

УДК 691.32/.34:004.94

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280420.64.622

ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНІВ ДЛЯ 3D-ДРУКУ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

САВИЦЬКИЙ М. В.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
КОНОПЛЯНИК О. Ю.², *канд. техн. наук, доц.*,
МИСЛИЦЬКА А. О.^{3*}, *асист., аспір.*,
ЛЯСОТА О. В.⁴

¹ Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: sav15@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

² Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. + 38 (067) 762-24-55, e-mail: konoplianiuk.alexander@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4664-8809

^{3*} Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 663-99-99, e-mail: Myslytska.anastasiia@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-9609-7270

⁴ Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (096) 483-03-73, e-mail: liasota.alexandro@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-4269-2434

Анотація. *Постановка проблеми.* Наразі все більшої популярності набувають методи виготовлення будівельних конструкцій та виробів за допомогою 3D-принтера. В технології 3D-друку один з основних факторів, який впливає на якість кінцевої продукції, – це склад бетонної суміші, яка застосовується. При цьому для кожного з виду виробів важливо розробити окремий склад суміші, яка володіє певними фізико-механічними властивостями. *Аналіз сучасного стану* розроблення і дослідження бетонів для 3D-друку конструкцій показав, що вибір матеріалів для друку залежить від функціонального призначення створюваного об'єкта та сфери його застосування. При цьому відмінна особливість бетонів, які застосовуються в практиці сучасного будівництва, полягає в тому, що кожен розробник 3D-принтера представляє свою суміш, не розкриваючи її складу. *Аналіз публікацій.* Основний матеріал у 3D-будівництві, – це бетон – штучний кам'яний будівельний матеріал, отримуваний в результаті формування і затвердіння раціонально підібраної і ущільненої суміші. Така суміш складається з в'язучої речовини – цементу, великих і дрібних заповнювачів, води, а в деяких випадках і різноманітних модифікувальних добавок. Це каолінова глина, мікрокремнезем, повітряне вапно, летючий попід, суперпластифікатори, прискорювачі твердіння та набору міцності суміші. У світовій практиці для 3D-друку конструкцій для армування бетону в склад суміші вводять різноманітну фібру, скловолокно та інші наповнювачі, які дозволяють значно підвищити міцність бетону. Нині в Дніпропетровській області в с. Братське у виробничому приміщенні налагоджено випуск дрібноштучних бетонних виробів за допомогою 3D-друку. Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» налагодила співробітництво з цим виробництвом, яке стосується удосконалення технології виготовлення і нанесення сумішей, а також розроблення оптимальних складів бетонів. Першим кроком такого співробітництва стало розроблення складів сумішей з різними в'язучими і прискорювачами твердіння, які суттєво впливають на скорочення термінів тужавлення. *Мета роботи* – визначення фізико-механічних характеристик бетонів, з яких виготовляються конструкції на виробничому підприємстві в с. Братське; порівняння характеристик бетонів, виготовлених за допомогою 3D-друку шляхом витискування суміші через сопло, і виготовлених в формах шляхом ручного ущільнення суміші. *Висновки.* Встановлено, що в практиці сучасного будівництва економічно та технологічно реалізувати переваги технології 3D-друку для виготовлення окремих конструктивних елементів будівель і споруд. В результаті випробувань складів бетонів для 3D-друку конструкцій з'ясовано, що найближча марка бетону за міцністю базових зразків-кубів, які були виготовлені у формах, складає М300, а зразків-кубів, відібраних із конструкцій, – М250. Установлено масштабні коефіцієнти для зразків-кубів з розмірами ребра 100, 70 і 50 мм, які були визначені відносно міцності стандартних зразків з розміром ребра 150 мм.

Ключові слова: 3D-друк; технологія суміші; бетон; міцність; об'ємна вага

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

САВИЦКИЙ Н. В.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
КОНОПЛЯНИК А. Ю.², *канд. техн. наук, доц.*,
МЫСЛИЦКАЯ А. А.^{3*}, *асс., аспирант*,
ЛЯСОТА А. В.⁴

¹ Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: sav15@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

² Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (067) 76-22-455, e-mail: konoplianiuk.alexander@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4664-8809

^{3*} Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 663-99-99, e-mail: Myslytska.anastasiia@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-9609-7270

⁴ Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (096) 483-03-73, e-mail: liasota.alexandro@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-4269-2434

