



Дворкін Л. Й.



Марчук В. В.



Зятюк Ю. Ю.

**Дворкін Л. Й.**, д.т.н., професор, зав. кафедрою технології будівельних виробів і матеріалознавства,  
✉ l.i.dvorkin@nuwm.edu.ua ☎ +38 (068) 353 33 38;  
**Марчук В. В.**, к.т.н., доцент кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства,  
✉ v.v.mrchuk@nuwm.edu.ua ☎ +38 (097) 874 11 14;  
**Зятюк Ю.Ю.**, к.т.н., доцент  
✉ y.y.ziatiuk@nuwm.edu.ua ☎ +38 (099) 258 81 88;  
Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне.

**Dvorkin Leonid**, Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Building Products Technology and Materials Science,  
✉ l.i.dvorkin@nuwm.edu.ua ☎ +38 (068) 353 33 38;  
**Vitaliy Marchuk**, Ph.D., Senior Lecturer,  
Department of Building Products Technology and Materials Science,  
✉ v.v.mrchuk@nuwm.edu.ua ☎ +38 (097) 874 11 14;  
**Yu. Ziatuk**, candidate of technical sciences, associate professor,  
✉ y.y.ziatiuk@nuwm.edu.ua ☎ +38 (099) 258 81 88;  
National University of Water and Environmental Engineering, Rivne.

## ЦЕМЕНТНО-ШЛАКОВІ СУМІШІ ДЛЯ 3D ПРИНТЕРУ

### CEMENT SLAG CONCRETE FOR 3D PRINTER

### ЦЕМЕНТНО-ШЛАКОВЫЕ СМЕСИ ДЛЯ 3D ПРИНТЕРА

**Анотація.** У статті показана можливість отримання цементно-шлакових дрібнозернистих бетонних сумішей та бетонів, які можуть бути використані в якості робочих сумішей для 3D-принтера. Отриманий комплекс експериментально-статистичних моделей дозволяє прогнозувати вплив факторів, що характеризують склад суміші на основні властивості бетонів, що призначені для 3D бетонування. Розроблені склади сумішей дозволяють забезпечити необхідні значення терміну тужавлення, структурної міцності, міцності на розколювання та стиску у ранньому та проектному віці. Встановлений вплив доменного гранульованого шлаку та добавки прискорювача твердіння на комплекс властивостей запропонованих дрібнозернистих бетонів для 3D бетонування.

**Ключові слова:** портландцемент, доменний гранульований шлак, 3D будівельний принтер, адитивні технології, суперпластифікатор, прискорювач твердіння.

**Abstract.** 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 compression 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.

**Key words:** portland cement, blast furnace slag, 3D construction printer, additive technologies, superplasticizer, hardening accelerator.

**Анотация.** В статье показана возможность получения цементно-шлаковых мелкозернистых бетонных смесей и бетонов, которые могут быть использованы в качестве рабочих смесей для 3D-принтера. Полученный комплекс экспериментально-статистических моделей позволяет прогнозировать влияние факторов, характеризующих состав смеси на основные свойства бетонов, предназначенных для 3D бетонирувания. Разработанные составы смесей позволяют обеспечить требуемые значения срока схватывания, структурной прочности, прочности на раскалывание и сжатия в раннем и проектном возрасте. Установлено влияние доменного гранулированного шлака и добавки ускорителя твердения на комплекс свойств предложенных мелкозернистых бетонов для 3D бетонирувания.

**Ключевые слова:** портландцемент, доменный гранулированный шлак, 3D строительный принтер, аддитивные технологии, суперпластификатор, ускоритель твердения.

#### Вступ

Однією з основних задач при застосуванні 3D-друку є підбір складів композиційних будівельних матеріалів, що відповідають необхідним експлуатаційним характеристикам будівлі, що зводиться, які задовольняли б вимогам технології екструзії. Найчастіше з цією метою використовують дрібнозернисті бетонні суміші, що володіють необхідною міцністю, морозостійкістю, підвищеними адгезійними і когезійними властивостями та швидкістю твердіння.

Ефективним напрямком зниження витрати в'язучих в бетонах і регулювання їх будівельно-технічних властивостей є введення високоактивних мінеральних добавок [1].

