основі. Значно посилює ефект від спільного введення в портландцемент

золи-винесення, органічного модифікатора, фібри механоактивація в'язучого [15, 16]. Використання добавок дозволяє досягти заданих фізико-механічних характеристик бетонів поряд із значною економією портландцементу [1-4, 8-15]. До негативного впливу вмісту золи у в'язучому належить зниження міцності композитів, яке однак можна підвищити за рахунок механоактивації в'язучого, використання пластифікаторів, а також введення у склад цементозольної суспензії фібри, а саме базальтової [9, 15].

Мета статті – застосування механоактивації для приготування багатокомпонентного литого бетону на рядовому портландцементі, що може застосовуватись для реконструкції та модернізації об'єктів теплопостачання міста.

Основні завдання: виявити та проаналізувати сумісний вплив механоактивації, добавки золи-винесення, базальтової фібри, С-3 у портландцементі на характеристику міцності литого бетону, що може застосовуватись для реконструкції та модернізації об'єктів теплопостачання міста.

Виклад основного матеріалу. Витрату портландцементу ПЦ І-500 у базовому складі бетону задано у обсязі 400 кг/м³. Механоактивація цементозольного в'язучого здійснювалась 120 с з застосуванням частоти обертання швидкісного трибозмішувача 2800 об/хв, з наступною подачею активованої суспензії до тихохідного бетонозмішувача з дозованими компонентами бетонної суміші (задане співвідношення 1:1 фракцій по масі) – заповнювачами дрібним (кварцевий пісок, Мк = 2,5) та крупним (гранітний щебінь двох фракцій з розмірами, мм: 5-10; 10-20). Частка золи-винесення у в'язучому варіювалась від 0 до 80 %. Водоредукуючою добавкою (концентрація від 0 до 1% маси в'язучого), служить суперпластифікатор С-3, а наповнювачем – базальтова фібра Vauson-basalt розмірами: довжина 6-12 мм; діаметр 13-18 мкм. Водопотреба бетонної суміші визначилася за осадкою конуса Абрамса і складала 20 см.

Методикою експериментів передбачено порівняння результатів традиційної та прийнятої технології шляхом проведення двох паралельних серій експериментів: контрольної «к» та механоактивації «м» суспензії цемент + зола-винесення + суперпластифікатор С-3 + вода. Приготовлена суспензія змішувалася з дрібним та крупним заповнювачами в ординарному бетонозмішувачі. Визначення межі міцності при стиску бетону виконано за [16]. Міцність бетону при стиску визначалась шляхом випробування зразків-кубів з ребром 10 см у 7- та 28-добовому віці [16].

Згідно запланованої методики проведено 3-факторний експеримент для аналізу впливу на механічні характеристики литого бетону вмісту, у % від маси композитного в'язучого: золи-винесення в портландцементі (40 ± 40 %, фактор X1), базальтової фібри Vauson-basalt ($0,5 \pm 0,5$ %, фактор X2) і суперпластифікатора С-3 ($0,5 \pm 0,5$ %, фактор X3).

Відповідно до запланованих для варійованих факторів композитного в'язучого контрольної «к» та механоактивації «м» серій 3-факторного експерименту отримані чотири експериментально-статистичні (ЕС) моделі міцності бетону при стиску, відповідно по дві для 7- і 28-добового віку.

