



УДК 691.533

<https://doi.org/10.31713/vt420257>

Левчик О. О. [1; ORCID ID: 0009-0003-6260-5750],
аспірант,
Дворкін Л. Й. [1; ORCID ID: 0000-0001-8759-6318],
д.т.н., професор,
Марчук В. В. [1; ORCID ID: 0000-0003-0999-0402],
к.т.н., доцент

¹Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

ВИСОКОМІЦНІ ШВИДКОТВЕРДНУЧІ РЕМОНТНІ СУМІШІ НА ОСНОВІ ГІПСОЦЕМЕНТНОШЛАКОВОГО В'ЯЖУЧОГО

У статті досліджується можливість отрисання швидкотверднучих ремонтних розчинів на основі гіпсоцементношлакового в'язучого (ГЦШВ) з використанням гіпсу різних марок за міцністю. Визначено вплив факторів складу суміші на кінетику розвитку міцності ремонтних розчинів. За допомогою методів математичного експериментування отримано набір поліноміальних моделей, що описують взаємозв'язок між складом і фізико-механічними властивостями ремонтних сумішей у різні терміни твердіння. Ці моделі були використані для аналізу впливу параметрів рецептури на міцність сумішей на стиск і згин. При експлуатації бетонні та залізобетонні конструкції піддаються впливу агресивних середовищ, динамічних навантажень та інших руйнівних факторів, що призводить до погіршення стану та часткового руйнування елементів будівель, що створює значний попит на ефективні матеріали та технології для ремонту та захисту конструкцій. В умовах післявоєнної відбудови та загального відновлення інфраструктури в Україні використання швидкотверднучих ремонтних сумішей дозволить інтенсивніше та ефективніше відновлювати пошкоджені будівлі та споруди, сприяючи поліпшенню умов життя та економічному відродженню. Розробка та застосування сучасних швидкотверднучих ремонтних сумішей на основі гіпсово-цементно-шлакових в'язучих є важливим кроком на шляху до модернізації будівельної галузі України.

Ключові слова: гіпсоцементношлакове в'язуче; швидкотверднучі ремонтні суміші; математичне моделювання; міцність на стиск; міцність на згин; післявоєнне відновлення.

Вступ. Аналіз останніх досліджень

В умовах післявоєнного відновлення та реконструкції інфраструктури України особливого значення набуває використання швидкотверднучих ремонтних розчинів на основі СБС, які

забезпечують оперативне та ефективне відновлення пошкоджених будівель і споруд. Застосування таких матеріалів сприяє покращенню умов проживання населення, прискоренню темпів відновлювальних робіт та економічному відродженню країни.

Розроблення та впровадження сучасних сухих ремонтних сумішей є важливим етапом на шляху до модернізації будівельної галузі та підвищення ефективності процесів реконструкції. Використання цих матеріалів дозволяє знизити витрати на будівництво та ремонт, оскільки вони забезпечують точне дозування компонентів, зручність транспортування і зберігання, а також мінімальні втрати під час приготування розчинів. Це особливо актуально для масштабних інфраструктурних проєктів, де важливими є стабільна якість, швидкість виконання робіт та економічність технологічних процесів.

Крім того, сухі ремонтні суміші є готовими до використання та не потребують спеціальних навичок під час підготовки. Умови, в яких проводяться ремонтні роботи, зазвичай є складнішими, ніж під час нового будівництва, тому такі матеріали повинні характеризуватися високою технологічністю, зручністю нанесення, мінімальною усадкою, швидким набором міцності, високою адгезією до основи та достатніми деформаційними властивостями [1; 2].

Проблема пошкодження бетонних конструкцій та дорожніх покриттів є надзвичайно актуальною, особливо в умовах тривалої експлуатації будівель і зростання транспортних навантажень. Такі об'єкти потребують регулярного обслуговування та своєчасного ремонту, для чого широко застосовуються різноманітні ремонтні розчини. Серед сучасних композиційних матеріалів особливе місце посідають сухі будівельні суміші на основі гіпсу, модифіковані мінеральними наповнювачами та полімерними добавками. Цей тип матеріалів сформував окрему нішу на ринку будівельних матеріалів, завдяки поєднанню технологічності, швидкого набору міцності та зручності у використанні.

Цементні ремонтні розчини, попри свою поширеність і добру сумісність з існуючим бетоном, мають певні обмеження та недоліки: вони схильні до усадки, характеризуються нижчою міцністю на згин і можуть призводити до утворення тріщин або відшарувань у зоні ремонту [1; 3]. Тому такі матеріали вимагають оптимізації складу з метою забезпечення швидкого твердіння, компенсації усадки, високої адгезії та покращених механічних характеристик [3].