Аннотация. Постановка проблемы. В настоящее время все большую популярность приобретают методы изготовления строительных конструкций и изделий с помощью 3D-принтера. В технологии 3D-печати одним из основных факторов, который влияет на качество конечной продукции, является состав бетонной смеси. При этом для каждого вида изделий важно разработать отдельный состав смеси, которая обладает определенными физико-механическими свойствами. **Анализ современного состояния** разработки и исследования бетонов для 3D-печати конструкций показал, что выбор материалов для печати зависит от функционального назначения создаваемого объекта и сферы его применения. При этом отличительной особенностью бетонов, применяемых в практике современного строительства, является то, что каждый разработчик 3D-принтера представляет свою смесь, не раскрывая ее состава. **Анализ публикаций.** Основным материалом, применяемым в 3D-строительстве, является бетон – искусственный каменный строительный материал, получаемый в результате формирования и затвердевания рационально подобранной и уплотненной смеси. Такая смесь состоит из вяжущего вещества-цемента, крупных и мелких заполнителей, воды, а в некоторых случаях и различных модифицирующих добавок. Это каолиновая глина, микрокремнезем, воздушная известь, летучий пепел, суперпластификаторы, ускорители твердения и набора прочности смеси. В мировой практике для 3D-печати конструкций для армирования бетона в состав смеси вводят разнообразную фибру, стекловолокно и другие наполнители, которые позволяют значительно повысить прочность бетона. В настоящее время в Днепропетровской области в с. Братское находится производственное помещение, в котором налажен выпуск мелкоштучных бетонных изделий с помощью 3D-печати. Кафедра железобетонных и каменных конструкций ГБУЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» наладила сотрудничество с указанным производством, которое касается усовершенствования технологии изготовления и нанесения смесей, а также разработки оптимальных составов бетонов. Первым шагом такого сотрудничества является разработка составов смесей с различными вяжущими и ускорителями твердения, которые существенно влияют на сокращение сроков схватывания смесей. **Цель работы** – определение физико-механических характеристик бетонов, из которых изготавливаются конструкции на производственном предприятии в с. Братское, сравнение характеристик бетонов, изготовленных с помощью 3D-печати путем выдавливания смеси через сопло и изготовленных в форме путем ручного уплотнения смеси. **Выводы.** Установлено, что в практике современного строительства экономично и технологично реализовать преимущества технологии 3D-печати для изготовления отдельных конструктивных элементов зданий и сооружений. В результате испытаний составов бетонов для 3D-печати конструкций установлено, что ближайшая марка бетона по прочности базовых образцов-кубов, которые были изготовлены в формах, составляет М300, а образцов-кубов, отобранных из конструкций, – М250. Установлены масштабные коэффициенты для образцов-кубов с размерами ребра 100, 70 и 50 мм, которые были определены по отношению к прочности стандартных образцов с размером ребра 150 мм.

Ключевые слова: 3D-печать; технология смеси; бетон; прочность; объемный вес

DETERMINATION OF PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CONCRETE FOR 3D PRINTING BUILDING DESIGNS

SAVYTSKYI M.V.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
KONOPLIANYK A.Y.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
MYSLYTSKA A.A.^{3*}, *Assist., Postgrad. Stud.*
LIASOTA A.V.⁴

¹ Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: sav15@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

² Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (067) 762-24-55, e-mail: konoplianyk.alexander@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4664-8809

^{3*} Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 663-99-99, e-mail: Myslytska.anastasiia@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-9609-7270

⁴ Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (096) 483-03-73, e-mail: liasota.alexandro@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-4269-2434

Abstract. Problem statement. Currently, methods of manufacturing building structures and products using a 3D printer are becoming increasingly popular. In 3D printing technology one of the main factors that affects the quality of the final product is the composition of the concrete mix used. Moreover, for each type of product, it is important to develop a separate composition of the mixture, which has certain physical and mechanical properties. **Analysis of the current state** of development and research of concrete for 3D printing of structures showed that the choice of materials for printing depends on the functional purpose of the created object and its scope. At the same time, a distinctive feature of concrete used in the practice of modern construction is that each developer of a 3D printer presents its mixture without revealing its composition. **Analysis of publications.** The main material used in 3D-construction is concrete-an artificial stone building material obtained as a result of the formation and solidification of a rationally selected and compacted mixture. Such a mixture consists of a binder-cement, large and small aggregates, water, and in some cases with the addition of various modifying additives. One of the main directions of modification of concrete mix is the use of special additives, which significantly affect the characteristics of concrete. Examples of such additives are kaolin clay, silica fume, air lime, fly ash, superplasticizers, hardening accelerators, and mixture strength set. In world practice, for 3D printing of structures for concrete reinforcement, a variety of fibers, fiberglass and other fillers are introduced into the mixture, which can significantly increase the strength of concrete. Currently, in Dnipropetrovsk region in Bratskoe village there is a production room, where the production of small piece concrete products with the help of 3D printing has been established. Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture" established cooperation with this production facility, engaged in the improvement of manufacturing technology and the application of mixtures, as well as the development of optimal concrete compositions. The first step of such cooperation is the development of mixtures with various binders and hardening accelerators, which significantly affect the reduction of the setting time of mixtures. **Purpose** of the work was to identify physico-mechanical characteristics of concrete, which is used to manufacture the structures at the production plant in Bratskoe. At the same time the goal was also to compare the characteristics of concrete made using 3D printing by extruding the mixture through a nozzle and molded by manually sealing the mixture. **Conclusions.** It is found out that in modern construction it is quite efficient and technologically simple to implement the advantages of 3D printing technology for the manufacture of individual structural elements of buildings and structures. As a result of tests of concrete compositions for 3D printing of structures, it was found that the closest concrete grade in terms of strength of basic samples-cubes that were made in molds is M300, and samples-cubes that were selected from structures is M250. Scale factors were established for the samples-cubes with ribs of 100, 70, and 50 mm, which were determined with respect to the strength of standard specimens with a 150-mm rib size.