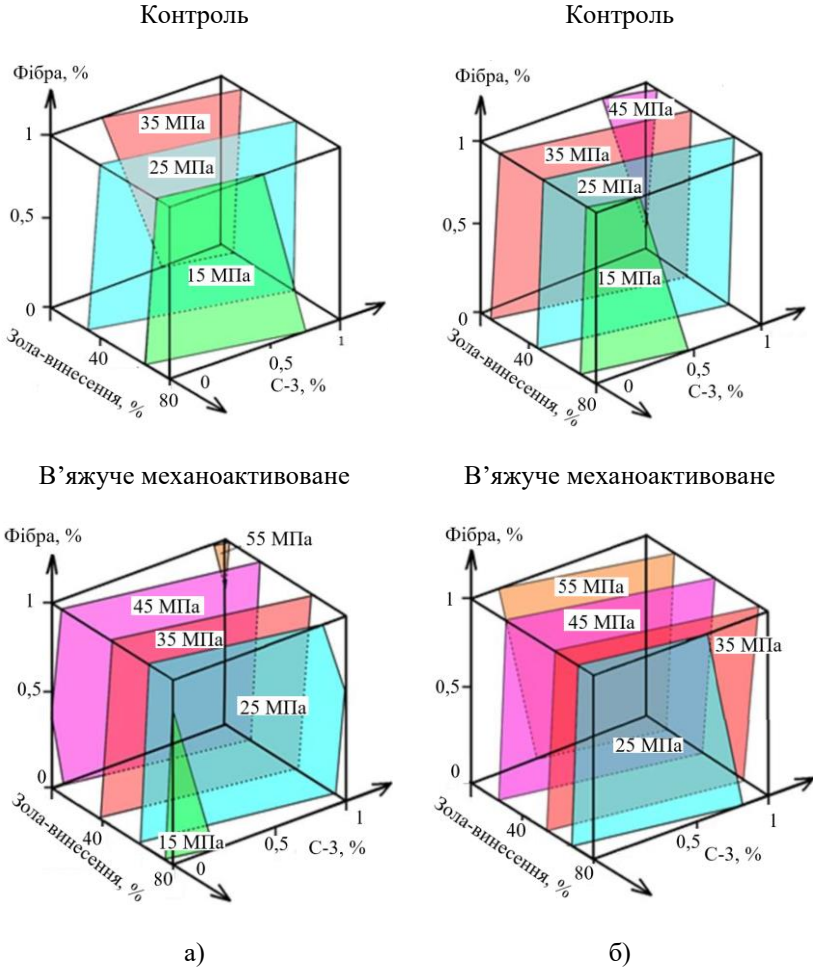


Рисунок 1. Вплив механоактивації на міцність бетону f_{cube} :
а – 7-а доба твердіння; б – 28-а доба твердіння

Аналіз побудованих полів властивостей за цими ЕС-моделями (рис. 1) показав, що введення пластифікатора С-3 суттєво вплинуло на міцність через зниження водопотребності бетонних сумішей з однаковою рухливістю.

Через збільшення частини золи-винесення у в'язучому від 0 до 80 % міцність бетону знижується. Загалом, склади на механоактивованому в'язучому у віці 7 діб (рис. 1,а) показували в середньому на 25 % більшу міцність, ніж контрольні. Це можна пояснити як поверхневою активацією в'язучого та наповнювача так і зниженням водопотреби сумішей.

Аналіз графічних залежностей за ЕС-моделями для віку 28 діб (рис. 1,б) свідчить про зниження міцності бетону при стиску із введенням у портландцемент золи-винесення (кожним додатковим 10 % вмісту золи-винесення відповідало зменшення міцності бетону в середньому на $3,5 \pm 1,0$ МПа) та незначне підвищення цієї міцності (до 5-10 %) з додавкою базальтової фібри до 1 %.

Зростання вмісту С-3 (0-1%) разом з механоактивацією цементозольного в'язучого дає приріст міцності (в порівнянні з контролем). Цей приріст більш відчутно в ранньому 7-добовому віці – 30-35 %, та менш відчутно в 28-добовому віці – 25-30 %.

Висновки. Досліджене сумісне застосування факторів впливу – механоактивації, золи-винесення, при визначеній концентрації С-3 і Vauson-basalt, завдяки якому досягнуто збільшення показника міцності цементного каменю в 28-добовому віці на 25-30 %. Це створює можливість виготовляти литі бетони з підвищенням вмісту золи-винесення у в'язучому на 15-20 %, не знижуючи при цьому міцності бетонних зразків (порівняно з контролем), із підтриманням марки в діапазоні 20-46 МПа. Застосування дослідженого багатокомпонентного литого бетону дозволяє збільшити ефективність його використання для потреб реконструкції та модернізації об'єктів теплопостачання міста (зокрема – монолітних перекриттів будівель та споруд генерації тепла та мереж теплопостачання) з метою ефективного впровадження сценаріїв теплопостачання у схемах теплопостачання міст враховуючи формування інтегрованих теплових мереж, передусім – за рахунок особливо актуальних в сучасних умовах, що склалися на території України, переваг технології виробництва та влаштування будівельних конструкцій з литих бетонів з підвищенням вмісту золи-винесення у в'язучому: ресурсоекономії (електроенергії, тепла, цементу), зменшенні забруднення навколишнього середовища, підвищенні темпів та продуктивності будівельних робіт, скороченні транспортно-логістичних зв'язків та утилізації відходів теплових станцій – золи-винесення.