Порівняно з цементними, гіпсові суміші мають низку специфічних властивостей, що визначають їхню область застосування. Для гіпсових систем складніше регулювати кінетику твердіння та розвиток міцності, проте завдяки використанню сучасних модифікаторів і активних мінеральних добавок ці матеріали набули широкого поширення. Їхні переваги полягають у зручності підготовки, технологічності та екологічності, що забезпечує затребуваність гіпсових систем у сучасному будівництві, особливо для внутрішніх ремонтних та оздоблювальних робіт.

Найбільш відомим представником швидкотверднучих в'язучих речовин, що використовуються в будівельній промисловості, є будівельний гіпс [4; 5]. Проте основним недоліком гіпсових в'язучих залишається низька водостійкість затверділого каменю, що супроводжується зниженням морозостійкості та підвищеною повзучістю виробів. Сукупність цих чинників унеможлиблює застосування гіпсових в'язучих у вологих умовах і значно обмежує сферу їх використання [4]. Одним із найбільш ефективних шляхів підвищення експлуатаційних властивостей таких матеріалів є розроблення гіпсоцементношлакових в'язучих (ГЦШВ), дослідження яких проводилися під керівництвом О. В. Волженського [4; 5]. Ці в'язучі характеризуються поєднанням швидкотверднучих властивостей гіпсу з підвищеною водо- та морозостійкістю, що досягається завдяки комплексній взаємодії гіпсу, цементу та шлакових компонентів.

Таким чином, в умовах післявоєнного та загального відновлення інфраструктури України особливої актуальності набуває застосування швидкотверднучих ремонтних сумішей, що забезпечують інтенсивне відновлення пошкоджених будівель і споруд. Використання таких матеріалів дозволяє значно скоротити терміни проведення ремонтно-відновлювальних робіт, підвищити ефективність будівельних процесів та зменшити витрати на експлуатацію й реконструкцію об'єктів.

Мета роботи полягала у дослідженні міцнісних характеристик, адгезійної міцності та усадки швидкотверднучих сухих будівельних сумішей, які можна використати для ремонту та відновлення будівель і споруд на основі гіпсоцементношлакових в'язучих.

В якості вихідних матеріалів даного дослідження були використані: портландцемент ПЦ-ІІ/А-Ш-500 Р-Н виробництва ПАТ «Волинь-цемент» згідно ДСТУ Б В.2.7-46, гіпс будівельний Г-5 Н-ІІ, Г-10 Н-ІV, та Г-15 отриманий додатковим пемелом гіпсу Г10. В якості

мінеральної добавки використали мелений доменний гранульований шлак Криворізького металургійного комбінату з питомою поверхнею 300–320 м²/кг. Як заповнювач використовували кварцовий пісок Нетішинського родовища з Мкр=1,95 та вмістом пилуватих та глинистих домішок 1,0%. У якості хімічних добавок було використано суперпластифікатор полікарбоксилатного типу MELFLUX 2651 F та сповільнювач тужавлення – винна кислота.

Методика досліджень та отримані результати

В'язуче виготовляли шляхом змішування будівельного гіпсу – 60%, з міцністю відповідно до матриці планування (табл. 1), портландцементу – 20%, меленого доменного гранульованого шлаку – 20%. Для регулювання термінів тужавлення до складу суміші вводили сповільнювач тужавлення – винну кислоту, у кількості 0,2% від маси гіпсу. У ході досліджень в кожній точці виготовляли розчини на основі ГЦШВ з вмістом компонентів згідно умов планування та визначали границю міцності на згин та стиск стандартних зразків балочок згідно ДСТУ Б В.2.7-126-2011 у віці 2 годин, 1 доби та 28 діб. Для отримання рівнорухомих сумішей та забезпечення потрібного водов'язучого відношення, згідно умов планування, використовували добавку суперпластифікатора підбираючи її необхідну кількість. Для дослідження високоміцних гіпсовмісних ремонтних сумішей було реалізовано серію експериментів, алгоритмізованих відповідно до трьохфакторного плану експерименту другого порядку (типу В₃) [10] за умов планування наведених в табл. 1.

Таблиця 1

Умови планування експериментів

№	Варійовані фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Кодований вид	Натуральний вид	-1	0	+1	
1	X ₁	Міцність гіпсу, (R _r) МПа	5	10	15	5
2	X ₂	Вміст в'язучого в суміші, В'яз %	33	50	67	17
3	X ₃	В/Вяз	0,6	0,5	0,4	0,1

Матриця планування та отримані результати експериментів наведені в табл. 2.