Keywords: 3D printing; mix technology; concrete; strength; volumetric weight

Постановка проблеми. Наразі час все більшої популярності набувають методи виготовлення будівельних конструкцій та виробів за допомогою 3D-принтера. Така технологія полягає в тому, що споруда або окремі її конструктивні елементи можуть бути побудовані методом пошарового нанесення бетонної суміші за допомогою

спеціальних комп'ютерних програм [1]. Застосування 3D-друку дозволяє вийти на новий рівень створення об'єктів складної конфігурації з необхідних матеріалів. За допомогою будівельних 3D-принтерів можна створювати високоміцні конструкції в найкоротші терміни, при цьому звести

витрати праці і відходи виробництва до мінімуму [5].

У технології 3D-друку один з основних факторів, який впливає на якість кінцевої продукції, – це склад бетонної суміші. При цьому для кожного виду виробів важливо розробити окремий склад суміші, яка володіє певними фізико-механічними властивостями.

Аналіз публікацій. Вибір матеріалів для друку залежить від функціонального призначення створюваного об'єкта та сфери його застосування. Основний матеріал, що застосовують у 3D-будівництві, – це бетон-штучний кам'яний будівельний матеріал, що отримується в результаті формування і затвердіння раціонально підбраної й ущільненої суміші. Така суміш складається з в'язучої речовини-цементу, великих і дрібних заповнювачів, води, а в деяких випадках і з додаванням різноманітних модифікувальних добавок [7].

Один з основних напрямків модифікації бетонної суміші – це застосування спеціальних добавок, які суттєво впливають на характеристики бетону. Це каолінова глина, мікрокремнезем, повітряне вапно, летючий попіл, суперпластифікатори, прискорювачі твердіння та набору міцності суміші [10].

У світовій практиці 3D-друку конструкцій для армування бетону в склад суміші вводять різноманітну фібру, скловолокно та інші наповнювачі [2], які дозволяють значно підвищити міцність бетону.

Сьогодні в наукових публікаціях відсутня інформація про особливості складів сумішей для 3D-друку, тому що жоден розробник не розкриває її рецептури [9].

Нині в Дніпропетровській області в с. Братське у виробничому приміщенні, налагоджено випуск дрібноштучних бетонних виробів за допомогою 3D-друку [6]. Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій (ЗБіКК) ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» налагодила співробітництво із зазначеним виробництвом, яке стосується удосконалення технології виготовлення і

нанесення сумішей, а також розроблення оптимальних складів бетонів. Першим кроком такого співробітництва стало розроблення складів сумішей із різними в'язучими і прискорювачами твердіння, які суттєво впливають на скорочення термінів тужавлення сумішей [8].

Мета роботи – визначення фізико-механічних характеристик бетонів, з яких виготовляються конструкції на виробничому підприємстві в с. Братське, а також порівняльний аналіз характеристик бетонів, які були виготовлені за допомогою 3D-друку шляхом витискування суміші через сопло і бетонів, виготовлених у формах шляхом ручного ущільнення суміші.

Виклад матеріалу. На виробничому підприємстві в с. Братське для виготовлення виробів за допомогою 3D-принтера застосовувалась бетонна суміш, яка складалась із таких компонентів: щебінь фракції 1,25...7 мм, пісок річковий з модулем крупності $M_{кр} = 0,98$, цемент марки М500, вода, пластифікатор В 10 (Бетомікс), прискорювач тужавлення Redament та фібра поліпропіленова BauGut.