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Останніми дослідженнями та публікаціями присвяченими адитивній технології встановлений рекомендований діапазон технічних вимог до будівельних сумішей для 3D-друку (табл. 1) [2-5].

На даний час виконано ряд розробок в яких рекомендовані суміші з урахуванням особливостей 3D-принтерів і споруд, що зводяться з їх застосуванням (табл.2) [2].

## Основні показники властивостей будівельних сумішей і бетонів на їх основі для 3d друку

№ з/п	Вимога	Функціональне призначення	Показник
<b>1</b>			
<b>Бетонні суміші</b>			
1	Водоутримуюча здатність, %	Запобігання втрати вологи при транспортуванні і перемішуванні суміші	Не менш 97
1.2	Розшаровуваність, %	Забезпечення однорідності при виготовленні, транспортуванні по трубах і екструзії	Не більше 10
1.3	В'язкість, Па·с	Забезпечення можливості транспортування по трубах і стабільного дозування суміші	109-1012
1.4	Структурна міцність, Па	Забезпечення заданої геометрії суміші при екструзії (відсутність обривів в процесі укладання)	Не менше 800
1.5	Швидкість тужавлення, хв	Забезпечення міцності нижнього шару перед укладанням наступного шару	Не більше 20 після екструзії
1.6	Рухомість суміші, по зануренню конуса, см	Забезпечення стабільної геометрії після екструзії	8...12
1.7	Рухомість суміші, по віскозиметру Суттарда, мм	Забезпечення стабільної геометрії після екструзії	150...170
<b>2</b>			
<b>Властивості бетону</b>			
2.1	Міцність при стиску, МПа	Забезпечення міцніших властивостей конструкцій	Не менше 20
2.2	Середня густина, кг/м <sup>3</sup>	Забезпечення заданої ваги і міцності конструкцій	600-2000
2.3	Адгезія, МПа	Забезпечення зчеплення між шарами суміші для міцності і однорідності конструкції	Не менш 2
2.4	Теплопровідність, Вт/(м·К)	Теплоізоляція елементів будівель	Не більше 0,7
2.5	Морозостійкість, цикли	Забезпечення довговічності конструкцій і стійкості до сезонних перепадів температур	Не менш 100

Таблиця 2.

## Рекомендовані будівельні суміші для 3D-друку

№	Розробник	Матеріал	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Міцність МПа**		Переваги технології	Недоліки технології
				при згині	при стиску		
1	WinSun (Китай)	Цементно-піщана суміш з відходами від знесення будівель, скловолокнами і спеціальними добавками	2000-2200	8,2	34,5	Використовуються продукти переробки будівельних матеріалів, мікроармування	Вимагає великих виробничих площ і обслуговуючого персоналу, наявність нефункціональної опалубки, нерівна вертикальна поверхня
2	AMT-СПЕЦ-ABIA (Росія)	Високоміцна цементна суміш, піщаний склофіробетон M300	2200-2350	*	від 30	Мікроармування, варіативність матеріалів	Наявність нефункціональної опалубки, нерівна вертикальна поверхня
3	StroyBot (3D Printer)	Геополімерний бетон з домішками вулканічного попелу	2100-2250	-	-	Використання місцевої сировини для бетонних сумішей	Нерівна вертикальна поверхня
4	Bet-Abram (Словенія)	Торкретбетон з піщаним (0-4 мм) і гравійним (4-8 мм) заповнювачами	2300-2350	-	-	Наявність в складі протиусадочних добавок	Нефункціональна опалубка
5	Contour Crafting Corp. (США)	Цементний розчин для опалубки, бетон для конструкції	2250	-	45-50	Вирівняна вертикальна поверхня, армування	Низька міцність між шарами
6	ApisCor (Росія)	Дрібнозернистий фіробетон B20 F200 W6	2050	-	27,4	Мікроармування	Нерівна вертикальна поверхня, обмеження по висоті 3,3 м
7	Loughborough University (Велика Британія)	Цементний бетон	2250-2350	12-13	100-110	Висока міцність, армування конструкцій	Нерівна вертикальна поверхня
8	СуBe Construction (Нідерланди)	Цементний бетон	2200	6	45	Вирівняна вертикальна поверхня, швидке тужавлення і твердіння шарів	Несинхронізовані подача суміші і рух голівки принтера
9	Batiprint 3D (Франція)	Пінополіуретанова опалубка, заповнена бетоном	30	-	0,16	Опалубка виконує теплоізоляційну функцію	Неконтрольовані геометричні параметри конструкцій, нерівна вертикальна поверхня, яка потребує захисту від зовнішнього впливу
10	DUS Archi-tects (Нідерланди)	Вторинний пластик для опалубки, полегшений бетон	-	-	-	Використовується вторинна сировина	Тривалість процесу виготовлення опалубки
11	MIT Media Lab (США)	Пінополіуретанова опалубка, заповнена бетоном	-	-	-	Мобільність екструдера, опалубка виконує теплоізоляційну функцію, виконується одночасне армування конструкцій	Неконтрольовані геометричні параметри конструкцій, нерівна вертикальна поверхня, яка потребує захисту від зовнішнього впливу