Таблиця 2

Результати експериментів

№	Кодовані значення			Міцність при стиску у віці, МПа			Міцність при згині у віці, МПа		
	X ₁	X ₂	X ₃	2 год	1 доба	28 діб	2 год	1 доба	28 діб
1	1	1	1	12,0	22,3	41,1	5,1	6,4	12,8
2	1	1	-1	9,2	19,8	32,3	4,2	5,5	9,3
3	1	-1	1	3,4	9,7	24,9	1,6	2,5	7,5
4	1	-1	-1	1,9	6,8	23,2	0,6	2,3	7,1
5	-1	1	1	3,6	6,2	16,7	1,6	4,1	6,7
6	-1	1	-1	2,6	5,6	15,8	1,2	3,6	6,4
7	-1	-1	1	1,5	3,2	15,5	0,7	2,7	5,9
8	-1	-1	-1	1,4	3,0	13,7	0,6	2,5	5,4
9	1	0	0	10,6	16,5	30,2	4,	5,1	9,2
10	-1	0	0	2,0	4,8	14,7	0,8	3,2	5,9
11	0	1	0	6,7	17,5	38,6	3,2	5,7	11,0
12	0	-1	0	3,1	6,5	19,8	1,4	4,1	6,8
13	0	0	1	4,7	12,3	28,9	3,0	4,7	8,0
14	0	0	-1	3,5	7,7	23,6	1,4	3,3	6,9
15	0	0	0	4,1	10,0	27,8	1,7	3,8	7,9
16	0	0	0	4,4	12,5	28,2	1,8	4,4	8,2
17	0	0	0	4,3	13,5	26,9	1,6	5,1	8,0

Після проведення обробки і статистичного аналізу експериментальних даних були побудовані рівняння регресії досліджуваних параметрів (міцності на стиск та розтяг при згині у віці 2 годин, 1 та 28 діб). Математичні моделі наведені в табл. 3 та представлені в кодованому вигляді:

Аналіз отриманих моделей показує, що у діапазоні варіювання досліджуваних факторів рання міцність розчинів при стиску у віці 2 годин, коливається в досить широких межах від 1,4 МПа до 12,0 МПа, а у віці 28 діб 13,7–41,4 МПа, що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-126:2011 для ремонтних розчинів. Досліджувані фактори за впливом на величину міцності можна розмістити у наступний спадаючий ряд: $R_r > ВЯЖ > В/Вяж$.

Таблиця 3

Математичні моделі представлені в кодованому вигляді

Рівняння регресії досліджуваних параметрів	
на стиск	$f_{cm}^{2r} = 4,8 + 2,6 \cdot X_1 + 2,3 \cdot X_2 + 0,5 \cdot X_3 + 1,1 \cdot X_1^2 - 0,3 \cdot X_2^2 - 1,1 \cdot X_3^2 + 1,6 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,7 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,01 \cdot X_2 \cdot X_3$
	$f_{cm}^{1d} = 11,9 + 5,3 \cdot X_1 + 4,2 \cdot X_2 + 0,5 \cdot X_3 - 0,1 \cdot X_1^2 + 0,4 \cdot X_2^2 - 1,6 \cdot X_3^2 + 2,5 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,14 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,7 \cdot X_2 \cdot X_3$
	$f_{cm}^{28d} = 27,7 + 7,5 \cdot X_1 + 4,7 \cdot X_2 + 2,8 \cdot X_3 - 5,1 \cdot X_1^2 + 1,6 \cdot X_2^2 - 1,3 \cdot X_3^2 + 2,7 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,9 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,7 \cdot X_2 \cdot X_3$
на розтяг при згині	$f_{c.tf}^{2r} = 2,1 + 1,1 \cdot X_1 + 1,0 \cdot X_2 + 0,3 \cdot X_3 + 0,1 \cdot X_1^2 - 0,06 \cdot X_2^2 - 0,2 \cdot X_3^2 + 0,7 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,3 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,1 \cdot X_2 \cdot X_3$
	$f_{c.tf}^{1d} = 4,6 + 0,6 \cdot X_1 + 1,1 \cdot X_2 + 0,3 \cdot X_3 - 0,5 \cdot X_1^2 + 0,3 \cdot X_2^2 - 0,6 \cdot X_3^2 + 0,6 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,05 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,1 \cdot X_2 \cdot X_3$
	$f_{c.tf}^{28d} = 8,1 + 1,6 \cdot X_1 + 1,3 \cdot X_2 + 0,8 \cdot X_3 - 0,6 \cdot X_1^2 + 0,8 \cdot X_2^2 - 0,6 \cdot X_3^2 + 0,7 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,4 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,3 \cdot X_2 \cdot X_3$

