



Дворкін Л.І.



Житковський В.В.



Степасюк Ю.О.



Марчук В.В.

Дворкін Л. І., д.т.н., професор, зав. кафедрою технології будівельних виробів і матеріалознавства Національного університету водного господарства та природокористування, ☎ 068-353-33-38 ✉ l.i.dvorkin@nuwm.edu.ua

Житковський В. В., к.т.н., доцент, доцент кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства Національного університету водного господарства та природокористування, ☎ 096-564-00-27, zhitk@nuwm.edu.ua

Степасюк Ю. О., к.т.н., старший викладач кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства Національного університету водного господарства та природокористування, ☎ 096-800-11-67 ✉ y.o.stepasiuk@nuwm.edu.ua

Марчук В. В., к.т.н., старший викладач кафедри технології будівельних виробів і матеріалознавства Національного університету водного господарства та природокористування, ☎ 097-874-11-14 ✉ v.v.marchuk@nuwm.edu.ua

Dvorkin Leonid, Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Building Products Technology and Materials Science at the National University of Water and Environmental Engineering, ☎ 068-353-33-38 ✉ l.i.dvorkin@nuwm.edu.ua

Vadim Zhitkovsky, Ph.D., Associate Professor, Department of Building Products Technology and Materials Science, National University of Water and Environmental Engineering, ☎ 096-564-00-27, zhitk@nuwm.edu.ua

Yuriy Stepasyuk, Ph.D., Senior Lecturer, Department of Building Products Technology and Materials Science, National University of Water and Environmental Engineering, ☎ 096-800-11-67 ✉ y.o.stepasiuk@nuwm.edu.ua

Vitaliy Marchuk, Ph.D., Senior Lecturer, Department of Building Products Technology and Materials Science, National University of Water and Environmental Engineering, ☎ 097-874-11-14 ✉ v.v.marchuk@nuwm.edu.ua

ЕФЕКТИВНІ БУДІВЕЛЬНІ РОЗЧИНИ ДЛЯ 3D-ПРИНТЕРА

EFFECTIVE 3D PRINTER MORTARS

ЭФЕКТИВНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ РАСТВОРЫ ДЛЯ 3D-ПРИНТЕРА

Анотація. У статті наведені результати досліджень складу та властивостей швидкоотверднучих будівельних розчинів для зведення будівель способом 3D-друку на основі водостійких гіпсо-цементно-шлакових композицій. Показано вплив добавок-пластифікаторів різних видів на водопотребу розчинових сумішей, міцність розчинів та кінетику її набору. З використанням методу математичного планування експерименту отримані регресійні моделі впливу вмісту поліпропіленової фібри, повітрявтягувальної добавки та водо-в'язучого відношення на міцнісні характеристики та середню густину матеріалу, що дозволяють проектувати склад розчину із заданими властивостями.

Ключові слова: 3D принтер, розчин, гіпс, цемент, шлак, суперпластифікатор, міцність, математична модель.

Abstract. The article presents results of studies the composition and properties of quick-hardening mortars for the construction of buildings by 3D printing on the basis of water-resistant gypsum-cement-slag compositions. The influence of plasticizer additives of various kinds on the water demand of mortar mixtures, strength of mortars and kinetics of increasing strength is shown. Using the method of mathematical planning of the experiment, were obtained regression models of the influence of the content of polypropylene fiber, air-entraining additives and water-binder ratio on the strength characteristics and density of the material, allowing designing the composition of the mortars with the specified properties.

Keywords: 3D printer, mortar, gypsum, cement, slag, superplasticizer, strength, mathematical model.

Аннотация. В статье приведены результаты исследований состава и свойств быстротвердеющих строительных растворов для возведения зданий способом 3D-печати на основе водостойких гипсо-цементно-шлаковых композиций. Показано влияние добавок-пластификаторов различных видов на водопотребность растворовных смесей, прочность растворов и кинетику ее набора. С использованием метода математического планирования эксперимента получены регрессионные модели влияния содержания полипропиленовой фибры, воздухововлекающей добавки и водо-вязущего отношения на прочностные характеристики и среднюю плотность материала, позволяющие проектировать состав раствора с заданными свойствами.

Ключевые слова: 3D принтер, раствор, гипс, цемент, шлак, суперпластификатор, прочность, математическая модель.