\* – дані не приведені.

\*\* – після випробування стандартних відформованих зразків або вирубок при навантаженні перпендикулярно сформованому шару.

**Мета даної роботи** полягала в отриманні комплексу експериментально-статистичних моделей, що дозволяють визначити вплив окремих технологічних факторів на нормовані властивості цементно-шлакових сумішей для 3D принтерів.

**Аналіз експериментальних досліджень**

У наших дослідженнях в якості вихідних матеріалів дрібнозернистих бетонів для 3D-друку використовували портландцемент І-типу М500 ПАТ «Волинь-цемент»; доменний гранульований шлак (ДГШ) Криворізького металургійного комбінату, хімічний склад якого (%):  $\text{SiO}_2 - 39,51$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 6,47$ ;  $\text{Fe}_2\text{O} - 30,14$ ;  $\text{CaO} - 47,19$ ;  $\text{MgO} - 3,12$ ;  $\text{SO}_3 - 1,76$ ;  $\text{MnO} - 1,14$ ; в.п.п. – 0,59, модуль основності –  $M_o - 1,27$ , модуль активності –  $M_a - 0,16$ , коефіцієнт якості –  $K_a - 1,44$ . 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  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (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 (рис. 1).



Рис. 1. Лабораторний принтер

Витрату води підбирали для отримання сумішей придатних для екструзійного формування, необхідна рухомість суміші по зануренню стандартного конуса становила – 8...10 см. Структурна міцність бетонної суміші визначалася на приладі (рис. 2, 3), що дозволяє вимірювати питомі навантаження в Па, які витримує суміш через певний проміжок часу, необхідний для формування одного шару. Випробування властивостей дрібнозернистих бетонних сумішей та бетонів проводили згідно з ДСТУ Б В.2.7-176:2009.

Для оцінки впливу основних факторів та вибору оптимальних параметрів складу сумішей були проведені алгоритмізовані експерименти відповідно до типового трирівневого трьохфакторного плану  $V_3$  [6].

**Матеріали та методи досліджень**

Умови планування експериментів наведені в табл. 3. Матриця планування та експериментальні результати наведені в табл. 4 та табл. 5.

Основним завданням було визначити вплив факторів на формуємість, термін придатності (початок тужавлення), структурну міцність (через 10, 25 та 40 хв після замішування), міцність на стиск у віці 3 та 28 діб, міцність на розтяг при розколюванні.

Після обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримали рівняння регресії властивостей бетонних сумішей та бетонів, які наведені у табл. 6.

Таблиця 3.

**Умови планування експериментів**

Фактори впливу		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вид	Кодований	-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, $\text{кг/м}^3$ , (В'яз)	$X_3$	300	400	500	100



Рис. 2. Прилад для визначення структурної міцності бетонів екструдованих 3D принтером

