

УДК 691.32

ВИПРОБУВАННЯ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ ДЛЯ 3D-ДРУКУ З ДОСТУПНИХ МАТЕРІАЛІВ

Кандидати техн. наук С. В. Мірошніченко, А. В. Романенко,
аспіранти А. О. Рильський, С. В. Тютюкін

TESTING OF CONCRETE MIXTURES FOR 3D PRINTING USING LOCALLY AVAILABLE MATERIALS

PhD (Tech.) Miroshnichenko Sergii, PhD (Tech.) Romanenko Oleksandr,
PhD Student Rylskyi Andrii, PhD Student Tiutkin Sergii

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.352034>



***Анотація.** У статті наведено результати розроблення бетонної суміші для технології 3D-друку з використанням доступних у Харківській області матеріалів. Основну увагу приділено забезпеченню необхідних реологічних характеристик, які допомагають транспортувати суміш трубопроводами, сприяють її екструдуванию та формостійкості. Проаналізовано вплив типу і дозування суперпластифікаторів, а також поліпропіленової*

фібри на показники рухомості, щільності, міцності на стиск і згин. Наведено результати механічних випробувань зразків, виготовлених із експериментальної суміші, і визначено масштабний коефіцієнт для оцінювання міцності на балочках порівняно зі стандартними кубами. Розроблену суміш випробувано для друкування на промисловому 3D-принтері ТОВ «Геополімер», що дало змогу виявити низку технологічних особливостей, пов'язаних із застосуванням фібри.

Ключові слова: 3D-друк, бетон, фібра, реологічні властивості, міцність, добавки, суміш, екструзія.

Abstract The article presents the results of developing and testing a concrete mixture suitable for 3D-printing using locally available materials from the Kharkiv region of Ukraine. The research aimed to design a composition that meets the specific rheological and mechanical requirements of additive construction technologies while maintaining economic feasibility and material accessibility under regional market conditions. The study focuses on achieving optimal workability, extrusion stability, and structural integrity of the printed layers. Particular attention is given to the influence of superplasticizers and polypropylene fiber on the rheological behavior, density, and strength parameters of the concrete mixture. Experimental studies were conducted to determine the effect of different dosages and types of superplasticizers (C-3 and Master Silk) on flowability using a VZ-1 viscometer, which allowed the identification of an optimal content of 0.8 % for Master Silk without the need to increase the water-to-cement ratio. The role of polypropylene fiber with a length of 12 mm was also analyzed. It was found that the inclusion of 300–600 g/m³ of fiber provides the most stable compressive strength results (430–460 kgf/cm²) while maintaining adequate rheological properties. However, longer fibers caused technological complications during extrusion, such as fiber entanglement on the screw feeder, leading to periodic cleaning interruptions. Comprehensive mechanical tests were performed on beam (4×4×16 cm) and cube (10×10×10 cm) specimens to establish a scaling coefficient between different sample geometries. The obtained coefficient (0.9–0.95) allows reliable correlation between laboratory and standard testing results. The developed mixture achieved a compressive strength exceeding 400 kgf/cm² and a flexural strength above 68 kgf/cm², corresponding to concrete class C25/30 with satisfactory frost resistance (F75) and water absorption below 4 %. The mixture exhibited a mobility grade of P8 with a cone penetration depth of 65±3 mm, ensuring compatibility with the extrusion mechanism of the industrial 3D-printer. Experimental 3D-printing was carried out on the industrial printer developed by LLC «Geopolymer», confirming the printability and structural integrity of the proposed composition. The study also revealed that even using readily available, unmodified local materials can yield high-performance concrete mixtures suitable for additive construction. Future research will focus on optimizing fiber geometry (2–6 mm) to improve print stability and minimize mechanical interference during extrusion. The developed mixture thus represents a cost-effective and technologically adaptable solution for 3D-printed construction in resource-constrained or war-affected regions.

Keywords: 3D-printing, concrete, fiber, rheological properties, strength, additives, mixture, extrusion.

