

УДК 691.32

ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДІВ СУМІШЕЙ ПРИДАТНИХ ДЛЯ 3D БУДІВЕЛЬНОГО ПРИНТЕРУ

DESIGN OF COMPOSITIONS OF MIXTURES SUITABLE FOR 3D CONSTRUCTION PRINTER

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

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

У статті наведена методика проектування складів сумішей придатних для 3D будівельного принтеру на основі отриманих експериментально-статистичних моделей властивостей сумішей. Із застосуванням математичного програмування, що реалізується програмним середовищем Microsoft Excel і його додатку "Пошук рішення", показана можливість вирішення завдання проектування оптимальних складів будівельних сумішей, придатних для 3D-друку.

The article shows the possibility of obtaining cement-slag fine-grained concrete mixtures and concretes, which can be used as working mixtures for a 3D printer. The resulting complex of experimental and statistical models makes it possible to predict the influence of factors characterizing the composition of the mixture on the main properties of concretes intended for 3D concreting. The developed compositions of mixtures make it possible to provide the required values of the setting time, structural strength, splitting and compressive strength at an early and projected age. The influence of granulated blast-furnace slag and the addition of a hardening accelerator on the complex of properties of the proposed fine-grained concrete for 3D concreting has been established. With the use of mathematical programming, implemented by the Microsoft Excel software environment and its application "Search for a solution", the possibility of solving the problem of designing optimal compositions of building mixtures suitable for 3D printing is shown.

Ключові слова:

Портландцемент, доменний гранульований шлак, 3D будівельний принтер, адитивні технології, суперпластифікатор, прискорювач твердіння.

Portlandcement, blast furnace slag, 3D construction printer, additive technologies, superplasticizer, hardening accelerator.

Вступ. Сучасні суміші для 3D-будівельного принтеру є багатокомпонентними системами, вартість окремих компонентів яких може наближатись або перевищувати вартість цементу. До них можна віднести суміші з добавками сучасних суперпластифікаторів та інших добавок-регуляторів властивостей сумішей.

При проектуванні складів сумішей для 3D бетонування загальним критерієм їх оптимізації є мінімальна вартість суміші. Обов'язковим є для отриманих складів забезпечення комплексу нормованих властивостей сумішей та бетонів на їх основі.

Стан питання та задачі дослідження. 3D-принтери дозволяють із застосуванням адитивної (пошарової) технології забезпечувати швидкісне роботизоване зведення об'єктів, в тому числі складної форми з мінімізацією витрат матеріалів і робочої сили.

До теперішнього часу використовується велика кількість матеріалів для 3D друку. При зведенні будівельних об'єктів основними є дрібнозернисті бетонні суміші з використанням в якості в'язучих портландцементу і гіпсу, мінеральних заповнювачів і наповнювачів, різних хімічних добавок - регуляторів властивостей бетону і фібри.

Склади бетонів повинні забезпечувати нормальну екструзію суміші, необхідну структурну міцність, достатню для укладання наступних шарів, і адгезійну міцність для надійного зчеплення шарів між собою [1]. В результаті твердіння суміші повинні досягатися необхідних проектних показників міцності, встановлених для бетонів конкретних будівель і споруд.

Приклади складів будівельних сумішей, розроблених для 3D-принтер розглядаються в різних публікаціях [1-6]. До складу сумішей поряд з дрібним заповнювачем - піском пропонується вводити заповнювач розміром до 8...10мм, активні мінеральні добавки – золу-винесення, метакаолін, трепел і ін [6]. До складу сумішей можуть включатися також деякі види відходів, наприклад, від зносу та реконструкції споруд і переробки будівельних матеріалів [7]. Компонентом більшості пропонованих бетонних сумішей є сталева або неметалева фібра, регулятори тужавлення і інші хімічні добавки. Фізико-механічні показники пропонованих бетонів [2] залежать призначення та виду споруд і коливаються в широкому діапазоні [2, 7].

Відсутність необхідної нормативної бази та необхідних показників властивостей сумішей і їх випробування істотно ускладнює підбір складів бетонів для 3D-принтера, який в даний час переважно реалізується емпіричним методом «проб і помилок».

Мета роботи полягала в розробці методики проектування оптимальних складів дрібнозернистих цементно-шлакових сумішей для 3D-принтера на основі комплексу отриманих експериментально-статистичних моделей.