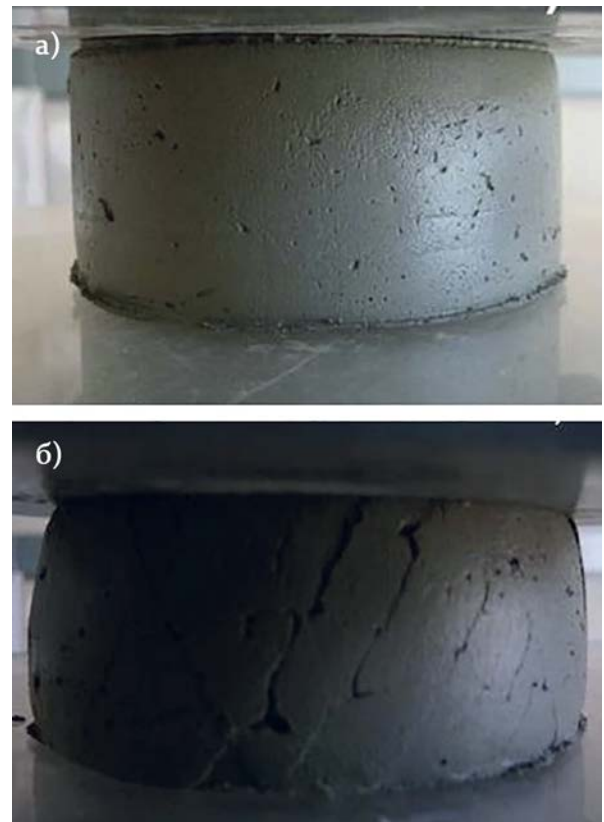


Рис. 3. Приклад визначення структурної міцності: а) зразок витримує навантаження (забезпечується структурна міцність), б) зразок руйнується

Матриця планування та склад сумішей для 3D принтеру

№	Значення факторів						Склад суміші, кг/м <sup>3</sup>				Витрата води, л/м <sup>3</sup>
	Кодовані			Натуральні			ПЦ	ДГШ	ПТ	Пісок	
X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	ДГШ, %	ПТ, %	Вяж, кг/м <sup>3</sup>						
1	1	1	1	30	0,6	500	350	150	10	1318	333
2	1	1	-1	30	0,6	300	90	90	6	2006	180
3	1	-1	1	30	0	500	150	150	0	1470	347
4	1	-1	-1	30	0	300	90	90	0	1995	188
5	-1	1	1	50	0,6	500	250	250	10	1315	333
6	-1	1	-1	50	0,6	300	150	150	6	1902	180
7	-1	-1	1	50	0	500	250	250	0	1296	347
8	-1	-1	-1	50	0	300	150	150	0	1891	188
9	1	0	0	30	0,3	400	120	120	4	1772	250
10	-1	0	0	50	0,3	400	200	200	4	1699	225
11	0	1	0	40	0,6	400	160	160	8	1669	260
12	0	-1	0	40	0	400	160	160	0	1749	235
13	0	0	1	40	0,3	500	200	200	5	1411	333
14	0	0	-1	40	0,3	300	120	120	3	1959	180
15	0	0	0	40	0,3	400	160	160	4	1769	225
16	0	0	0	40	0,3	400	160	160	4	1769	225
17	0	0	0	40	0,3	400	160	160	4	1769	225

Таблиця 5.

Експериментальні результати досліджень властивостей сумішей для 3D принтеру

№	Термін придатності хв	Структурна міцність, Па, після замішування			Міцність у віці 3 діб, МПа		Міцність у віці 28 діб, МПа	
		10 хв	25 хв	40 хв	на р.р.* f <sub>td</sub>	на стиск f <sub>cm</sub>	на р.р. f <sub>td28</sub>	на стиск f <sub>cm28</sub>
1	35	5320	8513	15160	6,6	19,7	9,3	32,7
2	60	3780	5679	10700	4,5	10,8	6,7	21,2
3	85	3916	5482	9225	5,7	16,9	8,1	27,6
4	145	2730	4096	7000	3,9	7,8	6,1	19,5
5	70	4600	6916	12300	4,9	13,8	6,6	19,4
6	95	3356	5034	9125	4,1	8,8	5	13,4
7	120	3426	5139	7480	4,4	13,1	6,1	17,1
8	160	2521	3781	6545	3,5	7,8	4,8	9,4
9	55	3637	5455	9375	4,3	12,9	7,7	21,7
10	85	3177	4765	7710	3,6	10,6	5,1	16,4
11	50	4020	6030	11230	4,7	12	6,5	20,5
12	120	2900	4350	6970	4,0	12,7	6,5	18,5
13	50	4002	6003	9880	6,3	17,8	8,7	28,5
14	95	2782	4173	7180	4,2	9,4	5,2	13,0
15	65	3275	4913	8240	5,0	10,9	7,2	21,7
16	70	3300	4950	8260	4,7	10,6	6,9	21,4
17	65	3310	4965	8200	4,9	10,8	7,1	21,6

Таблиця 6.

