

УДК 691.32

СУМІШІ ДЛЯ 3D ДРУКУ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕЛЕНОГО БЕТОННОГО ТА ЦЕГЛЯНОГО БОЮ

MIXTURES FOR 3D PRINTING USING GROUND CONCRETE AND BRICK SCRAP

Марчук В.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-0999-0402, **Дворкін Л.Й.**, д.т.н., професор, ORCID: 0000-0001-8759-6318, **Ніхаєва Л.І.**, ст. викладач, (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Marchuk V.V., candidate of technical sciences, associate professor, ORCID: 0000-0003-0999-0402, **Dvorkin L.J.**, doctor of technical sciences, professor, ORCID: 0000-0001-8759-6318, **Nikhaeva LI**, senior lecturer, (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

У статті досліджено можливість отримання дрібнозернистих бетонних сумішей на основі меленого бетонного та цегляного бою придатних для 3D принтеру. Встановлено вплив складу на властивості дрібнозернистих бетонів з використанням меленого бетонного та цегляного бою в присутності добавки акриватора твердіння - гідроксиду натрію. Введення добавки NaOH сприяє підвищенню ранньої та марочної міцності. За допомогою математичного планування експериментів отримано комплекс поліноміальних моделей властивостей бетонних сумішей та бетонів.

The article provides an analysis of the use of crushed concrete and brick scrap in concrete mixes. The possibility of obtaining fine-grained concrete mixtures and concretes that can be used as working mixtures for a 3D printer is shown. In connection with the war in Ukraine, when many buildings are destroyed, the problem of disposal or reuse of concrete and brick scrap is quite urgent. In this regard, the utilization of concrete and brick scrap from destroyed buildings and structures for the production of building composites seems promising. The use of these man-made materials in the production of mixtures is determined by a number of objective factors, primarily from an ecological point of view. And also from the point of view of expanding the raw material base for obtaining dry construction mixes, and for environmental reasons.

The influence of the composition on the properties of fine-grained concrete using ground concrete and brick scrap in the presence of the addition of a

activator hardening - sodium hydroxide - was established. The addition of NaOH contributes to the increase of early and vintage strength.

With the help of mathematical planning of experiments, a set of polynomial models of the properties of fine-grained concrete mixtures for 3D printing was obtained. A laboratory printer was developed and used for research. On the basis of the obtained models, an analysis of the factors of the composition of concrete mixtures according to the investigated properties was carried out. Taking into account the peculiarities of building constructions during the erection of structures with the help of a 3D printer, the necessary properties of extruded mixtures and concretes based on them have been determined. Methods of determining the standardized properties of the concrete mixture, the design of a laboratory printer for determining the necessary structural strength of the structure during its layer-by-layer installation are proposed.

Ключові слова:

Портландцемент, бетонний бій, цегляний бій, 3D-будівельний принтер, адитивні технології, суперпластифікатор, прискорювач твердіння.

Portlandcement, concrete scrap, scrap brick, 3D construction printer, additive technologies, superplasticizer, hardening accelerator.

Вступ. Останнім часом темпи та обсяги будівництва суттєво збільшуються, відтак зменшується кількість вільних незабудованих площ та територій. Особливо це питання є актуальним для великих міст. А також у зв'язку з війною в Україні коли багато будівель є зруйнованими проблема утилізації чи повторного використання бетонного та цегляного бою для виробництва будівельних композитів є досить актуальною.

Використання меленого бетонного та цегляного бою у виробництві при отриманні сумішей зумовлено рядом об'єктивних факторів, в першу чергу з екологічної точки зору. А також з погляду розширення сировинної бази отримання сухих будівельних сумішей, так і з екологічних міркувань.

Введення до складу будівельних композитів добавок природного та техногенного походження одне з основних напрямків забезпечення якості будівельних матеріалів і конструкцій на їх основі. В даний час перспективним та новим видом будівельних сумішей є дрібнозернисті бетонні суміші для 3D бетонування отримані за технологією сухих будівельних сумішей. До складу яких входять дисперсні наповнювачі техногенного походження зокрема можуть бути використані мелений бетонний та цегляний бій.

Стан питання та задачі дослідження. Внаслідок техногенних катастроф, знесення старих будівель і споруд, а також бойових дій у світі утворюється величезне скупчення будівельних відходів [1, 2]. В наш час гостро виникає необхідність вирішувати проблему їх утилізації.