В якості вихідних матеріалів у наших дослідженнях використовували портландцемент І-типу М500 ПАТ «Волинь-цемент»; доменний гранульований шлак (ДГШ) Криворізького металургійного комбінату, з хімічним складом (%): SiO_2 – 39,51; Al_2O_3 – 6,47; Fe_2O – 30,14; CaO – 47,19; MgO – 3,12; SO_3 – 1,76; MnO – 1,14; в.п.п. – 0,59, модулем основності - M_o – 1,27, модулем активності – M_a – 0,16, коефіцієнтом якості – K_y – 1,44. Заповнювач бетонів - кварцовий пісок з модулем крупності $M_{кр} = 2,1$ відповідав вимогам ДСТУ Б В.2.7-32. Хімічними добавками служили прискорювач твердіння сульфат натрію Na_2SO_4 (ПТ) і суперпластифікатор (СП) полікарбоксилатного типу Melflux 2651F (0,3% від маси в'язучого). Суміші для визначення властивостей цементно-шлакових бетонних сумішей виготовляли за допомогою лабораторного 3D-принтера.

Методика досліджень та результати.

Для визначення параметрів складів сумішей для 3D-принтеру реалізовано серію експериментів, алгоритмізованих відповідно до трьохфакторного плану експерименту B_3 [8] за умов планування, наведених в табл. 1.

Таблиця 1

Умови планування експериментів

Фактори впливу		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодовий	-1	0	+1	
Вміст ДГШ у в'язучій суміші, %, (ДГШ)	X_1	50	40	30	-10
Вміст добавки прискорювача твердіння, % від мас. в'яз. (ПТ)	X_2	0	1	2	1
Вміст в'язучого, кг/м^3 , (В'яз)	X_3	300	400	500	100

На основі отриманих результатів властивостей бетонних сумішей та бетонів для 3D будівельного принтеру з використанням ДГШ були побудовані рівняння регресії властивостей бетонних сумішей та бетонів, які наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Рівняння регресії властивостей бетонних сумішей та бетонів для 3D- друку

Параметри	Статистичні моделі	
Термін придатності, хв	$T = 66,4 - 15,0 \cdot x_1 - 32,0 \cdot x_2 - 19,5 \cdot x_3 + 4,1 \cdot x_1^2 + 19,1 \cdot x_2^2 + 6,6 \cdot x_3^2 - 2,5 \cdot x_1x_2 - 2,5 \cdot x_1x_3 + 6,3 \cdot x_2x_3$	(1)
Структурна міцність, Па, через 10 хв після замішування	$P_m = 3295 + 230 \cdot x_1 + 558 \cdot x_2 + 610 \cdot x_3 + 124 \cdot x_1^2 + 177 \cdot x_2^2 + 108 \cdot x_3^2 + 55 \cdot x_1x_2 + 72 \cdot x_1x_3 + 87 \cdot x_2x_3$	(2)

Параметри	Статистичні моделі	
Структурна міцність, Па, через 40 хв після замішування	$P_m = 8258 + 830 \cdot x_1 + 2130 \cdot x_2 + 1350 \cdot x_3 + 296 \cdot x_1^2 + 853 \cdot x_2^2 + 283 \cdot x_3^2 + 280 \cdot x_1x_2 + 322 \cdot x_1x_3 + 560 \cdot x_2x_3$	(3)
Міцність на стиск у віці 3 діб	$f_{cm} = 11,66 + 1,4 \cdot x_1 + 0,68 \cdot x_2 + 3,67 \cdot x_3 - 0,537 \cdot x_1^2 + 0,063 \cdot x_2^2 + 1,313 \cdot x_3^2 + 0,513 \cdot x_1x_2 + 0,963 \cdot x_1x_3 - 0,062 \cdot x_2x_3$	(4)
Міцність на розтяг при розколюванні у віці 28 діб	$f_{tn} = 6,89 + 1,03 \cdot x_1 + 0,25 \cdot x_2 + 1,1 \cdot x_3 - 0,328 \cdot x_1^2 - 0,228 \cdot x_2^2 + 0,222 \cdot x_3^2 + 0,138 \cdot x_1x_2 + 0,213 \cdot x_1x_3 + 0,113 \cdot x_2x_3$	(5)
Міцність на стиск у віці 28 діб	$f_{cm} = 20,74 + 4,7 \cdot x_1 + 1,51 \cdot x_2 + 4,88 \cdot x_3 - 1,01 \cdot x_1^2 - 0,56 \cdot x_2^2 + 0,69 \cdot x_3^2 + 0,06 \cdot x_1x_2 + 0,74 \cdot x_1x_3 + 0,21 \cdot x_2x_3$	(6)