Рівняння регресії властивостей бетонних сумішей та бетонів для 3D принтеру

Вихідні параметри	Статистичні моделі
Термін придатності, хв	$T = 66,4 - 15,0 \cdot X_1 - 32,0 \cdot X_2 - 19,5 \cdot X_3 + 4,1 \cdot X_1^2 + 19,1 \cdot X_2^2 + 6,6 \cdot X_3^2 - 2,5 \cdot X_1 X_2 - 2,5 \cdot X_1 X_3 + 6,3 \cdot X_2 X_3$ (1)
Структурна міцність, Па, через 10 хв після замішування	$P_m = 3295 + 230 \cdot X_1 + 558 \cdot X_2 + 610 \cdot X_3 + 124 \cdot X_1^2 + 177 \cdot X_2^2 + 108 \cdot X_3^2 + 55 \cdot X_1 X_2 + 72 \cdot X_1 X_3 + 87 \cdot X_2 X_3$ (2)
Структурна міцність, Па, через 40 хв після замішування	$P_m = 8258 + 830 \cdot X_1 + 2130 \cdot X_2 + 1350 \cdot X_3 + 296 \cdot X_1^2 + 853 \cdot X_2^2 + 283 \cdot X_3^2 + 280 \cdot X_1 X_2 + 322 \cdot X_1 X_3 + 560 \cdot X_2 X_3$ (3)
Міцність на стиск у віці 3 діб	$f_{cm} = 11,66 + 1,4 \cdot X_1 + 0,68 \cdot X_2 + 3,67 \cdot X_3 - 0,537 \cdot X_1^2 + 0,063 \cdot X_2^2 + 1,313 \cdot X_3^2 + 0,513 \cdot X_1 X_2 + 0,963 \cdot X_1 X_3 - 0,062 \cdot X_2 X_3$ (4)
Міцність на розтяг при розколюванні у віці 28 діб	$f_{tn} = 6,89 + 1,03 \cdot X_1 + 0,25 \cdot X_2 + 1,1 \cdot X_3 - 0,328 \cdot X_1^2 - 0,228 \cdot X_2^2 + 0,222 \cdot X_3^2 + 0,138 \cdot X_1 X_2 + 0,213 \cdot X_1 X_3 + 0,113 \cdot X_2 X_3$ (5)
Міцність на стиск у віці 28 діб	$f_{cm} = 20,74 + 4,7 \cdot X_1 + 1,51 \cdot X_2 + 4,88 \cdot X_3 - 1,01 \cdot X_1^2 - 0,56 \cdot X_2^2 + 0,69 \cdot X_3^2 + 0,06 \cdot X_1 X_2 + 0,74 \cdot X_1 X_3 + 0,21 \cdot X_2 X_3$ (6)

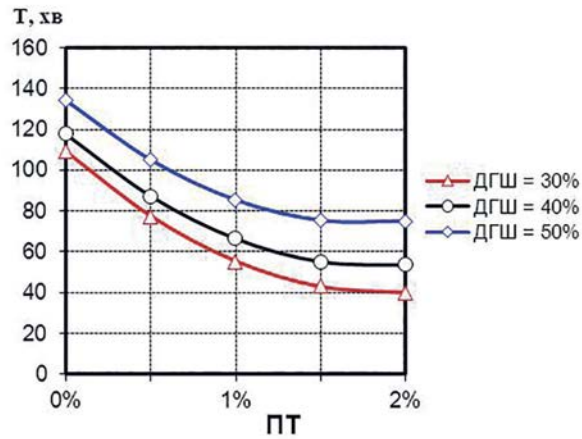
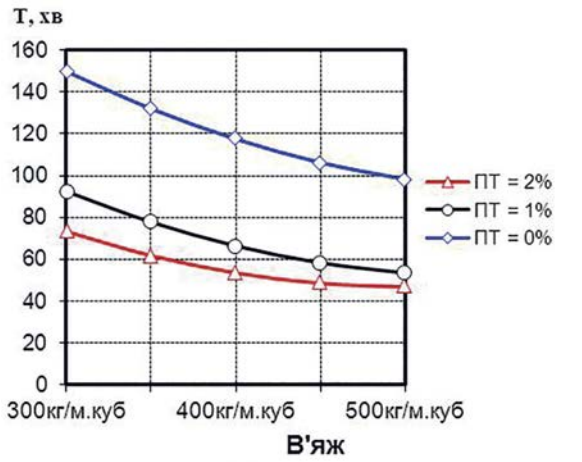