Суміш готували в бетонозмішувачі БСМ-500 з об'ємом барабана 500 л. Потужність двигуна бетонозмішувача складала 2,2 кВт, а частота обертання – 18 об./хв. Спочатку у воду додавали послідовно пластифікатор, прискорювач твердіння і фібру і перемішували протягом 1 хв. Рідину заливали в бетонозмішувач, запускали двигун і додавали необхідну кількість піску. Отриману суміш перемішували протягом 2 хв. Потім додавали необхідну кількість щебеню і суміш перемішували протягом 2...3 хв до отримання однорідної маси.

Технологія укладання суміші включала в себе такі етапи (рис. 1):

1. Завантаження виготовленої суміші в ємність бетоноукладача об'ємом 20 л з перемішуванням цієї суміші шнеком.

2. Розміщення каретки, яка зв'язана з ємністю бетоноукладача на рухомій поперечній балці, що переміщується по двох поздовжніх нерухомих балках.

3. Переміщення каретки, поєднаної з ємністю бетоноукладача, в необхідному напрямку. Переміщення виконується за допомогою комп'ютерної програми мовою G-коду.

4. Витискування суміші через сопло діаметром 40 мм, з отриманням шару суміші шириною 55...60 мм.

Дослідження характеристик бетонів, виготовлених за допомогою 3D-принтера і у формах ручним ущільненням сумішей, виконували на зразках розмірами $150 \times 150 \times 150$ мм, $100 \times 100 \times 100$ мм, $70 \times 70 \times 70$ мм і $50 \times 50 \times 50$ мм. Для визначення характеристик бетонів, виготовлених за допомогою 3D-друку, зразки-куби вирізали з готових виробів.

В умовах дослідної лабораторії кафедри ЗБіКК досліджували міцність і об'ємну вагу бетонів. Міцність бетону на стиск (МПа) визначали на зразках-кубах згідно нормативним документом [3]. Зразки-куби розмірами $150 \times 150 \times 150$ мм, $100 \times 100 \times 100$ мм та $70 \times 70 \times 70$ мм доводили до руйнування на пресі П-125 (рис. 2). Зразки-куби розмірами $50 \times 50 \times 50$ мм доводили до руйнування на пресі УММ-20. Швидкість підвищення навантаження складала 4 кН за секунду.

Межу міцності на стиск визначали шляхом відношення руйнівного навантаження до площі поперечного перерізу зразка.



Рис. 1. Виготовлення секцій забору за допомогою 3D-принтера

Об'ємну вагу зразків в кг/м^3 визначали згідно з нормативним документом [4] шляхом їх контрольного зважування та відношення цієї ваги до об'єму зразка. Об'єм

зразка визначали шляхом його розмітки та вимірювання розмірів у характерних перерізах.



Рис. 2. Визначення міцності на стиск бетонних зразків розміром $100 \times 100 \times 100$ мм на пресі П-125

Результати визначення міцності бетонів, виготовлених у формах і відібраних із конструкцій, наведені у вигляді діаграм на рисунках 3, 4 відповідно.

Як видно з рисунка 3, показники межі міцності за стиску зразків-кубів бетону, які були виготовлені у формах, незначно відрізняються від зразків бетонних кубів із

розмірами ребра з 150 до 70 мм. При цьому показники міцності за стиску становлять 31,09...32,27 МПа. У разі зменшення розміру ребра до 50 мм міцність зразків суттєво відрізняється і становить 27,37 МПа, що складає 15,2 % відносно міцності базового зразка з розміром ребра 150 мм.