Також слід відмітити суттєвий вплив ефектів взаємодії таких факторів, як міцність гіпсу та відношення в'язучого до заповнювача, міцність гіпсу та водов'язучого відношення. Очевидно, що досягнення високої як ранньої так і марочної міцності розчинів можливе при відповідній оптимізації складів ремонтних розчинів. Графічні залежності міцності ремонтних розчинів з використанням ГЦШВ від факторів складу наведені на рис. 1–рис. 3.

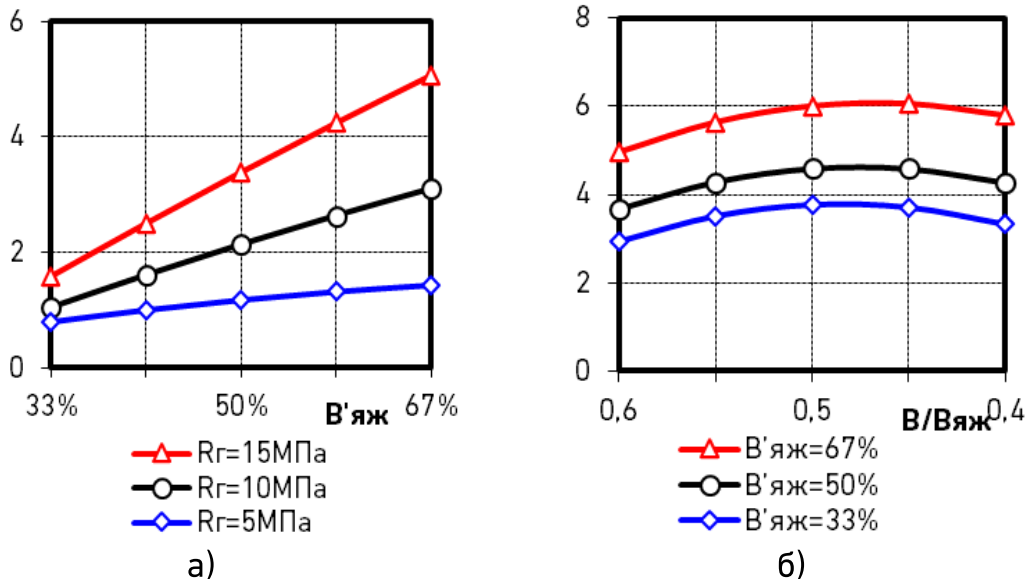


Рис. 1. Графічні залежності міцності розчинів на згин у віці 2 годин (а) та 1 доби (б), від досліджуваних факторів

Згідно рис. 1 маємо, що найбільше зростання міцності на розтяг при згині у віці 2 годин та 1 доби спостерігається при взаємодії всіх факторів на верхньому рівні варіювання, зокрема максимальній міцності гіпсу мінімальному V/Vяж та відношенню в'язучого до



заповнювача 2:1, що є закономірним. Слід відмітити, що ріст міцності є більш вагомим при збільшенні марки гіпсу та кількості в'язучого в суміші.

Проаналізувавши графіки бачимо, що вплив факторів X_1 та X_2 на міцність при стиску та згині у віці двох годин (рис. 2, а) є подібним. Найбільший вагомим фактором є міцність гіпсу. Збільшення якої до максимального значення, в межах варіювання, дозволяє отримати міцність розчину близько 10 МПа за умови максимального значення відношення в'язучого-заповнювач (2:1) і мінімального водов'язучого відношення (0,4). При використанні гіпсу однієї міцності, але при зміні фактору X_2 від нижньої до верхньої межі маємо позитивний, але дещо нижчий вплив на міцність.