References

1. Blikharskyi Z., Sobol K., Markiv T., Selejdak J. Properties of Concretes Incorporating Recycling Waste and Corrosion Susceptibility of Reinforcing Steel Bars. *Materials*. 2021. N 14(10). 2638. <https://doi.org/10.3390/ma14102638>
2. Andriichuk O.V. *Stalefibrobetonni lotky vodovidvedennia*. Lutsk, RVV Lutskoho NTU. 2018. 150 s.

3. Borziak O., Vandolovskyi S., Chajka V., Perestiuk V., Romanenko O. Effect of microfillers on the concrete structure formation. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 116. 01001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711601001>
4. Ksonshkevych L.M., Krantovska O.M., Synii S.V., Sunak P.O., Orešković M., Ksonshkevych A.S. High strength modified concrete for reconstruction of engineering structures and networks, roads. *Modern technologies and methods of calculations in construction*. Lutsk. LNTU. 2022. Vol. 18. P.52-60. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8\(18\)-07](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8(18)-07)
5. Metodyka rozroblennia skhem teplopостachannia naselenykh punktiv Ukrainy. Nakaz Minrehionu Ukrainy №235 vid 02.10.2020.
6. Схеми теплопостачання. Асоціація енергоаудиторів України (Доступ 01.05.2023). URL: <https://aea.org.ua/energy-audit/district-heating-schemes/>
7. Rozvytok tsentralizovanoho teplopостachannia – kluch do rozumnoi enerhosystemy v Ukraini. *Danfoss*. 01.11.2021. URL: <https://www.danfoss.com/uk-ua/about-danfoss/articles/dhs/modern-district-heating-enables-transition-to-smart-energy-system-in-ukraine/>
8. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L., Ryzhenko I.M. Modyfikovani lyti betony dlia samonivelovanykh pidloh. *Budivelni materialy ta vyroby*. 2014. N 1. S. 10-12.
9. Sydor N.I. *High strength concretes with high impact resistance for industrial floors*. PhD thesis in Eng. sc by spec. 192 Construction and civil engineering. Lviv, 2021.
10. Bondar A.V., Kovalskiy V.P., Ocheretniy V.P., Moroz D.V., Voznyuk I.M. Influence of mechanical activation of mineral components on the properties of lightweight compositions of cement dry mixtures for floors. *Visnyk ODABA*. 2019, Vol.74, P.82-94.
11. Marushchak U.D., Sydor N.I., Braichenko S.P., Margal I.V., Soltysik R.A. Modified fiber reinforced concrete for industrial floors. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*. 2019. Vol. 708. N 1. 012094. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012094>
12. Ksonshkevych L.M., Barabash I.V., Krantovska O.M., Synii S.V., Sunak P.O. Disperse reinforced concrete with polycarboxylate addition on a mechanically activated binder. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. N 1. 012092. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012092>
13. Ksonshkevych L., Krantovska O., Petrov M., Synii S., Uhl A. Investigation of the structure of cement stone, obtaining and optimization of high-strength concrete on mechanically activated binder. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. 03010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823003010>
14. El Fami N., Ez-zaki H., Boukhari A., Khachani N., Diouri Abdeljebbar. Influence of mechanical activation of fly ash on the properties of Portland cement mortars. *Materials Today: Proceedings*. Vol. 58, Part 4, 2022, P. 1419-1422. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.340>
15. Stechyshyn M.S., Sanytskyi M.A., Pozniak O.R., Bihun H.H. Fibroarmovani samouschilniuvalni betony z vysokym vmistom zoly vynesennia. *Visnyk NU "Lvivska politehnika"*. Serii: Teoriia i praktyka budivnytstva. 2015. 823. S.308-314.
16. DSTU B V.2.7-214:2009 Budivelni materialy. Betony. Metody vyznachennia mitsnosti za kontrolnymy zrazkamy. K, Minrehionbud Ukrainy, 2010.