Як відомо [1], вартість затрат праці при зведенні споруд становить 35-60% від загальних витрат на будівельні конструкції. З огляду на це все більшої актуальності набуває застосування роботизованих технологій будівництва. Одним з таких способів зведення будівель, що активно розвивається в останні роки є технологія пошарового (адитивного) безопалубочного формування за допомогою будівельних 3D-принтерів. 3D-друк будівельних конструкцій без опалубки дозволяє не лише підвищити швидкість будівництва, а й відкрити нові можливості для архітектурної творчості, дає змогу отримувати будівельні елементи будь якої конфігурації. Заміна людської праці автоматизованою технологією адитивного формування бетонних та залізобетонних конструкцій дозволяє проводити безпечно будівництво в

забруднених зонах, у зонах бойових дій або навіть на інших планетах [2].

Будівельні розчини для 3D-бетонування повинні володіти комплексом необхідних властивостей як реологічних, так і механічних. Серед них: досить висока в'язкість і структурна міцність розчину, подовжені терміни тужавлення і швидке твердіння, значна адгезія між окремими шарами, високі механічні характеристики при забезпеченні необхідних теплофізичних властивостей. Як показують результати досліджень [3], такі розчини доцільно отримувати на основі швидкоотверднучих в'язучих, наприклад гіпсових. Як відомо, основною проблемою даних в'язучих є низька водостійкість затверділого каменю, що суттєво обмежує область його викори-

стання. Одним з найбільш ефективних рішень в цьому напрямку можна вважати розробку О.В. Волженським та А.В. Ферронською гіпсоцементношлакових в'язучих речовин (ГЦШВ) [4]. Основна ідея розробки полягає в отриманні продукту, який би поєднував найкращі властивості будівельного гіпсу (здатність до швидкого твердіння та набору міцності) і портландцементу (водостійкість). Дані переваги дозволяють використовувати ГЦШВ як основу для виготовлення бетонів та розчинів для будівельних 3D принтерів.

Досліджували вплив добавок-пластифікаторів на міцнісні характеристики ГЦШВ та факторів складу на властивості розчину для 3D-друку. В якості вихідних матеріалів для проведення досліджень було використано будівельний гіпс марки Г-4 (м. Івано-Франківськ), портландцемент ПЦ-І-500 (м. Здолбунів «Волинь-Цемент») та доменний гранульований шлак Криворізького металургійного заводу. На основі попередніх досліджень були прийняті два основних складу ГЦШВ: склад №1 (будівельний гіпс (Г) – 60%, портландцемент (Ц) – 30%, доменний гранульований шлак (Ш) – 10%); склад №2 (будівельний гіпс – 60%, портландцемент – 20%, доменний гранульований шлак – 20%). При таких компонентних складах коефіцієнти розм'якшення складають 0,94 та 0,97 відповідно.

Для максимального зниження водопотреби та відповідного збільшення міцності на першому етапі досліджень до двох запропонованих складів в'язучого додатково водилися пластифікуючі добавки. В якості пла-

стифікуючих добавок на даному етапі було використано: лінгосульфат технічний (ЛСТ), суперпластифікатор нафталін формальдегідного типу СП-1 (Поліпласт-Україна), гіперпластифікатори на полікарбоксилатній основі Melflux 2651 F (BASF) та PCE-7 (UA-Chemical), а також гіперпластифікатор на поліакрилатній основі Dynamon SP-3 (Mareil). Витрати води в кожній точці визначалися із умови забезпеченості заданого розпливу 180 ± 5 мм по віскозиметру Суттарда. Результати експериментальних досліджень впливу пластифікуючих добавок на міцнісні характеристики ГЦШВ наведені в табл. 1.

Отримані результати вказують на те, що найбільша міцність гіпсоцементношлакового в'язучого, при використанні всіх вище зазначених пластифікуючих добавок, забезпечується при наступному його компонентному складі: будівельний гіпс – 60%, портландцемент – 20%, доменний гранульований шлак – 20%. Також встановлено, що найбільш ефективною пластифікуючою добавкою, при такому компонентному складі в'язучого є добавка гіперпластифікатор на полікарбоксилатній основі Melflux 2651 F. При цьому міцність в'язучого на другу годину твердіння складає 11,4 МПа та 30,2 МПа на 28 добу. Підвищення міцності зразків при використанні добавки гіперпластифікатор Melflux 2651 F пояснюється її більш сильним водоредуруючим ефектом у порівнянні з іншими використаними добавками.

Таблиця 1.