На сьогоднішній день міські звалища практично заповнені. Вивозити будівельне сміття стає дорого, та й за великим рахунком нікуди. З економічної точки зору це є не раціональним, так як його можна переробляти, щоб уникнути забруднення навколишнього середовища. Переробка будівельних відходів буде в найближчому майбутньому невід'ємною вимогою при здійсненні демонтажу будь-яких будівельних конструкцій.

Вторинна сировина в багатьох випадках не є повноцінним будівельним матеріалом, вона володіє низькою вартістю і обмеженою сферою застосування. Після руйнування або демонтажу споруд, на майданчику залишається переважно залізобетон, який сортується за допомогою спеціальної техніки. Занадто великі шматки подрібнюються на більш дрібні. Надалі, як правило, він переробляється прямо на місці з використанням дробильної установки. Використання перероблених будівельних відходів є досить різноманітним, в даний час ці матеріали ефективно використовуються як заповнювачі [3, 4]. Дослідження авторів [5] виявили, що при дробленні бетону тонкий шар гідратної фази залишається на зернах повторно використаного заповнювача і може забезпечувати підвищення адгезії між свіжою цементною матрицею та зернами заповнювача різної фракції та природи. Одним з напрямків використання бетонного бою є матеріали, що активуються лугом або їх ще називають геополімерами, при цьому повинна використовуватися тонкодисперсна фракція бетонного бою [6, 7]. Ряд авторів стверджує, що такі композити володіють хорошими реологічними властивостями [8].

Актуальність. На даний час потреба в енергоефективних матеріалах набула широкого розповсюдження у зв'язку з війною в Україні, а використання бетонного та цегляного бою у виробництві будівельних матеріалів і розробка технології виготовлення матеріалів на їх основі залишається актуальною.

Мета роботи полягала в дослідженні фізико-механічних властивостей дрібнозернистих бетонних сумішей придатних для 3D бетонування на основі бетонного та цегляного бою.

В якості вихідних матеріалів у наших дослідженнях були використані: портландцемент ПЦ II/ А-Ш-500 Р-Н ПАТ, виробництва «Волинь-цемент» філія ПАТ "ДЦУ", згідно ДСТУ Б В.2.7-46:2010; мелена цегла отримана при помелі бою цегли, питома поверхня якої 210...230 м²/кг; мелений бетонний бій з питомою поверхнею 200...220 м²/кг; кварцовий пісок з модулем крупності $M_{кр} = 2,05$ згідно ДСТУ Б В.2.7-32-95; активатор твердіння гідроксид натрію NaOH (ПТ), суперпластифікатор (СП) полікарбоксилатного типу Melflux 2651F.

Методика досліджень та результати. Для визначення впливу добавки-прискорювача твердіння гідроксиду натрію на властивості дрібнозернистих бетонів придатних для 3D бетонування на основі меленого бетонного та

цегляного бою, а також факторів їх складу на основні властивості дрібнозернистих бетонів були проведені експерименти відповідно до тривірневого двохфакторного плану В₂ [9]. Змінними факторами були обрані: вміст меленого бетонного бою/ меленого цегляного бою, та вміст добавки активатора твердіння. Умови планування експериментів приведені в табл. 1.

Таблиця 1

Умови планування експериментів

Фактори впливу		Рівні варіювання			Інтервал
Натуральний вид	Кодований	-1	0	+1	
Частка меленого бетонного бою /меленого цегляного бою, від цементу, МББ/МЦБ	X ₁	0,4	0,55	0,7	0,15
Вміст добавки NaOH, Д, %	X ₂	0	2,5	5	2,5

Склад суміші був слідуючим: портландцемент, мелений бетонний бій/ мелений цегляний бій, пісок та активатор твердіння. Вміст в'язучого, що складається з портландцементу та бетонного/цегляного бою становив 300 кг/т суміші, до складу суміші для покращення реологічних характеристик вводили суперпластифікатор полікарбоксилатного типу Melflux 2651F у кількості 0,3% від маси композиційного в'язучого. Склад був розрахований на 1 т сухої суміші. Кількість води підбирали для досягнення рухомості 10...12 см по зануренню стандартного конусу, що забезпечувало потрібну формуємість суміші на допомогою 3D принтеру [10, 11]. Міцність зразків на стиск та згин визначали у віці 1 та 28 діб. В табл. 2 наведені склади сумішей та отримані експериментальні результати.