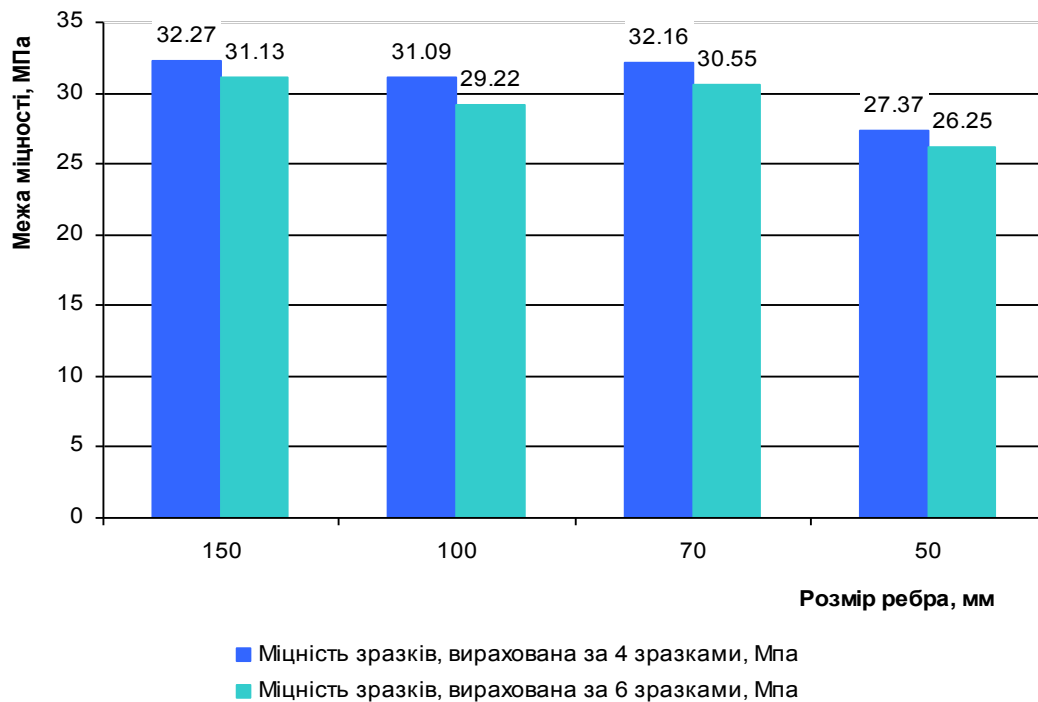


Рис. 3. Міцність на стиск бетонів для 3D-друку, виготовлених у формах



Рис. 4. Міцність на стиск бетонів для 3D-друку, відібраних із конструкцій

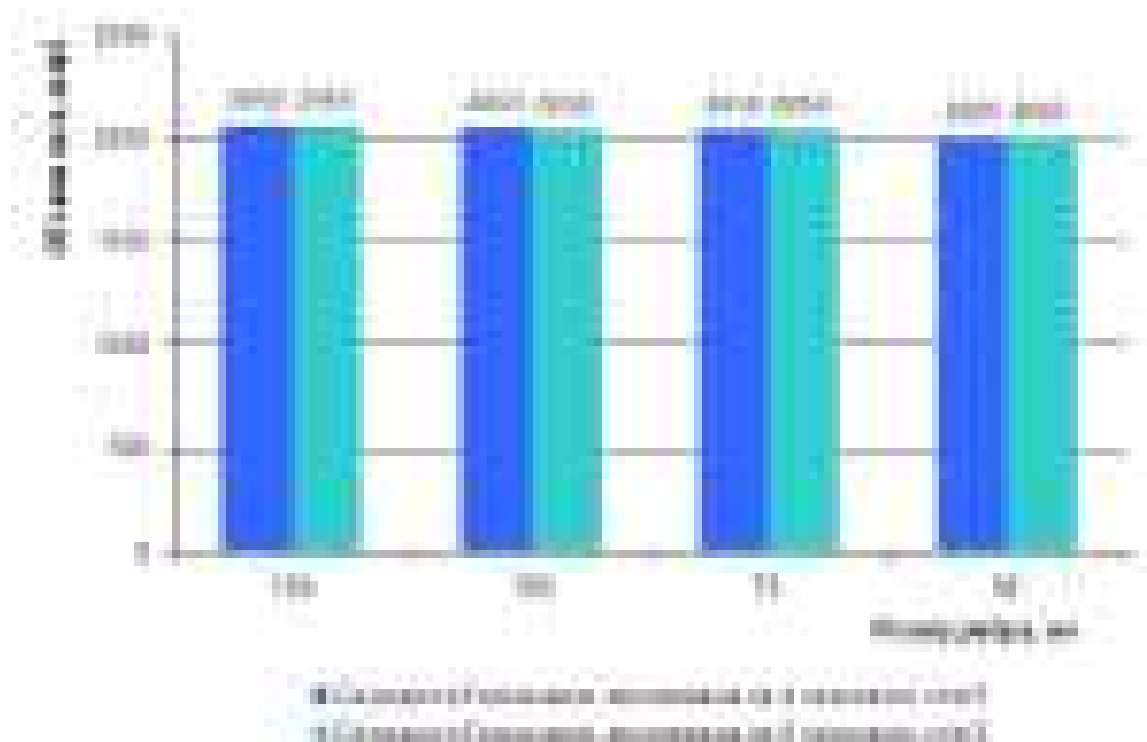


Рис. 5. Об'ємна вага бетонів для 3D друку, виготовлених в формах

Як видно з рисунка 4, показники межі міцності за стиску зразків-кубів бетону, відібраних із конструкцій, з розміром ребра 150 мм, значно менші, ніж аналогічні показники міцності у бетонних зразків із розміром ребра 100 і 50 мм. Межа міцності на стиск зразків із розміром ребра 100 і