Рис. 4. Графічні залежності показника терміну придатності (формуємості) бетонів для 3D принтеру з використанням ДГШ та добавки прискорювача твердіння

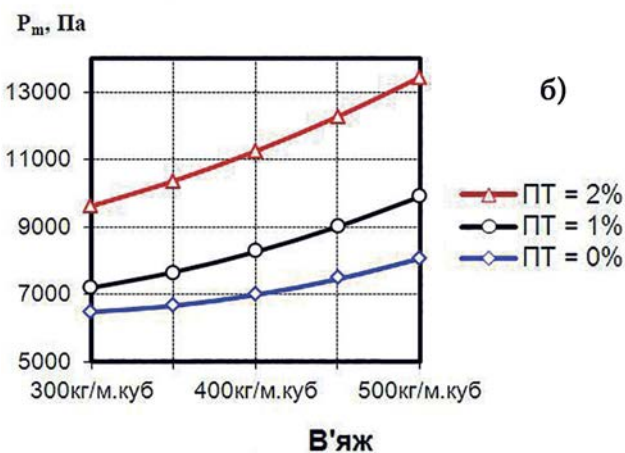
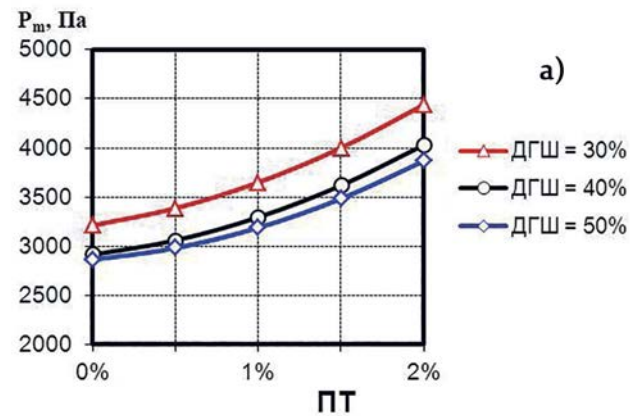


Рис. 5. Графічні залежності структурної міцності бетонів через 10 хв (а) та 40 хв (б)

На основі отриманих результатів було побудовано графічні залежності (рис. 4-9) властивостей бетонних сумішей та бетонів з використанням ДГШ та добавки прискорювача твердіння.

Термін придатності сумішей на основі доменного гранульованого шлаку зменшується з 2,5 год до 40...45 хв при витраті в'язучого 500 кг/м<sup>3</sup>, мінімальній частці ДГШ у в'язучому (30%) та використанні добавки прискорювача твердіння у кількості 2% від в'язучого (рис. 4). Слід відмітити, що більш суттєвий вплив прискорювача спостерігається при дозуванні до 1%, а при подальшому підвищенні його вмісту позитивний характер спостерігається тільки за умови мінімальної частки ДГШ у в'язучому. Суттєве зниження терміну придатності досягається при збільшенні кількості цементно-шлакового в'язучого.

З рис. 6 помітно, що бетони показують найменші значення міцності на стиск у віці 3 діб при відсутності в складі добавки прискорювача твердіння та мінімальному вмісті в'язучого. За умови введення ПТ і поступового зниження частки ДГШ спостерігається більш активний ріст міцності при витраті добавки прискорювача твердіння. Збільшення вмісту в'язучого у суміші зумовлює значно більш стрімке підвищення міцності, в порівнянні із збільшенням частки ПТ, що має лінійний характер впливу.