Результати експериментальних досліджень впливу пластифікуючих добавок на міцнісні характеристики ГЦШВ

Склад ГЦШВ	Вид добавки	Водов'язуче відношення (В/Вж)	Міцність при стиску ГЦШВ у віці, МПа			
			2 год.	1 доба	7 діб	28 діб
Г-60 % Ц-30 % Ш-10%	-	0,53	3,8	4,6	5,8	6,6
	ЛСТ	0,45	3,7	5,5	8,7	11,1
	Melflux 2651F	0,32	8	10,3	13,2	16,1
	СП-1	0,4	4,6	6,7	12,3	15,8
	Dynamon SP-3	0,38	5,1	10,2	12,3	13,9
	PCE-7	0,38	5,5	10,2	13,4	14,1
Г-60 % Ц-20 % Ш-20%	-	0,53	4,5	4,6	6,4	7
	ЛСТ	0,46	4,1	5,7	9,1	12
	Melflux 2651F	0,27	11,4	17,2	17,6	30,2
	СП-1	0,4	4,5	6,9	12,6	16,2
	Dynamon SP-3	0,39	5,6	10,6	12,5	14,4
	PCE-7	0,38	5,7	10,5	13,6	14,3

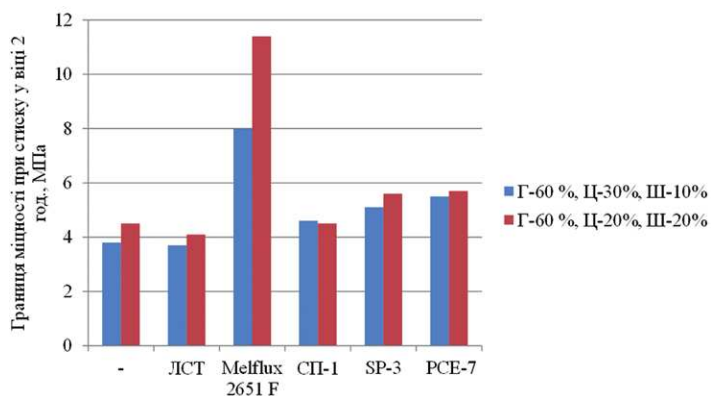


Рис. 1. Вплив пластифікуючих добавок на міцність ГЦШВ у віці 2 годин

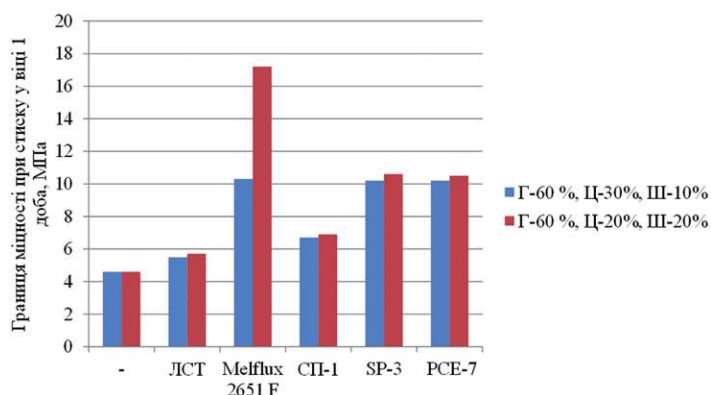


Рис. 2. Вплив пластифікуючих добавок на міцність ГЦШВ у віці 1 доба

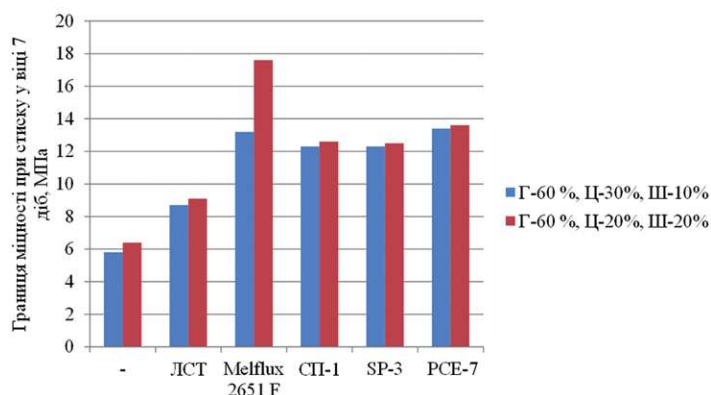


Рис. 3. Вплив пластифікуючих добавок на міцність ГЦШВ у віці 7 днів

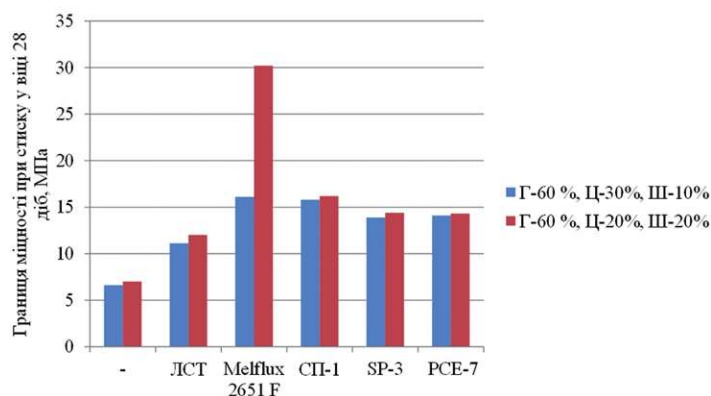


Рис. 4. Вплив пластифікуючих добавок на міцність ГЦШВ у віці 28 днів

Як відомо [5], при змішуванні суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу з портландцементом відбувається модифікація полікарбоксилатного ефіру шляхом заміщення в активних радикалах цієї сполуки іонів Na^+ на іони Ca^{2+} . При відсутності лужного середовища, яке виникає внаслідок утворення гідроксиду кальцію в процесі гідратації цементу, вищевказана модифікація неможлива. Введення до складу гіпсового в'язучого портландцементу, доменного гранульованого шлаку та суперпластифікатора полікарбоксилатного типу забезпечує інтенсивний водоредуруючий ефект за рахунок сумісної дії як електростатичного так і стеричного (просторового) ефекту молекул модифікованого полікарбоксилатного ефіру [6].

Для отримання більш гомогенного в'язучого і підвищення його міцності на наступному етапі досліджень його виготовляли шляхом спільного помелу будівельного гіпсу, портландцементу ПЦ I M500, доменного гранульованого шлаку та порошкоподібного суперпластифікатора полікарбоксилатного типу Melflux 2651 F у вищевказаних співвідношеннях. Величина питомої поверхні в'язучого складала $600 \text{ м}^2/\text{кг}$. Отримане в'язуче характеризується міцністю $21,2 \text{ МПа}$ у віці 2 годин та $42,7 \text{ МПа}$ у віці 28 днів, що в 1,5 рази перевищує показники в'язучого виготовленого шляхом змішування окремо взятих компонентів. Дане збільшення міцності пов'язане з тим, що при такій технології виготовлення водо-в'язуче відношення, необхідне для отримання тіста нормальної густоти знижується приблизно на 25% і відповідно складає 0,2.

Для перевірки можливості використання даного виду в'язучого для приготування швидкотверднучих розчинових композицій для 3D будівельного принтера, було виготовлено зразки розчину зі співвідношенням в'язуче:пісок – 1 :1. В якості в'язучого було використано ГЦШВ отримане шляхом сумісного помелу будівельного гіпсу марки Г-4 (60%), портландцементу ПЦ I M 500 (20%) та доменного гранульованого шлаку (20%). Додатково при помелі вводилась добавка суперпластифікатор Melflux 2651 F в кількості 0,5% від маси в'язучого. Всі експериментальні дослідження на даному етапі були виконані із застосуванням математичного планування експерименту. Для цього було реалізовано тривірневий план для трьох факторів ВЗ [7].

Внаслідок складності встановлення сталюї арматури при виготовленні будівель та споруд за технологією об'ємного 3D друку, для підвищення границі міцності при згині, додатково до складу розчину вводилась поліпропіленова фібра довжиною 12 мм. Вміст фібри варіювався в діапазоні від 0 до $5 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Для зниження середньої густини та відповідного підвищення термічного опору огорожуючих конструкцій до складу розчинів на основі запропонованого ГЦШВ було додатково введено добавку поризатор UFAPORE CC85. Вміст добавки коливався в діапазоні від 0 до 0,4% від маси в'язучого. Для зменшення теплопровідності розчинів до їх складу також можна вводити легкі заповнювачі (спучений перлітовий чи вермикулітовий пісок), проте введення добавок-поризаторів як правило, більш доцільний шлях як з економічного, так і з технологічного боку, враховуючи підвищену вартість легкого піску та складності з перемішуванням розчинів на легких заповнювачах. Умови планування та результати експериментів наведені в табл.2 та табл. 3.