Вступ. Вибираючи склад бетону для 3D-друку, потрібно враховувати ряд факторів, починаючи від необхідних фізико-механічних характеристик готового матеріалу і до фактичних реологічних характеристик, які забезпечують взагалі можливість транспортування суміші

трубопроводом, а саме екструдкування. Рекомендовано діапазон технічних вимог щодо будівельних сумішей для 3D-друку [1]. Також потрібно враховувати і безпосередньо призначення конструкції, якщо говорити про стіни будівель, які експлуатують в умовах навколишнього

середовища *XC4 i XF1* (це відповідає вертикальним конструкціям будівель, які зазнають атмосферних впливів) [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Коли йдеться про бетон для будівельних конструкцій, завжди використовують основний набір складових – цемент, дрібний заповнювач, крупний заповнювач, вода і додатково різні домішки, які дають змогу надати суміші специфічних властивостей.

У дослідженні [3] як домішки застосовували пластифікатор, прискорювач твердіння та фібру. У роботі [1], крім прискорювача твердіння, також використовували доменний гранульований шлак. У роботі [4] було проаналізовано використання водостійких гіпсо-цементно-шлакових композицій. Для надання матеріалам спеціальних властивостей у роботі [5] застосовували магнезитовий заповнювач. У роботі [6] розглянуто можливість зменшення вуглецевого сліду в сумішах для 3D-друку за рахунок введення біовугілля та перероблених дрібних частинок. У роботі [7] розглянуто можливість використання морської води як прискорювача у друкованому бетоні. Усі перераховані напрями потребують зазвичай доопрацювання відповідних складових до стану, коли їх можна ввести для надання специфічних властивостей у бетонну суміш для 3D-друку. У своїй роботі автори у співробітництві з ТОВ «Геополімер» рухаються в напрямі використання складових, доступних на ринку прифронтового регіону (Харківська область), без додаткових модифікацій і з отриманням необхідних фізико-механічних характеристик.

Визначення мети та завдання дослідження. Розроблення бетонної суміші з місцевих доступних матеріалів і характеристиками, що забезпечать необхідні реологічні і фізико-механічні властивості:

- марка суміші за рухомістю – П8;
- границя міцності на стиск *не менше 30 МПа*, що відповідає класу міцності бетону на стиск *C25/30*;

- водопоглинання за масою не більше 4 %;

- марка за морозостійкістю не менше F75;

- середня густина за вологості не більше 6 %, не менше 1900 кг/м³.

Основна частина дослідження.

Розробляючи суміш для 3D-друку, важливо враховувати не тільки її фізико-механічні характеристики, а також можливості роботи з цією сумішшю конкретного обладнання (розчинонасос, екструдер) і дальність транспортування цієї суміші трубопроводами. У роботі [8] наведені принципи формування складу суміші і безпосередньо обладнання для друку, а в цій статті розглянемо вплив окремих складових на досягнення відповідних характеристик.

Суміші розробляли і опробовували для конкретного 3D-принтера, який розроблений і побудований ТОВ «Геополімер» [8, 9]. Підбираючи склад бетону, враховували принципи підбирання складу на основі використання оптимальних коефіцієнтів розсуву піску та щебеню [10]. Найкращими складовими для виготовлення суміші для друку є доступні матеріали в регіоні Харківської області. В'яжуче – цемент у мішках по 25 кг СЕМІІ/В 32,5R виробництва Кривий Ріг. Заповнювачі – пісок із модулем крупності 1,4 і гранвідсів із модулем крупності 2,4 і максимальним розміром до 5 мм. Максимальний розмір пов'язаний із можливостями шнекової пари, яка використана для друку. Пластифікатор вибирали доступний на ринку і недорогий. Вибір був між С-3 і Master Silk. Також були використані добавки для поліпшення реологічних і адгезійних характеристик.

Норми витрат суперпластифікатора, які рекомендують виробники, мають широкий діапазон. Тому, підбираючи оптимальну кількість для відповідного цементу, застосовували експрес-методику з використанням віскозиметра ВЗ-1 (рис. 1). За допомогою ВЗ-1 умовну в'язкість оцінювали часом (с) витікання розчину в об'ємі 90 мл через отвір 5,4 мм.

Оптимальний відсоток визначали графічно (рис. 2). Випробування проводили за різних В/Ц.