50 мм збільшується відносно міцності базових зразків із розміром ребра 150 мм і становить 33,67 та 35,72 МПа, відповідно. Таке збільшення міцності зразків узгоджується з даними нормативного документа [3], коли для зведення міцності

зразків до міцності стандартного зразка вводяться знижувальні коефіцієнти.

Якщо розмір ребра зразків-кубів 70 мм, міцність зразків на стиск значно зменшується і становить 18,91 МПа. Таке суттєве зменшення міцності бетонних зразків пов'язане або з порушенням технології укладання сумішей, або з порушенням складу бетону.

Таким чином, визначення показників міцності бетонів на стиск відносно міцності стандартних зразків із розміром ребра 150 мм дає підстави вважати, що найближча марка бетону за міцністю дорівнює М300 для бетонів, які були виготовлені у формах, і М250 для бетонів, відібраних із конструкцій.

Результати визначення об'ємної ваги бетонів, виготовлених у формах і відібраних із конструкцій, наведені у вигляді діаграм (рис. 5, 6, відповідно).

Як видно з рисунка 5, об'ємна вага бетонів, виготовлених у формах, що визначена на зразках-кубах із розмірами ребра 150, 100 і 70 мм, становить відповідно 2 065, 2 055 і 2 050 кг/м³. Однак за зменшення розміру ребра зразків до 50 мм

знижується показник об'ємної ваги до 2 005 кг/м³.

Об'ємна вага бетонів, відібраних із конструкцій, що визначена на зразках-кубах із розмірами ребра 150, 100 і 50 мм, становить відповідно 2 070, 2 010 і 2 035 кг/м³. А за розмірів зразків 70 × 70 × 70 мм показник об'ємної ваги бетону суттєво знижується до 1 975 кг/м³. У результаті дослідження міцності й об'ємної ваги бетонів, які були виготовлені у формах і відібрані з конструкцій, встановлені дійсні масштабні коефіцієнти цих показників відносно результатів стандартних зразків розміром 150 × 150 × 150 мм. Показники масштабних коефіцієнтів наведені в таблиці.

Як свідчать дані (табл.), показники масштабних коефіцієнтів для бетонів, виготовлених у формах, підвищуються відносно типового коефіцієнта зразків із розміром ребра 150 мм. Таке підвищення нетипове і суперечить показникам нормативного документа [3], в якому у разі зменшення розміру ребра застосовуються знижувальні коефіцієнти.