Таблиця 2

Склад сумішей та експериментальні результати

Точка	Склад суміші			Бетонний лом				Цегляний лом			
	ПЦ,	МБЛ/МЦБ	NaOH	R _{зг} ¹	R _{ст} ¹	R _{зг} ²⁸	R _{ст} ²⁸	R _{зг} ¹	R _{ст} ¹	R _{зг} ²⁸	R _{ст} ²⁸
	кг/т	кг/т	кг/т	МПа	МПа	МПа	МПа	МПа	МПа	МПа	МПа
1	90	210	15	1,71	8,93	2,92	18,28	2,22	8,16	2,92	18,28
2	90	210	0	2,1	6,12	3,5	19,54	1,78	7,01	3,5	19,54
3	180	120	15	2,6	11,52	3,51	23,01	2,48	9,18	3,51	23,01
4	180	120	0	1,81	9,4	3,69	22,1	1,91	9,27	3,69	22,1
5	90	210	7,5	2,17	7,4	3,4	17,82	2,23	8,6	3,4	17,82
6	180	120	7,5	2,48	10,96	3,57	21,24	2,44	9,25	3,57	21,24
7	135	165	15	2,17	11,55	2,91	22,54	2,46	9,72	2,91	22,54
8	135	165	0	1,64	9,08	2,89	22,74	1,9	9,28	2,89	22,74
9	135	165	7,5	1,9	10,95	2,87	21,32	2,38	9,5	2,87	21,32
10	135	165	7,5	2,0	10,9	2,7	21,0	2,31	9,1	2,75	21,37
11	135	165	7,5	1,95	10,5	2,5	22,1	2,3	9,7	2,81	21,42

В результаті статистичної обробки експериментальних даних отримано адекватні поліноміальні моделі міцності дрібнозернистих бетонів придатних для 3D бетонування на основі меленого бетонного та цегляного бою з 95% довіркою ймовірністю.

На основі меленого бетонного бою

$$R_{зг}^1 = 1,96 - 0,15X_1 + 0,16X_2 + 0,28X_1^2 - 0,14X_2^2 - 0,3X_1X_2 \quad (1)$$

$$R_{ст}^1 = 9,92 - 1,48X_1 + 3,07X_2 - 1,37X_1^2 - 0,13X_2^2 + 0,23X_1X_2 \quad (2)$$

$$R_{зг}^{28} = 2,89 - 0,16X_1 - 0,12X_2 + 0,56X_1^2 - 0,03X_2^2 - 0,1X_1X_2 \quad (3)$$

$$R_{ст}^{28} = 21,29 - 2,76X_1 - 1,3X_2 + 1,83X_1^2 + 1,89X_2^2 - 0,49X_1X_2 \quad (4)$$

На основі меленого цегляного бою

$$R_{ст}^1 = 8,37 - 0,52X_1 + 2,55X_2 - 0,64X_1^2 - 0,24X_2^2 - 0,13X_1X_2 \quad (5)$$

$$R_{ст}^{28} = 19,51 - 2,78X_1 + 1,73X_2 - 1,12X_1^2 - 0,02X_2^2 + 0,79X_1X_2 \quad (6)$$

Аналіз побудованих математичних моделей дає змогу зробити висновок, що введення NaOH в композиції з меленим бетонним боєм позитивно впливає на міцність дрібнозернистого бетону. Введення NaOH у кількості 4-5% від маси композиційного вяжучого дозволило збільшити міцність на стиск бетону у 1-добовому віці на 30-40% , а у віці 28 діб – 15-20%, при умові, що вміст МББ = 0,4...0,55. Вплив на ранню міцність при згині є дещо нижчим зростання становить 20...25% та 10...15 % відповідно. Отже, введення добавки „їдкого натру” краще діє на ранніх строках набору міцності при МББ на 20-35% нижчі ніж при МББ=0,55...0,4.

Як відомо добавка гідроксид натрію при використанні її в звичайних бетонних сумішах дає значне підвищення і дозволяє отримати відпускну міцність у ранні строки (1–3 доби), тому гірший ефект добавки у дрібнозернистих бетонах зумовлений недостатнім вмістом рідкої фази, котра необхідна для повного розчинення її складових. Цим же пояснюється і відсутність значного пластифікуючого ефекту, який повинен забезпечуватися введенням добавок суперпластифікаторів.