Згідно рис. 7 для міцності бетонів на розтяг при розколюванні у віці 28 діб визначальним є вміст в'язучого та частка ДГШ в ньому. Збільшення кількості в'язучого з 300 до 500 кг/м<sup>3</sup> дозволяє підвищувати міцність на 35...40% при мінімальному вмісті ДГШ, а в сумішах з максимальною часткою шлаку спостерігається ріст міцності на 25...30%. Також слід відмітити позитивний ефект введення добавки прискорювача твердіння.

Аналіз моделей (табл.6) показує, що у діапазоні варіювання досліджуваних факторів міцність бетонів для 3D принтеру при стиску, які містять ДГШ та добавку прискорювача твердіння, коливається в межах 9,4...32,7 МПа. Досліджувані фактори за впливом на величину міцності можна розмістити у наступний спадаючий ряд: В'яз > ДГШ >> ПТ, також спостерігається суттєвий вплив ефектів взаємодії таких факторів, як вміст в'язучого та шлаку.

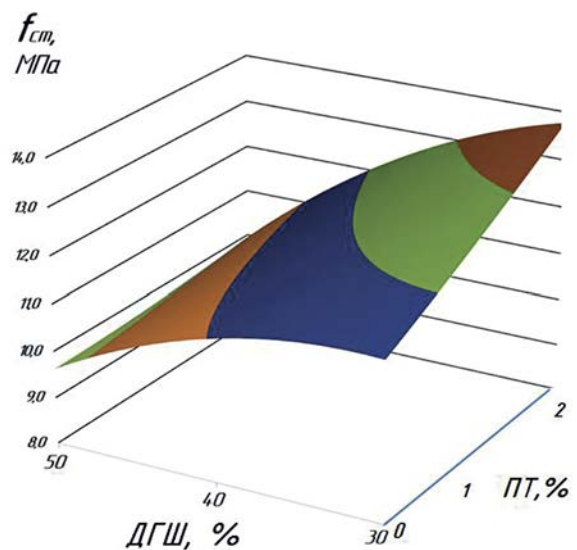


Рис. 6. Поверхня відгуку міцності на стиск у віці 3 діб сумішей для 3D принтеру з використанням ДГШ та добавки прискорювача твердіння

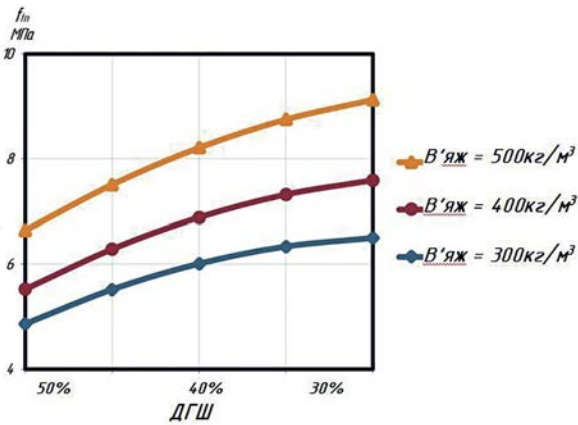


Рис. 7. Графічні залежності міцності на розтяг при розколюванні у віці 28 діб бетону для 3D принтеру з використанням ДГШ та добавки прискорювача твердіння

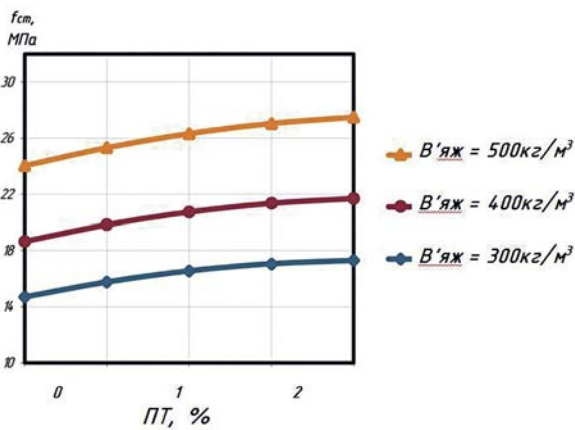


Рис. 8. Графічні залежності міцності на стиск у віці 28 діб бетону для 3D принтеру

Згідно отриманих графічних залежностей (рис. 8) при зниженні частки ДГШ з 50% до 40% від в'язучого та поступовому збільшенні в'язучого з 300 кг/м<sup>3</sup> до 500 кг/м<sup>3</sup> спостерігається підвищення марочної міцності бетонів на 35...40% при вмісті ДГШ 40...50% та на 15...20% при мінімальній частці шлаку. З рисунків помітно, що вплив добавки прискорювача твердіння має також позитивний характер, який більш суттєво проявляється при максимальному вмісті в'язучого. При цьому ефективним дозуванням є вміст – 0,7...1,3%, подальше збільшення не призводить до суттєвого росту міцності.