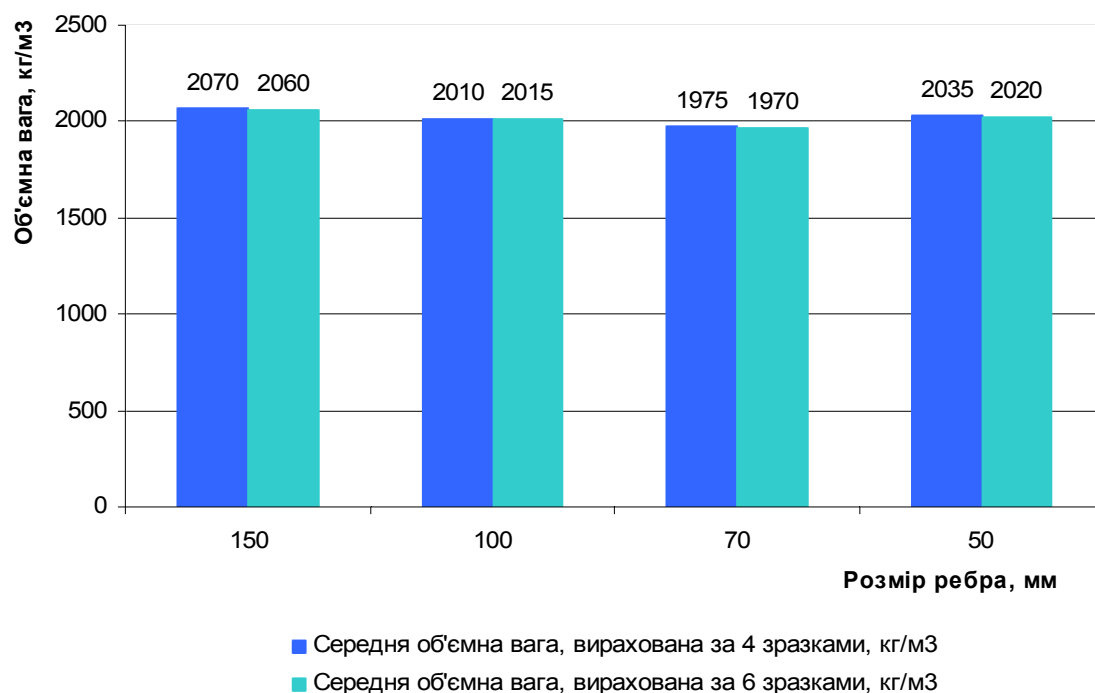


Рис. 6. Об'ємна вага бетонів для 3D-друку, відібраних із конструкцій

Таблиця

Масштабні коефіцієнти за міцністю і об'ємною вагою

Вид бетону	Показники	Куби розмірами ребра, мм			
		150	100	70	50
Виготовлений у формах	Масштабний коефіцієнт за міцністю	1.0	1.04 (1.065)	1.003 (1.02)	1.18 (1.19)
	Масштабний коефіцієнт за об'ємною вагою	1.0	1.005 (1.007)	1.007 (1.007)	1.03 (1.03)
Відібраний з конструкцій	Масштабний коефіцієнт за міцністю	1.00	0.78 (0.78)	1.38 (1.40)	0.73 (0.76)
	Масштабний коефіцієнт за об'ємною вагою	1.00	1.03 (1.023)	1.05 (1.045)	1.02 (1.02)

Примітка: без дужок наведено показники коефіцієнтів, які були вираховані за 4 зразками, а в дужках – за 6 зразками

У бетонах, які були відібрані з конструкцій з розміром ребра 100 і 50 мм, знижувальні коефіцієнти цілком логічні, а з розміром ребра 70 мм – нетипові.

Висновки. Встановлено, що в практиці сучасного будівництва економічно та технологічно реалізувати переваги технології 3D-друку для виготовлення окремих конструктивних елементів будівель і споруд. У результаті випробувань складів бетонів для 3D-друку конструкцій встановлено, що найближча марка бетону за міцністю базових зразків-кубів, які були виготовлені у формах, складає М300, а зразків-кубів, відібраних із конструкцій, – М250. Установлено масштабні коефіцієнти для зразків-кубів із розмірами ребра 100, 70 і

50 мм, визначені відносно міцності стандартних зразків із розміром ребра 150 мм.

Перспективи подальшого дослідження. Оскільки більшість виробів і конструкцій, виготовлених на 3D-принтері, застосовують в умовах зовнішнього відкритого простору, в подальшому необхідно дослідити такі важливі фізико-механічні характеристики бетонів як деформативність, водостійкість та морозостійкість. При цьому також бажано визначити масштабні коефіцієнти фізико-механічних характеристик бетону для 3D-друку в співвідношенні до бетонів, які виготовляються методом ручного ущільнення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Базовые основы 3D печати. «Смарт-Принт» – все о 3D принтерах и 3D печати в Украине и в мире. 2016. URL : www.xn-3-htbdlzkhq6g.com.ua/blog (Перевірено : 12.02.2020).
2. Wang Yo., Wu H.C., Li V.C. Concrete reinforcement with recycled fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2000. № 4–12. С. 314–319.
3. ДСТУ Б В.2.7.–214:2009. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 43с.
4. ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Бетони. Методи визначення середньої міцності, вологості, водопоглинання, пористості та водонепроникнення. Київ : Держбуд України, 2008. 45 с.
5. Khoshnevis B. Automated construction by Contour-grafting – related robotics and information technologies. *Journal of Automation in Construction*. 2004. Vol. 13. № 1. Pp. 5–19.
6. Леушин С. Ю. 3D друк бетоном в Україні, практичні досягнення та перспективи розвитку. *Інноваційні технології життєвого циклу об'єктів житлово-цивільного, промислового і транспортного призначення* : матер. XVII міжнар. наук.-практ. конф. (Одеса, 9–13 вересня 2019 р.). Дніпро : ДВНЗ ПДАБА, 2019. С. 20.
7. Лысич М. Н., Шабанов М. Л., Воронцов Р. В. Материалы, доступные в рамках различных технологий 3D-печати. *Современные наукоемкие технологии*. 2015. № 5. С. 20–25.