Міцнісні показники при використанні меленого цегляного бою дещо нижчі, що можна пояснити значно меншою кількістю гідратної фази на зернах повторно використаного заповнювача. Застосування тонкодисперсних порошоків з цегли та бетону дозволяє покращувати фізико-механічні властивості, що також підтверджуються в ряді робіт [12, 13].

Слід відмітити, що при вмісті меленого бетонного та цегляного бою 0,4 оптимальна кількість добавки NaOH – 2,5...3,5%, а при вмісті бою 0,7 – 3,0...4,5%.

Висновки:

Доведена можливість отримання дрібнозернистих бетонних сумішей для 3D бетонування на основі меленого бетонного та цегляного бою.

Встановлено вплив складу на властивості дрібнозернистих бетонів з використанням меленого бетонного та цегляного бою в присутності добавки активатора твердіння - гідроксиду натрію.

Введення добавки NaOH сприяє підвищенню ранньої міцності до 45%, а у віці 28 діб до 25 %.

Із збільшенням кількості меленого бою позитивний вплив добавки зростає, причому підвищується її оптимальна кількість.

1. Pavlu, T.; Koci, V.; Hájek, P. Environmental Assessment of Two Use Cycles of Recycled Aggregate Concrete. *Sustain.* 2019, doi:10.3390/su11216185.

2. Akhtar, A.; Sarmah, A.K. Construction and Demolition Waste Generation and Properties of Recycled Aggregate Concrete: A Global Perspective. *J. Clean. Prod.* 2018, doi:10.1016/j.jclepro.2018.03.085.

3. Li, L.G.; Lin, C.J.; Chen, G.M.; Kwan, A.K.H.; Jiang, T. Effects of Packing on Compressive Behaviour of Recycled Aggregate Concrete. *Constr. Build. Mater.* 2017, 157, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.097.

4. Tam, V.W.Y. Economic Comparison of Concrete Recycling: A Case Study Approach. *Resour. Conserv. Recycl.* 2008, doi:10.1016/j.resconrec.2007.12.001.

5. Nasr, M.S.; Shubbar, A.A.; Abed, Z.A.A.R.; Ibrahim, M.S. Properties of Eco-Friendly Cement Mortar Contained Recycled Materials from Different Sources. *J. Build. Eng.* 2020, 31, 101444, doi:10.1016/j.jobe.2020.101444.

6. Дворкін Л.Й. Бетони нового покоління / Л.Й. Дворкін, В.В. Житковський, О.М. Бордоженко, В.В. Марчук, Ю.О. Рубцова. НУВГП. 2021. 317 с.

7. Hou, S.; Xiao, J.; Duan, Z.; Ma, G. Fresh Properties of 3D Printed Mortar with Recycled Powder. *Constr. Build. Mater.* 2021, 309, 125186, doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125186.

8. Ilcan, H.; Sahin, O.; Kul, A.; Yildirim, G.; Sahmaran, M. Rheological Properties and Compressive Strength of Construction and Demolition Waste-Based Geopolymer Mortars for 3D-Printing. *Constr. Build. Mater.* 2022, 328, 127114, doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.127114.

9. Дворкін Л.Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту / Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Житковський В.В. - Рівне: НУВГП, 2011- 174 с.

10. Dvorkin, Leonid, et al. "Effectiveness of Polymer Additives in Concrete for 3D Concrete Printing Using Fly Ash." *Polymers* 14.24 (2022): 5467.

11. Dvorkin, L.; Marchuk, V.; Hager, I.; Maroszek, M. Design of Cement-slag Concrete Composition. *Energies* 2022, 15.

12. Prasad, N.; Murali, G.; Abid, S.R.; Vatin, N.; Fediuk, R.; Amran, M. Effect of Needle Type, Number of Layers on FPAFC Composite against Low-Velocity Projectile Impact. *Buildings* 2021, 11, doi:10.3390/buildings11120668.

13. Afiq, M.; Abdullah, H.; Saifulnaz, R.; Rashid, M.; Amran, M.; Hejazii, F.; Azreen, N.; Masenwat, B.; Fediuk, R.; et al. Recent Trends in Advanced Radiation Shielding Concrete for Construction of Facilities : Materials and Properties. *Polymers (Basel)*. 2022, 14, 2830.