Для обох суперпластифікаторів із вибраним цементом оптимальний вміст знаходиться в межах 0,8 %, але в разі

використання С-3 виникає потреба збільшити водоцементне відношення, що у свою чергу в подальшому призведе до зменшення міцності. Тому для подальших робіт вибрали суперпластифікатор Master Silk.

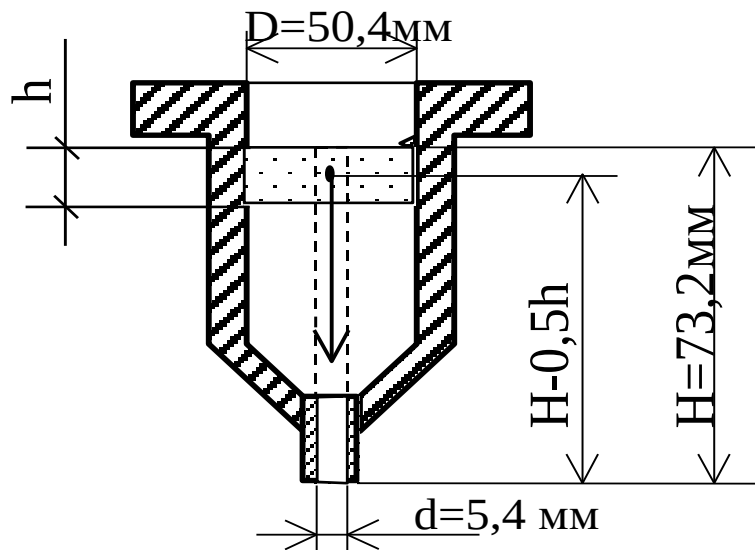


Рис. 1. Схема віскозиметра ВЗ-1

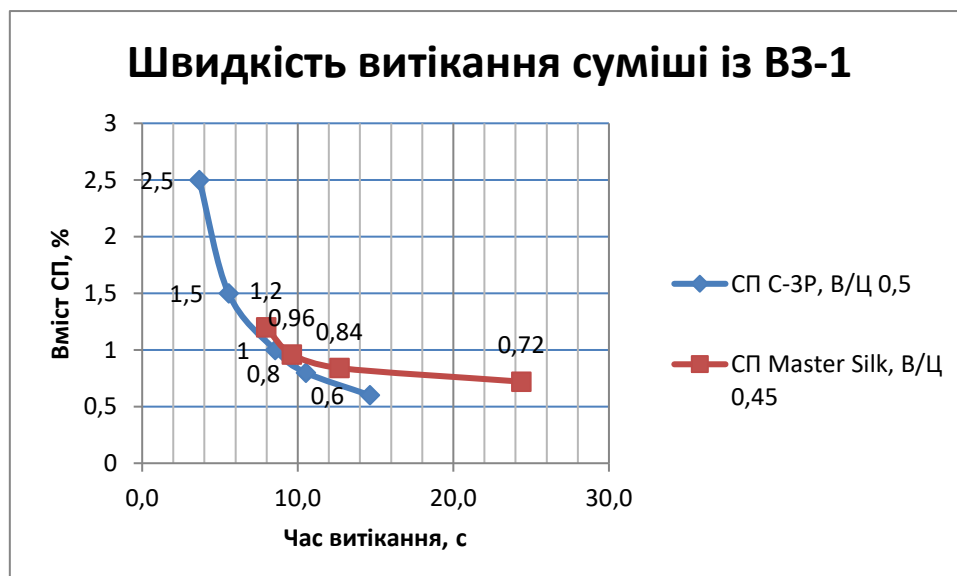


Рис. 2. Визначення оптимальної кількості суперпластифікатора

Як дисперсне армування використовували фібру поліпропіленову довжиною 12 мм. Виходили з того, що більша довжина порівняно з розмірами 2-6 мм дасть змогу збільшити міцність у першу чергу на згин, але не було враховано технологічний фактор – велика довжина фібри намотується на робочий орган екструдера, і його потрібно частіше зупиняти для промивання (не рідше одного разу на три години друкування).