Після проведення обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі середньої густини (ρ_0 , $\text{кг}/\text{м}^3$) та міцності розчинів досліджуваних в'язучих у віці 2 год. та 28 днів при згині ($R_{зг}^{2 \text{ год}}$, $R_{зг}^{28}$ (МПа)) та при стиску ($R_{ст}^{2 \text{ год}}$, $R_{ст}^{28}$ (МПа)) вигляді поліноміальних рівнянь регресії. Результати обробки та статистичного аналізу експериментальних даних наведені в табл. 4.

Таблиця 2.

Умови планування експерименту

№	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Код	Натуральний вид	-1	0	+1	
1	X ₁	Витрата фібри (Ф), кг/м ³	0	2,5	5	2,5
2	X ₂	Витрата поризатора (П), %	0	0,2	0,4	0,2
4	X ₃	Водов'язуче відношення (В/Вж)	0,23	0,25	0,27	0,02

Таблиця 3.

Результати експериментальних досліджень

№	Вміст фібри, кг/м ³	Вміст поризатора, %	Водов'язуче відношення (В/Вж)	R _{зг} ^{2год} , МПа	R _{ст} ^{2год} , МПа	R _{зг} ²⁸ , МПа	R _{ст} ²⁸ , МПа	ρ _о , кг/м ³
1	5	0,4	0,27	3,75	6,0	9,76	13,0	2049
2	5	0,4	0,23	4,15	8,2	11,71	30,6	1949
3	5	0	0,27	4,74	10,3	10,39	35,4	1735
4	5	0	0,23	5,99	11,1	12,64	49,0	1670
5	0	0,4	0,27	3,23	5,9	7,42	17,0	2115
6	0	0,4	0,23	3,58	7,5	8,25	27,4	2027
7	0	0	0,27	3,71	8,6	9,05	26,6	1637
8	0	0	0,23	4,91	8,8	10,18	33,0	1584
9	5	0,2	0,25	4,12	9,1	11,11	28,0	1801
10	0	0,2	0,25	3,32	7,9	8,71	22,0	1791
11	2,5	0,4	0,25	3,74	7,3	8,20	17,4	2042
12	2,5	0	0,25	4,90	10,1	9,48	31,4	1664
13	2,5	0,2	0,27	3,66	8,5	8,02	19,5	1827
14	2,5	0,2	0,23	4,46	9,7	9,56	31,5	1751
15	2,5	0,2	0,25	3,92	9,0	8,81	23,0	1796
16	2,5	0,2	0,25	3,92	9,2	8,76	23,1	1794
17	2,5	0,2	0,25	3,91	9,1	8,9	23,0	1800

Таблиця 4.

Експериментально-статистичні моделі середньої густини та міцності розчинів виготовлених на основі ГЦШВ

Вихідні параметри	Статистичні моделі
Середня густина, кг/м ³	$\rho_0 = 1796 + 5X_1 - 189,2X_2 - 38,4X_3 + 56,9X_2^2 - 7,1X_3^2 - 41X_1X_2 + 3X_1X_3 + 9X_2X_3$; (1)
Міцність при згині у віці 2 годин, МПа	$R_{зг}^{2год} = 3,92 + 0,4X_1 - 0,58X_2 - 0,4X_3 - 0,2X_1^2 + 0,4X_2^2 + 0,14X_3^2 - 0,13X_1X_2 - 0,01X_1X_3 + 0,21X_2X_3$; (2)
Міцність при стиску у віці 2 годин, МПа	$R_{ст}^{2год} = 9 + 0,6X_1 - 1,38X_2 - 0,6X_3 - 0,5X_1^2 - 0,3X_2^2 + 0,1X_3^2 - 0,4X_1X_2 - 0,15X_1X_3 - 0,35X_2X_3$; (3)
Міцність при згині у віці 28 діб, МПа	$R_{зг}^{28} = 8,81 + 1,2X_1 - 0,64X_2 - 0,77X_3 + 1,1X_1^2 + 0,03X_2^2 - 0,016X_3^2 + 0,25X_1X_2 - 0,26X_1X_3 + 0,08X_2X_3$; (4)
Міцність при стиску у віці 28 діб, МПа	$R_{ст}^{28} = 23,0 + 3X_1 - 7X_2 - 6X_3 + 2X_1^2 + 1,4X_2^2 + 2,5X_3^2 - 3,2X_1X_2 - 1,8X_1X_3 - 1,03X_2X_3$; (5)