Література

1. Blikharskyi Z., Sobol K., Markiv T., Selejdak J. Properties of Concretes Incorporating Recycling Waste and Corrosion Susceptibility of Reinforcing Steel Bars. *Materials*. 2021. N 14(10). 2638. <https://doi.org/10.3390/ma14102638>

2. Андрійчук О.В. *Сталефібробетонні лотки водовідведення*. Луцьк, РВВ Луцького НТУ. 2018. 150 с.
3. Borziak O., Vandolovskyi S., Chajka V., Perestiuk V., Romanenko O. Effect of microfillers on the concrete structure formation. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 116. 01001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711601001>
4. Ксьоншкевич Л.М., Крантовська О.М., Синій С.В., Сунак П.О., Орешкович М., Ксьоншкевич А.С. Модифіковані високоміцні бетони для реконструкції інженерних споруд та мереж, доріг. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк. ЛНТУ, 2022. Вип. 18. С. 52-60. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8\(18\)-07](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8(18)-07)
5. Методика розроблення схем тепlopостачання населених пунктів України. Наказ Мінрегіону України №235 від 02.10.2020.
6. Схеми тепlopостачання. *Асоціація енергоаудиторів України* (Доступ 01.05.2023). URL: <https://aea.org.ua/energy-audit/district-heating-schemes/>
7. Розвиток централізованого тепlopостачання – ключ до розумної енергосистеми в Україні. *Danfoss*. 01.11.2021. URL: <https://www.danfoss.com/uk-ua/about-danfoss/articles/dhs/modern-district-heating-enables-transition-to-smart-energy-system-in-ukraine/>
8. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Риженко І.М. Модифіковані літні бетони для самонівельованих підлог. *Будівельні матеріали та вироб.* 2014. №1. С. 10-12.
9. Сидор Н.І. *Високоміцні бетони з підвищеною ударною в'язкістю для промислових підлог*. Дис. докт. філософії, спец. 192 Будівництво та цивільна інженерія. НУ «Львівська політехніка», Львів, 2021.
10. Бондар А.В., Ковальський В.П., Очеретний В.П., Мороз Д.В., Вознюк І.М. Вплив механічної активації мінеральних складових на властивості полегшених складів цементних сухих сумішей для підлог. *Вісник ОДАБА*. 2019, Вип.74,С.82-94.
11. Marushchak U.D., Sydor N.I., Braichenko S.P., Margal I.V., Soltysik R.A. Modified fiber reinforced concrete for industrial floors. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. Vol. 708. N 1. 012094. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012094>
12. Ksonshkevych L.M., Varabash I.V., Krantovska O.M., Synii S.V., Sunak P.O. Disperse reinforced concrete with polycarboxylate addition on a mechanically activated binder. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. N 1. 012092. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012092>
13. Ksonshkevych L., Krantovska O., Petrov M., Synii S., Uhl A. Investigation of the structure of cement stone, obtaining and optimization of high-strength concrete on mechanically activated binder. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. 03010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823003010>
14. El Fami N., Ez-zaki H., Boukhari A., Khachani N., Diouri Abdeljebbar. Influence of mechanical activation of fly ash on the properties of Portland cement mortars. *Materials Today: Proceedings*. Vol. 58, Part 4, 2022, P. 1419-1422. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.340>
15. Стечишин М.С., Саницький М.А., Позняк О.Р., Бігун Г.Г. Фіброармовані самоущільнювальні бетони з високим вмістом золи винесення. *Вісник НУ "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва*. 2015. 823. С.308-314.
16. ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. К, Мінрегіонбуд України, 2010.