8. Sustainable housing and human settlement. Materials for 3D construction printing : monograph. Editors : Savvitskyi M., Konoplianiuk O., Unchik S., Dukat S., Savvitskyi A.; under the general editorship Savvitskyi M. Dnipro – Bratislava : SHEE “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture” – Slovak University of Technology in Bratislava, 2018. 263 p. (ISBN 978-966-323-182-2).

9. Торшин А. О., Потапова Е. Н. Перспективы использования 3D-принтера в строительстве. *Успехи в химии и химической технологии*. Том XXX. № 7. Москва, 2016. С. 118–120.

10. Шипелев И. Л. Возможности и преимущества метода строительной 3d печати. *Новые идеи нового века* : матер. межд. науч. конф. Том 3. Хабаровск : ФАД ТОГУ, 2018. С. 479–482.

REFERENCES

1. *Bazovye osnovy 3D pechaty. «Smart-Prynt» – vse o 3D prynterakh y 3D pechaty v Ukrainy y v myre* [Basic basics of 3D printing. "Smart Print" – all about 3D printers and 3D printing in Ukraine and in the world]. 2016. (in Russian).

2. Wang Yo., Wu H.C., Li V.C. Concrete reinforcement with recycled fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2000, no. 4–12, pp. 314–319. (in Ukrainian).

3. *DSTU B V.2.7. – 214:2009. Betony. Metody vyznachennya mitsnosti za kontrol'nyimi zrazkami* [DSTU B V.2.7. – 214: 2009. Concretes. Methods for determining the strength of control samples]. Kyiv : Minregion of Civil Engineering of Ukraine, 2010, 43 p. (in Ukrainian).

4. *DSTU B V.2.7-170:2008. Betony. Metody vyznachennya seredn'oyi hustyny, volohosti, vodopohlynannya, porystosti i vodonepronyknennya* [DSTU B V.2.7-170:2008. Concrete Methods for determination of average density, humidity, water absorption, porosity and water resistance]. Kyiv : Derzhbud of Ukraine, 2008, 45 p. (in Ukrainian).

5. Khoshnevis B. Automated construction by Contour-grafting – related robotics and information technologies. *Journal of Automation in Construction*. 2004, vol. 13, no. 1, pp. 5–19. (in Ukrainian).

6. Leushyn S. Yu. *3D druk betonom v Ukraini, praktychni dosyahnennya ta perspektyvy rozvytku*. [3D concrete printing in Ukraine, practical achievements and prospects.] *Innovatsiyni tekhnolohiyi zhytlyevoho tsykladu ob'ektiv zhytlovo-tsylvil'noho, promyslovoho i transportnoho pryznachennya : mater. XVII mizhnar. nauk.-prakt. konf.* [Innovative technologies of life cycle of objects of housing, civil, industrial and transport purpose : mater. of the XVII Intern. Scient.-Pract. Conf.]. Odessa, 9–13 September, 2019. Dnipro : SHEI PSACEA, 2019, p. 20. (in Ukrainian).

7. Lysych M.N., Shabanov M.L. and Vorontsov R.V. *Materialy, dostupni v ramkakh riznykh tekhnolohiy 3D-druku* [Materials available within the framework of various 3D printing technologies] *Suchasni naukovistki tekhnolohiyi* [Modern high technology]. 2015, no. 5, pp. 20–25. (in Russian).

8. Sustainable housing and human settlement. Materials for 3D construction printing : monograph. Editors : Savvitskyi M., Konoplianiuk O., Unchik S., Dukat S., Savvitskyi A.; under the general editorship Savvitskyi M. Dnipro – Bratislava : SHEE “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture” – Slovak University of Technology in Bratislava, 2018, 263 p. (ISBN 978-966-323-182-2). (in Russian).

9. Torshyn A.O. and Potapova Ye.N. *Perspektyvy vykorystannya 3D-pryntera v budivnytstvi* [Prospects for the use of a 3D printer in construction]. *Uspikhy v khimiyi ta khimichnyy tekhnolohiyi* [Advances in chemistry and chemical technology]. Vol. XXX, no. 7, Moscow, 2016, pp. 118–120. (in Russian).

10. Shipilev I. L. *Mozhlyvosti ta perevahy metodu budiveln'oyi 3d druku* [Possibilities and advantages of the construction 3d printing method]. *Novye idei novogo veka : mater. mezhd. nauch. konf.* [New ideas of the new century : Mater. Int. Scient. Conf.]. Khabarovsk : FAD TOGU, 2018, pp. 479–482. (in Russian).

Надійшла до редакції: 05.03.2020 р.