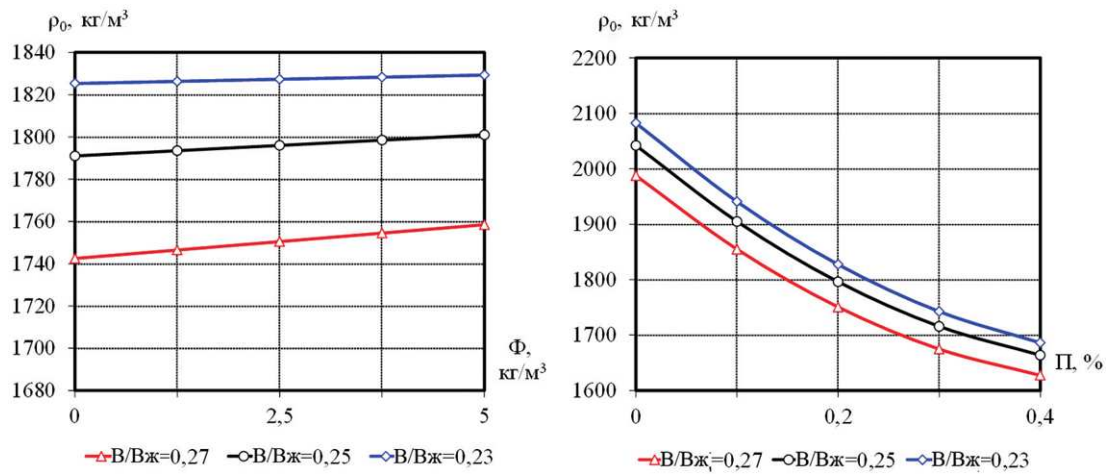


Рис. 5. Вплив варійованих факторів на середню густину розчинів виготовлених на онові ГЦШВ

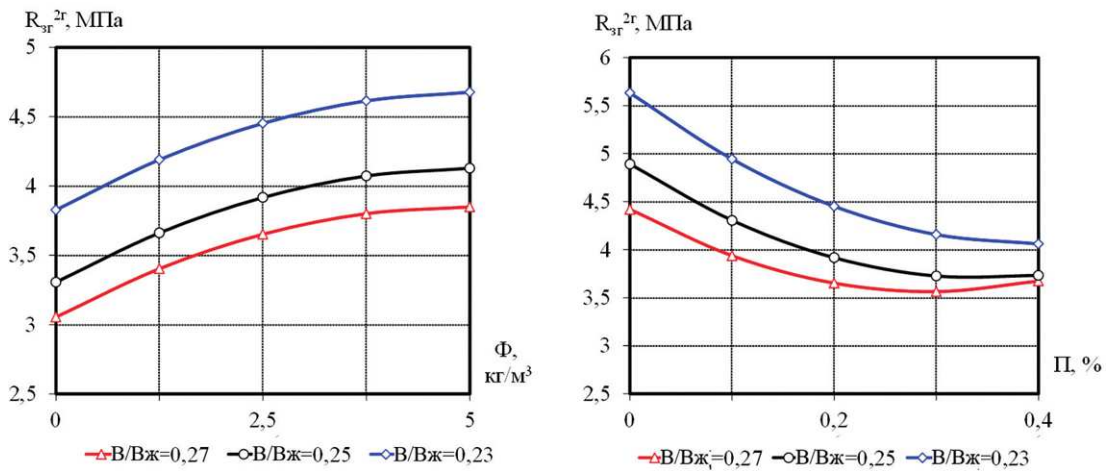


Рис. 6. Вплив варійованих факторів на міцність при згині розчинів виготовлених на онові ГЦШВ у віці 2 годин