Постановку задачі знаходження оптимального складу піщано-бетонної суміші для 3D будівельного принтеру на цементно-шлаковому в'язучому із заданими показниками якості можна сформулювати наступним чином: знайти значення факторів складу суміші $x_1 \dots x_n$, що дозволяють мінімізувати її вартість:

$$B_c = B_{Ц} \cdot Ц + B_{ДГШ} \cdot Ц + B_{Д} \cdot Д + B_{П} \cdot П \rightarrow \min \quad (7)$$

за умови забезпечення необхідних показників якості

$$\begin{aligned} P_1 &\geq f(x_1, x_2, \dots, x_n); \\ P_2 &\geq f(x_1, x_2, \dots, x_n); \\ P_m &\geq f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &\text{при } x_1 \dots x_n \in [a \dots b], \end{aligned} \quad (8)$$

де $B_{Ц}$, $B_{ДГШ}$, $B_{Д}$, $B_{П}$ – відповідно вартість цементу, ДГШ, добавки (прискорювача твердіння, суперпластифікатора та ін.) та піску, у.о./кг;

$Ц$, $ДГШ$, $Д$, $П$ – відповідно витрата цементу, ДГШ, піску та добавок, кг/м³;

$P_1 \dots P_m$ – задані показники якості суміші;

$x_1 \dots x_n$ – фактори складу;

a , b – обмеження на можливі значення факторів.

Переведення значень параметрів складу суміші в кодований вигляд проводиться за наступними залежностями:

$$x_1 = \frac{ДГШ - 40}{-10}; \quad x_2 = \frac{Д - 1}{1}; \quad x_3 = \frac{B' \text{ якс} - 400}{100}. \quad (9)$$

Для того щоб, розрахувати оптимальний для досліджених сумішей склад, необхідно розв'язати задачу математичного програмування з наступною постановкою: знайти такий склад суміші, який би дозволяв забезпечити необхідні: формуємість, початок тужавлення структурну міцність, міцність

при стиску та розтягу при розколюванні у визначені терміни твердіння при мінімальній сумарній вартості в межах допустимих значень факторів.

Найбільш раціональним способом вирішення такої задачі є використання програмного середовища Microsoft Excel, зокрема його додатку "Пошук рішення".

Нижче викладена послідовність розрахунку складу цементно-шлакової суміші для 3D будівельного принтеру.

Підставляємо у моделі (1)...(6) задані значення показників нормованих властивостей, що повинні забезпечуватись, а у вираз (7) – значення вартості компонентів суміші для 3D будівельного принтеру. У виразі (8) встановлюємо обмеження значень факторів (в кодованих значеннях від -1 до 1). Далі комп'ютерна програма перебирає різні комбінації факторів забезпечуючи задані значення нормованих параметрів за виразами (1)...(6) мінімізуючи при цьому функцію (7). Для встановлення вартості суміші під час ітерацій паралельно визначається необхідна витрата води для забезпечення формуємості за виразом (10) при знайдених проміжних значеннях факторів $x_1...x_3$.

$$B = 225 + 5 \cdot x_1 - 4 \cdot x_2 + 13 \cdot x_3 + 2 \cdot x_1^2 - 8 \cdot x_2^2 - 4 \cdot x_3^2 - 1 \cdot x_1 x_3 + 1 \cdot x_2 x_3 \quad (10)$$

Результатом таких ітерацій є визначення оптимальних значень факторів складу: витрати в'язучого, частки в ньому ДГШ та добавки ПТ.

Значення витрати дрібного заповнювача (піску) знаходимо за методом абсолютних об'ємів:

$$z = \left(1000 - \left(\frac{C}{\rho_c} + \frac{ДГШ}{\rho_{дгш}} + \frac{B}{\rho_a} \right) \right) \cdot \rho_z \quad (11)$$

де ρ_c , $\rho_{дгш}$, ρ_a , та ρ_z – відповідно дійсні густини цементу, шлаку, води та заповнювача.

Приклад. Визначити склад цементно-шлакової суміші для 3D будівельного принтеру з міцністю у віці 3-ї та 28 діб при стиску відповідно 10 МПа та 20 МПа, міцністю на розтяг при розколюванні у віці 28 діб – 5 МПа, початком тужавлення 45 хв та структурною міцністю через 10хв та 40 хв після замішування 4150 Па та 7000 Па відповідно.