Виробники фібри аргументують покращення властивостей бетону за рядом показників. Збільшує морозостійкість (виробники вважають поліпропіленову фібру альтернативою повітровтягувальним добавкам); істотно знижує утворення усадкових мікротріщин (які згодом мають тенденцію переростати в макротріщини); підвищує зносостійкість бетонної поверхні; збільшує водонепроникність бетону. За рахунок блокування волокнами фібри капілярів бетону з руйнуванням під навантаженням не спостерігають відділення уламків, оскільки залишаються зв'язаними між собою поліпропіленовими волокнами; підвищує міцність на стиск і вигин приблизно на 10 %; стійкість щодо циклів заморожування/розморожування; посилює кути, торці, виключаючи цим сколи; знижує усадку і утворення тріщин у процесі перших годин твердіння бетону; зменшує ймовірність пошкодження конструкцій під час зняття опалубки (в умовах 3D-друку не актуальна).

Рекомендовані витрати 0,6-1,0 кг на 1 м³ бетону.

Із введенням фібри у звичайний бетон вплив на фібру від механізмів буде мінімальним. Лише розчинозмішувач і, можливо, бетононасос. Для використання фібри в бетоні для друкування є додаткові механізми, які потрібно розглядати на сумісність таких бетонів із цими механізмами. Використовуючи для друкування як механізми для подавання бетону для друкувального пристрою шнекові пари (штукатурні станції), а також

в екструдерах будуть відбуватися доволі значні механічні впливи на фібру, що призведе як до пошкодження самої фібри, так і намотування на механізми. Із такими впливами ми стикалися і на виробництві, друкуючи на принтері ТОВ «Геополімер», і в лабораторних умовах, використовуючи звичайний міксер. Подібні проблеми були описані в науковій літературі. У своїх випробуваннях ми оцінили вплив кількості фібри на середню міцність на стиск і згин, рухливість суміші, щільність. Діапазон випробувань від 0 до 920 г фібри поліпропіленової довжиною 12 мм на 1 м³ бетону.

Вплив такої фібри в заданих межах на рухливість не виявлено. Усі суміші за В/Ц 0,36 мали глибину занурення стандартного конуса в межах 64-65 мм. Впливу на міцність зі згином не виявлено. Випробовуючи балочки 4x4x16 см на згин, середня міцність коливалася в межах 80-88 кгс/см², половинки балочок на стиск (рис. 3) – більш стабільні показники мали склади з кількістю фібри в межах 300-600 г/м³, при цьому міцність досягала 500 кгс/см² за середніх показників 430-460 кгс/см². Збільшення кількості фібри до 920 г/м³ призвело до значного зменшення показника міцності до 300 кгс/см². Це можна пояснити складністю рівномірного розподілу фібри в об'ємі за відсутності крупного заповнювача і, як наслідок, нерівномірною міцністю за об'ємом. Визначаючи щільність, виявлено її збільшення у зразках без фібри до 4 %, що може опосередковано підтвердити деяку повітровтягувальну дію фібри.

Паралельно із дослідженням міцності на стиск балочок 4x4x16 см контролювали міцність на кубах із розміром ребра 10 см. У таблиці наведені дані, отримані за випробувань різних серій зразків, але для одного визначеного складу. Обов'язково для всіх серій контролювали такий показник, як рухомість суміші, для якої характерна глибина занурення в суміш стандартного конуса (ЗК). Величина занурення була підібрана виходячи із можливостей конкретного обладнання і

склала 65 ± 3 мм. За результатами випробувань визначено масштабний коефіцієнт для випробування зразків у вигляді балочок розміром $4 \times 4 \times 16$ см відносно стандартного куба з розміром

ребра 10 см. Він знаходиться в межах 0,9-0,95. Масштабний коефіцієнт потрібен для подальших випробувань і оптимізації складу вже без додаткового формування кубів із розміром ребра 10 см.