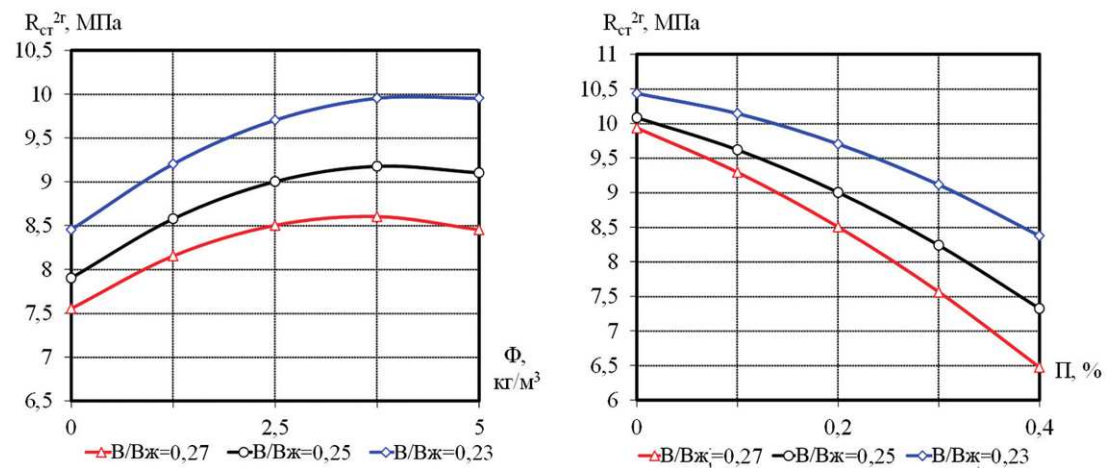


Рис. 7. Вплив варійованих факторів на міцність при стиску розчинів виготовлених на онові ГЦШВ у віці 2 годин

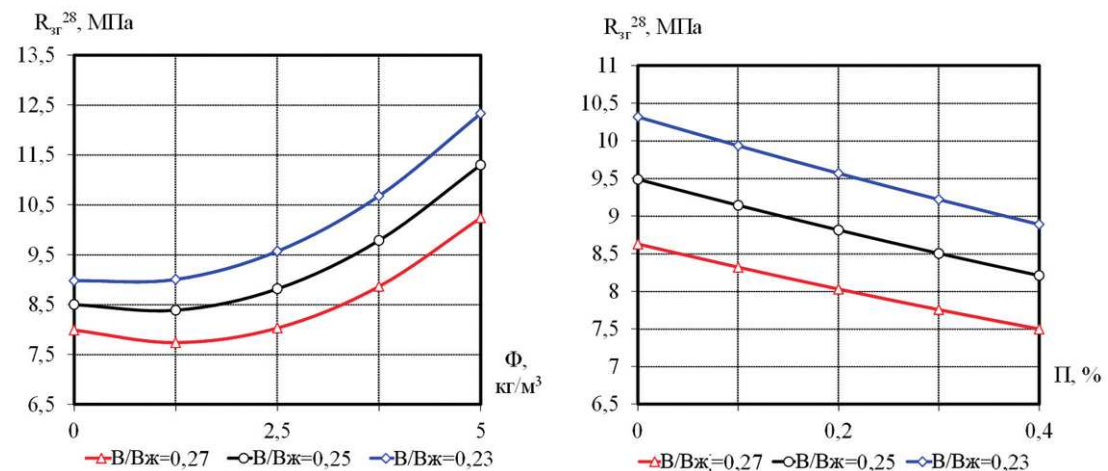


Рис. 8. Вплив варійованих факторів на міцність при згині розчинів виготовлених на онові ГЦШВ у віці 28 діб

В результаті аналізу отриманих експериментально-статистичних моделей та побудованих на їх основі графічних залежностей встановлено, що найбільш значимим фактором, який впливає на середню густину розчинів виготовлених на основі ГЦШВ впливає витрата добавки поризатора UFAPORE CC85. Збільшення його вмісту до 0,4 % від маси в'язучого дозволяє знизити середню густину зразків в середньому на 20 %. При цьому середня густина зразків зменшується від 2000-2100 кг/м³ до 1600-1700 кг/м³, що відповідно призводить до значного зменшення теплопровідності. Також до деякого зменшення середньої густини зразків призводить збільшення водо-в'язучого відношення, що відповідно викликає збільшення загальної пористості затверділого бетону.

Характер впливу варійованих факторів на міцнісні характеристики розчинів виготовлених на основі ГЦШВ, як впливає з аналізу комплексу отриманих експериментально-статистичних моделей (табл. 4) та побудованих на їх основі графічних залежностей (рис. 5...9), суттєво не змінюється при збільшенні тривалості твердіння. До зниження міцності розчинів як на стиск так і на згин призводить збільшення водо-в'язучого відношення та збільшення вмісту добавки-поризатора UFAPORE CC85, що основним чином пов'язано із різким збільшенням пористості зразків. Дещо знівелювати даний вплив дозволяє збільшення вмісту поліпропіленової фібри. Внаслідок трьохмірного дисперсного армування цементної матриці розчину волокнами фібри його міцність на розтяг при згині збільшується в середньому на 25 % у порівнянні з неармованими зразками. Збільшення вмісту фібри також позитивно впливає і на міцність при стиску. При цьому приріст міцності в середньому складає 15-20 %.