### Висновки

Використання в'язучого, що містить 30...40% меленого доменного гранульованого шлаку та прискорювач твердіння у кількості 1...2% дозволяє отримати суміші придатні для 3D-друку. Підвищений вміст ПТ понад 1% від маси в'язучого призводить до збільшення міцності при стиску і розколюванні бетону, а також структурної міцності. Збільшення частки ДГШ у в'язучій суміші супроводжується деяким збільшенням водопотреби суміші для забезпечення необхідної екструзійності та спадом міцності.

Термін придатності сумішей для 3D бетонування на основі доменного гранульованого шлаку зменшується з 2,5 год до 40...45 хв при витраті в'язучого 500 кг/м<sup>3</sup>, мінімальній частці ДГШ у в'язучому (30%) та використанні добавки прискорювача твердіння у кількості 2% від в'язучого.

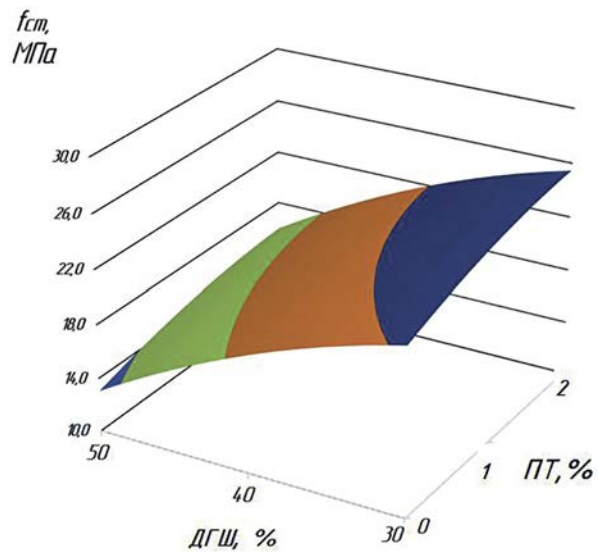


Рис. 9. Поверхня відгуку міцності на стиск у віці 28 діб сумішей для 3D принтеру з використанням ДГШ та добавки прискорювача твердіння

Міцність бетонів для 3D принтеру при стиску, які містять ДГШ та добавку прискорювача твердіння, коливається в межах 9,4...32,7 МПа. При зниженні частки ДГШ з 50% до 40% від маси в'язучого та поступовому збільшенні її з 300 кг/м<sup>3</sup> до 500 кг/м<sup>3</sup> спостерігається підвищення марочної міцності бетонів на 35...40% при вмісті ДГШ 40...50% та на 15...20% при мінімальній частці шлаку. Позитивний характер впливу добавки ПТ є більш суттєвим при максимальному вмісті в'язучого.

### Література:

1. Дворкин Л.И. Цементные бетоны с минеральными наполнителями. / Л.И. Дворкин, В.И. Соломатов, В.Н. Выровой // – К.:Будівельник, 1991 – 136с.
2. Иноземцев А.С., Королев Е.В., 3. Тхань Куй Анализ существующих техноло-гических решений 3d-печати в строительстве DOI:10.22227/1997-0935.2018.7.863-876
3. 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.
4. Демьяненко О.В., Копаница Н.О., Сорокина Е.А. Влияние добавки термомодифицированного торфа на технологические свойства строительных смесей для 3d-печати. Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018; (4):122-134.
5. Warszawski A., Navon R. Implementation of robotics in building: Current status and future prospects // Journal of construction Engineering and Management. 1998. № 124 . P. 31-41.
6. L. Dvorkin, O. Dvorkin, Y. Ribakov / Mathematical experiments planning in concrete technology. Nova Science Publishers. 2011.