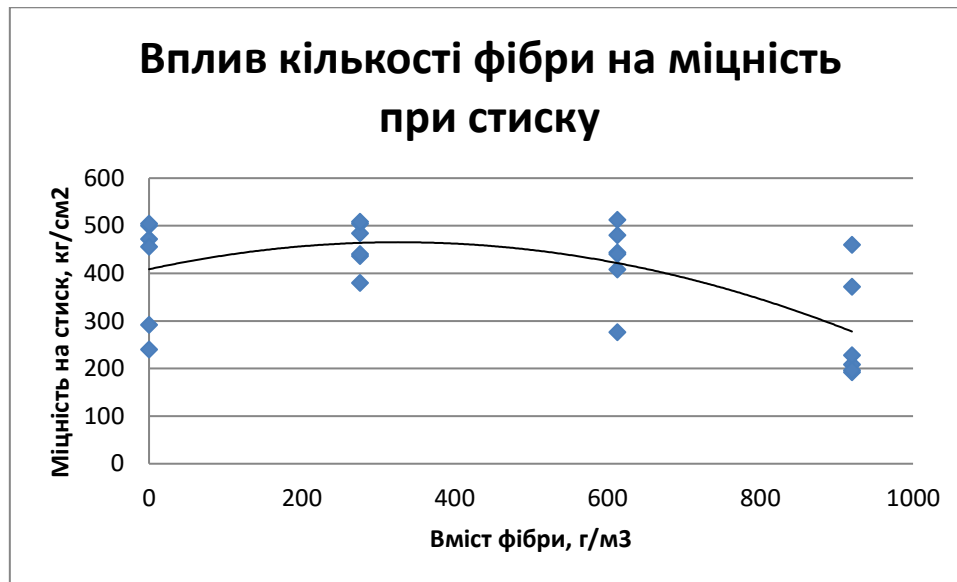


Рис. 3. Вплив кількості фібри на міцність половинок балочок за стиску

Таблиця

Характеристики контрольного складу суміші для 3D-друку, які були отримані за різних серій випробувань

	Міцність ($4 \times 4 \times 16$ см), кг/см ²	Міцність куб 10 см, кг/см ²	Масштабний коефіцієнт	Міцність на згин, кг/см ²	Щільність, кг/м ³	ЗК, мм
Серія 1	418	440	0,95	68,3	2057,1	62
Серія 2	452	471	0,96	76,2	2109	61
Серія 3	420	466	0,9	78,5	2062,3	67
Серія 4	438	506	0,86	72,6	2084,8	63

Як добавки для поліпшення реологічних властивостей суміші були використані ПВА (полівінілацетатна емульсія) у рідкому стані та крохмаль модифікований (КМ). Вплив цих добавок і їхньої кількості на характеристики суміші для 3D-друку в цій роботі не розглянуто.

Для оцінювання можливості друкування розробленим складом на

промислому принтері були виготовлені дослідні зразки окремих конструкцій і фрагментів стін (рис. 4, 5), що показало доволі добру сумісність розробленого складу з конкретним обладнанням ТОВ «Геополімер» за доволі якісного стану поверхні після друкування.



Рис. 4. Друкування експериментальних фрагментів стін на промисловому 3D-принтері компанії ТОВ «Геополімер»



Рис. 5. Дослідні зразки, які були надруковані з експериментального складу на промисловому 3D-принтері компанії ТОВ «Геополімер»

Висновки. Розроблено бетонну суміш із місцевих доступних матеріалів із міцністю на стиск більше 400 кгс/см^2 і на згин більше 68 кгс/см^2 .

Підібрано необхідну рухливість суміші, виходячи із можливостей конкретного обладнання (3D-принтер ТОВ «Геополімер»), яка склала $65 \pm 3 \text{ мм}$.

Підібрано вміст фібри поліпропіленової довжиною 12 мм, що дає змогу підвищити міцність бетону. Більш стабільні показники мали склади з кількістю фібри в межах $300\text{--}600 \text{ г/м}^3$, при цьому міцність досягала 500 кгс/см^2 за середніх показників $430\text{--}460 \text{ кгс/см}^2$. Але слід зазначити, що, працюючи з такою фіброю, виникли деякі технологічні складності. Проходячи через механізми для подавання

бетону до друкувального пристрою, а також в екструдерах, відбувається намотування на механізми, особливо коли друкують протягом декількох годин підряд. У подальшому передбачено провести випробування з фіброю меншого розміру (2-4-6 мм).

Вибрано недорогий доступний суперпластифікатор (Master Silk) і визначено його дозування для конкретного цементу (0,8 %).

За результатами випробувань визначено масштабний коефіцієнт для випробування зразків у вигляді балочок розміром $4 \times 4 \times 16 \text{ см}$ відносно стандартного куба з розміром ребра 10 см. Він знаходиться в межах 0,9-0,95.