Отримані результати вказують на те, що на основі розроблених гіпсоцементношлакових в'язучих можна отримати швидкотверднучі розчиніві композиції, які характеризуються підвищеною міцністю та термічним опором і за своїми фізико-механічними характеристиками не поступаються звичайній керамічній цеглі.

Таким чином, проведені дослідження показали можливість отримання на основі гіпсоцементношлакового в'язучого модифікованого добавкою гіперпластифікатора на полікорбоксилатній основі швидкотверднучих розчинових композицій, які можуть бути використані як робочі суміші для 3D принтера. На основі розроблених розчинових композицій можна виконувати швидкісне зведення будівель та споруд як цивільного, так і військового призначення.

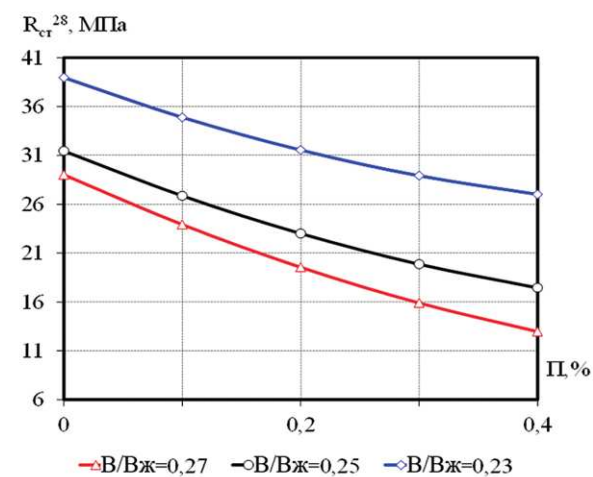
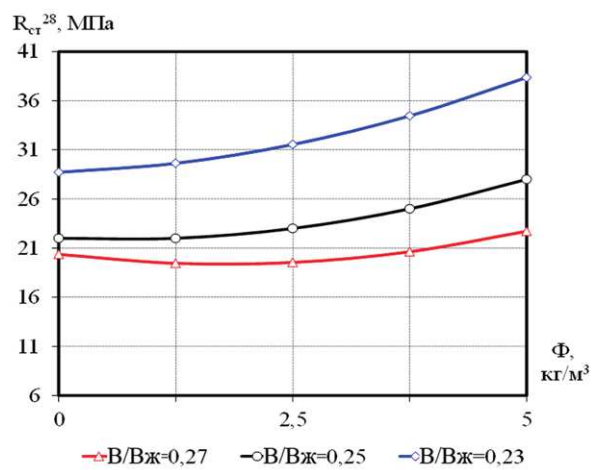


Рис. 9. Вплив варійованих факторів на міцність при стиску розчинів виготовлених на основі ГЦШВ у віці 28 діб

Література:

1. Di Carlo T., Khoshnevis B., Carlson A. Experimental And Numerical Techniques To Characterize Structural Properties Of Fresh Concrete. ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineer. 2013. Pp. V009T10A062-V009T10A062.
2. Marine Rubio, M Sonebi, S Amziane. 3D PRINTING OF FIBRE CEMENT-BASED MATERIALS: FRESH AND RHEOLOGICAL PERFORMANCES. ICBBM 2017, 2nd International Conference On Bio-Based Building Materials, Sofiane AMZIANE And Mohammed SONEBI, Jun 2017, Clermont Ferrand, France. fhal-01576184f.
3. Ibrahim M. I. M. Estimating the sustainability returns of recycling construction waste from building projects. Sustainable Cities and Society. 2016. No.23. Pp. 78-93.
4. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение). Справочник. Под общей ред. А.В. Ферронской. – М.: Издательство АСВ. 2004 – 488 с.
5. Дворкін Л. Й. Ефективні гіпсові матеріали: монографія / Дворкін Л.Й., Гавриш О.М., Безусяк О.В. та ін. – К.: Павленко, 2013. – 239 с.
6. Патент України № 43242 С04В 28/14 (2009.01).
7. Дворкін Л. Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту: навч. посіб. / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, В. В. Житковський. – Рівне: НУВГП, 2011. – 175 с