Приймаємо вартості основних компонентів суміші для 3D будівельного принтеру наступними, грн/кг: $B_c = 3$; $B_{дгш} = 1,5$; $B_{ПТ} = 26$; $B_{СП} = 16$, $B_{П} = 0,25$.

Матеріали: портландцемент М500, мелений доменний гранульований шлак, дрібний заповнювач – кварцовий пісок з модулем крупності $M_k = 2,1$ та дійсною густиною $\rho_z = 2,65$ кг/л. Передбачається використання добавок суперпластифікатора СП-1 та прискорювача твердіння Na_2SO_4 .

1. Використовуючи експериментально-статистичні моделі (1)...(6) та підставляючи значення нормованих параметрів у вирази, отримуємо функції обмежень (8) задачі:

$$66,4 - 15,0 \cdot x_1 - 32,0 \cdot x_2 - 19,5 \cdot x_3 + 4,1 \cdot x_1^2 + 19,1 \cdot x_2^2 +$$

$$+ 6,6 \cdot x_3^2 - 2,5 \cdot x_1x_2 - 2,5 \cdot x_1x_3 + 6,3 \cdot x_2x_3 = 45$$

$$3295 + 230 \cdot x_1 + 558 \cdot x_2 + 610 \cdot x_3 + 124 \cdot x_1^2 + 177 \cdot x_2^2 + \\ + 108 \cdot x_3^2 + 55 \cdot x_1x_2 + 72 \cdot x_1x_3 + 87 \cdot x_2x_3 \geq 4150$$

$$8258 + 830 \cdot x_1 + 2130 \cdot x_2 + 1350 \cdot x_3 + 296 \cdot x_1^2 + 853 \cdot x_2^2 + \\ + 283 \cdot x_3^2 + 280 \cdot x_1x_2 + 322 \cdot x_1x_3 + 560 \cdot x_2x_3 \geq 7000$$

$$11,66 + 1,4 \cdot x_1 + 0,68 \cdot x_2 + 3,67 \cdot x_3 - 0,537 \cdot x_1^2 + 0,063 \cdot x_2^2 + \\ + 1,313 \cdot x_3^2 + 0,513 \cdot x_1x_2 + 0,963 \cdot x_1x_3 - 0,062 \cdot x_2x_3 \geq 10$$

$$6,89 + 1,03 \cdot x_1 + 0,25 \cdot x_2 + 1,1 \cdot x_3 - 0,328 \cdot x_1^2 - 0,228 \cdot x_2^2 + \\ + 0,222 \cdot x_3^2 + 0,138 \cdot x_1x_2 + 0,213 \cdot x_1x_3 + 0,113 \cdot x_2x_3 \geq 5$$

$$20,74 + 4,7 \cdot x_1 + 1,51 \cdot x_2 + 4,88 \cdot x_3 - 1,006 \cdot x_1^2 - 0,556 \cdot x_2^2 + \\ + 0,694 \cdot x_3^2 + 0,063 \cdot x_1x_2 + 0,738 \cdot x_1x_3 + 0,213 \cdot x_2x_3 \geq 20$$

2. У вираз (7) підставляємо значення вартості компонентів суміші для 3D будівельного принтеру, а також задаємо обмеження значень факторів: від -1 до 1 (в кодованому вигляді).

3. За допомогою програмного додатку "Пошук рішення" знаходимо значення факторів, що задовольняють обмеження задачі і мінімізують загальну вартість суміші для 3D будівельного принтеру:

$$x_1 = 0,62; x_2 = 0; x_3 = 0,9.$$

При таких значеннях факторів за виразами (1...6) $T=45$ хв та $P_m^{10}=4160$ Па, що відповідає необхідним значенням. $P_m^{40}=10510$ Па, $f_{cm}^3 = 17,2$ МПа, $f_{cm}^{28} = 28,6$ МПа та $f_{in}^{28} = 8,7$ МПа що є значно вищими за необхідні проектні показники структурної міцності та міцності при стиску у віці 3 та 28 діб, а також міцності на розтяг при розколювання у віці 28 діб.