Розробленим складом друкували дослідні зразки на промисловому 3D-принтері ТОВ «Геополімер».

Список використаних джерел

1. Дворкін Л. Й., Марчук В. В., Зятюк Ю. Ю. Цементно-шлакові суміші для 3d принтеру. DOI: 10.48076/2413-9890.2021-102-02.
2. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011.
3. Савицький М. В., Конопляник О. Ю., Мислицька А. О., Лясота О. В. Визначення фізико-механічних характеристик бетонів для 3d-друку будівельних конструкцій. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280420.64.622.
4. Дворкін Л. Й., Житковський В. В., Степасюк Ю. О., Марчук В. В. Ефективні будівельні розчини для 3d-принтера. DOI: 10.48076/2413-9890.2020-101-03.
5. Karol Federowicz a, Mateusz Techman a, Szymon Skibicki a, Mehdi Chougan b, Ahmed M. ElKhayatt c,d, H.A. Saudi e, Jarosław Błyszko a, Mohamed Abd Elrahman f, Sang-Yeop Chung g,*, Pawel Sikora Development of 3D printed heavyweight concrete (3DPHC) containing magnetite aggregate. *Materials & Design*. 2023. 233. 112246. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112246>.
6. Karol Federowicz, Paweł Sikora. Low-carbon cementitious composite incorporated with biochar and recycled fines suitable for 3D printing applications: hydration, shrinkage and early-age performance. *Frattura Ed Integrità Strutturale*. 2025. Vol. 19, Iss. 71. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.71.08.
7. Pawel Sikora, Sundar Rathnarajan, Karol Federowicz, Mateusz Techman, Hussein Alkroom. Use of seawater as an accelerator in 3D printed concrete (3DPC). *Materials Letters*. February 2025. Vol. 381, 15. DOI: 10.1016/j.matlet.2024.137781.
8. Мірошніченко С. В., Рильський А. О., Тютькін С. В. Дрібнозернистий бетон для 3Д друку: проблеми та перспективи. *Збірник тез Міжнародної науково-технічної конференції: Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій*. Одеса, 2024. С. 88-92.
9. Yaroslav Garashchenko, Olena Harashchenko, Ruslan Kucher. Additive technologies in construction: technical, economic and management analysis. doi: 10.20998/2078-7405.2024.101.10.

10. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них: монография в 3-х т. / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, О. А. Калинин и др.; Укр. гос. акад. ж.-д. трансп.; под ред. А. Н. Плуцина. Киев: Наук. думка, 2012. Т. 3. 281 с.

Мірошніченко Сергій Валерійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0002-7328-5209. Тел.: +38 (050) 692 53 89. E-mail: c197.9000@gmail.com.

Романенко Олександр Валерійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-9203-6056. Тел.: +38 (050) 614 17 37. E-mail: roma.kharkov8315@gmail.com.

Рильський Андрій Олександрович, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0003-8009-9521.

Тел.: +38 (097) 695 95 84. E-mail: asdrilskiyasd@gmail.com.

Тютюкін Сергій Вікторович, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0000-0114-8160. Тел.: +38 (067) 575 57 66. E-mail: ukrstroyinvest-ua@ukr.net.

Miroshnichenko Serhii, PhD, Associate Professor, Department of Building Materials, Structures and Constructions, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7328-5209. Tel.: +38 (050) 692 53 89. E-mail: c197.9000@gmail.com.

Romanenko Oleksandr, PhD, Associate Professor, Department of Building Materials, Structures and Constructions, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-9203-6056. Tel.: +38 (050) 614 17 37. E-mail: roma.kharkov8315@gmail.com.

Rylskiy Andrii, PhD Student, Department of Building Materials, Structures and Constructions, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0003-8009-9521. Tel.: +38 (097) 695 95 84. E-mail: asdrilskiyasd@gmail.com.

Tiutkin Sergii, PhD Student, Department of Building Materials, Structures and Constructions, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0000-0114-8160. Tel.: +38 (067) 575 57 66. E-mail: ukrstroyinvest-ua@ukr.net.

Статтю прийнято 25.12.2025 р.