4. Значення факторів в натуральному вигляді визначаємо за виразами (9):

$$V'_{яж} = 0,9 \cdot x_3 + 100 = 0,9 \cdot 100 + 400 = 490 \text{ кг/м}^3;$$

$$ДГШ = 0,62 \cdot x_1 + 10 = 0,62 \cdot (-10) + 40 = 33,8 \text{ \%};$$

$$ПТ = 0 \cdot x_2 + 1 = 0 \cdot 0 + 1 = 1 \text{ \%}.$$

Визначаємо витрати компонентів:

$$V'_{яж} = 490 \text{ кг/м}^3;$$

$$ДГШ = 490 \cdot 0,338 = 166 \text{ кг/м}^3;$$

$$ПЦ = 490 - 166 = 324 \text{ кг/м}^3$$

$$ПТ = 0,01 \cdot 490 = 4,9 \text{ кг/м}^3;$$

$$СП = 490 \cdot 0,003 = 1,47 \text{ кг/м}^3.$$

5. Витрата води за виразом (10):

$$V = 225 + 5 \cdot 0,62 - 4 \cdot 0 + 13 \cdot 0,9 + 2 \cdot 0,62^2 - 8 \cdot 0^2 - \\ - 4 \cdot 0,9^2 - 1 \cdot 0,62 \cdot 0,9 + 1 \cdot 0 \cdot 0,9 = 242 \text{ л}$$

6. Витрата піску за виразом (11):

$$П = \left(1000 - \left(\frac{324}{3,1} + \frac{166}{2,9} + \frac{242}{1} \right) \right) \cdot 2,65 = 1580 \text{ кг}$$

7. Значення мінімально можливої вартості 1 м³ суміші для 3D будівельного принтеру без врахування вартості води (знаходиться під час ітерацій в програмному додатку "Пошук рішення", вираз (7):

$$V_{\text{сум}} = 3 \cdot 324 + 1,5 \cdot 166 + 4,9 \cdot 26 + 1,47 \cdot 16 + 1580 \cdot 0,25 = 1767 \text{ грн.}$$

На етапі формулювання задачі визначення складу суміші для 3D принтеру необхідно коректно задаватись необхідними значеннями властивостей. Очевидно, що ці значення повинні знаходитись в межах мінімально та максимально можливого значення вихідного параметру, оскільки саме в цих межах поліноміальна модель адекватно описує досліджувану властивість.

Розрахунковий оптимальний номінальний склад цементно-шлакової суміші для 3D будівельного принтеру:

ПЦ = 324 кг/м³; ДГШ = 166 кг/м³; В = 242 л/м³; добавка ПТ = 4,9 кг/м³; добавка СП - 1 = 1,47 кг/м³, П = 1580 кг/м³.

Висновки. На основі отриманих експериментально-статистичних моделей властивостей сумішей для 3D бетонування запропонована методика проектування їх складів. Із застосуванням математичного програмування, що реалізується програмним середовищем Microsoft Excel і його додатку "Пошук рішення", показана можливість вирішення завдання проектування оптимальних складів будівельних сумішей для 3D принтеру.

1. Дворкін Л.Й. Цементно-шлакові суміші для 3d принтеру. / Л.Й, Дворкін, В. В. Марчук, Ю.Ю. Зятюк. // Науково-технічний збірник "Будівельні матеріали, та виробы" Вип. 1-2 (102) – 2021. Київ.С. – 14-19.

Dvorkin L.I. Tsementno-shlakovi sumishi dlia 3d prynteru. / L.I, Dvorkin, V. V. Marchuk, Yu.Iu. Ziatyuk. // Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk "Budivelni materialy, ta vyroby" Vyr. 1-2 (102) – 2021. Kyiv.C. – 14-19.

2. Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Тхань Куй Анализ существующих технологических решений 3d-печати в строительстве DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876.

Ynozemtsev A.S., Korolev E.V., Zyonh Tkhan Kui Analyz sushchestvuiushchykh tekhnolohycheskykh reshenyi 3d-pechaty v stroytelstve DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876.

3. Warszawski A., Navon R. Implementation of robotics in building: Current status and future prospects // Journal of construction Engineering and Management. 1998. № 124 (1). P. 31–41.

4. Chen L. et al. The research status and development trend of additive manufacturing technology // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. P. 1–10.

5. Hager I., Golonka A., Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? Procedia Engineering. 2016. No. 151. Pp. 292-299.

6. 3D Printing of Concrete: State of the Art and Challenges of the Digital Construction Revolution, First Edition. Edited by Arnaud Perrot. ISTE Ltd 2019. Published by ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc.

7. Ibrahim M.I. Estimating the sustainability returns of recycling construction waste from building projects // Sustainable Cities and Society. 2016. № 23. P. 78–93.

8. 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.

Dvorkin L.I. Rozv'iazuvannia budivelno-tekhnologichnykh zadach metodamy matematychnoho planuvannia eksperymentu / Dvorkin L.I., Dvorkin O.L., Zhytkovskyi V.V. - Rivne: NUVHP, 2011- 174 s.