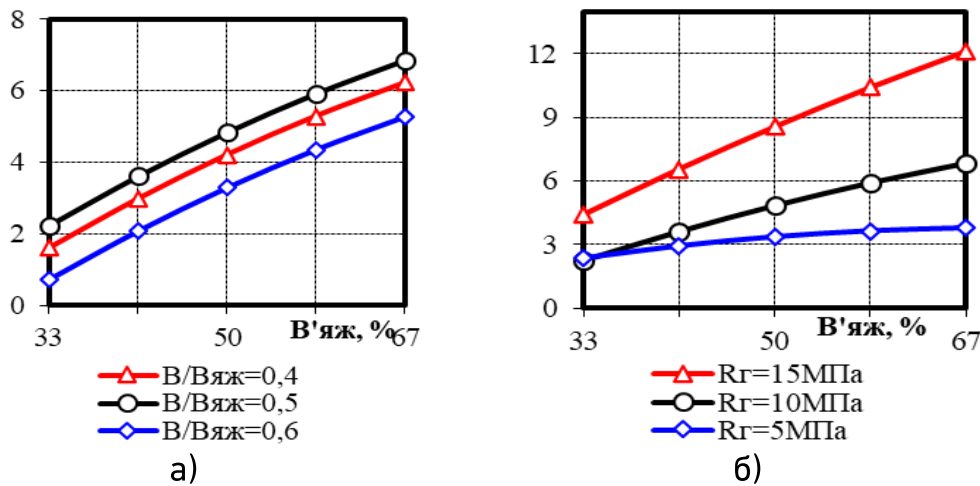


Рис. 2. Графічна залежність міцності розчинів на стиск у віці 2 годин (а) та 1 доби (б), від досліджуваних факторів

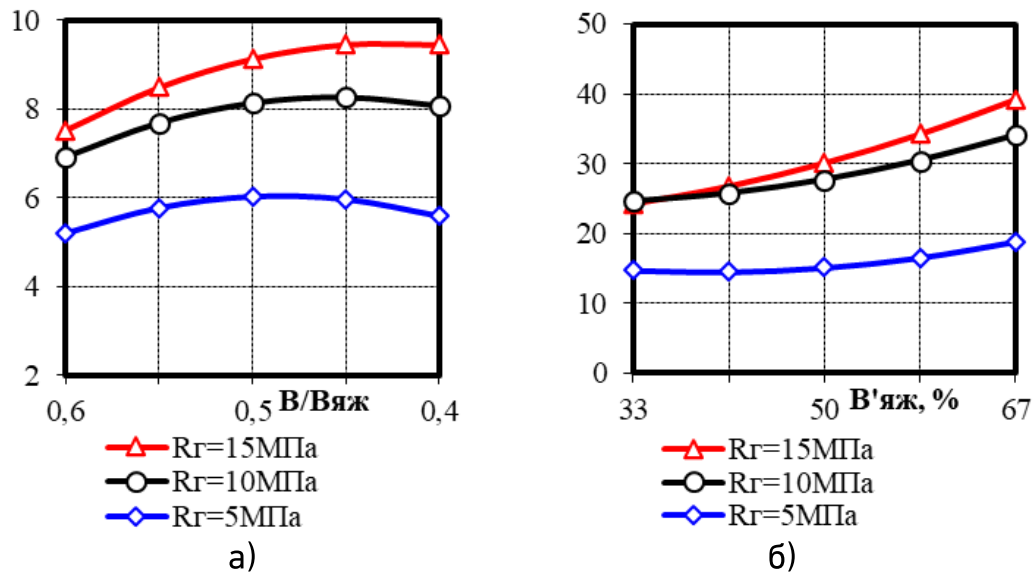


Рис. 3. Графічна залежність міцності розчинів на розтяг при згині (а) та стиск (б) у віці 28 діб, від досліджуваних факторів

Згідно (рис. 2, б) маємо, що найбільший вплив на міцність при стиску у віці 1 доби чинить також міцність гіпсу при цьому міцність розчину практично відповідає міцності гіпсу, що використовувався. Відношення в'язуче-заповнювач при зміні від -1 до +1 також має позитивну тенденцію, однак вона є вищою при більшій міцності гіпсу. Зменшення В/Вяз також зумовлює збільшення міцності, але менш вагоме у порівнянні з іншими факторами. Аналіз (рис. 3, а) дозволяє зробити висновок, що найбільший вплив на міцність на розтяг при згині у віці 28 діб чинить відношення в'язучого до заповнювача збільшуючи міцність на понад 50% при зміні даного фактору від -1 до +1 Суттєве збільшення міцності також спостерігається при використанні гіпсу Г-15 за умови мінімального В/Вяз та максимальній кількості ГЦШВ у розчині.

Висновки

Встановлено можливість отримання, високоміцних швидкотверднучих ремонтних сумішей на основі ГЦШВ.

Основним фактором, що визначає міцність на ранніх етапах тверднення, є міцність гіпсу, тоді як вплив водов'язучого відношення та кількості заповнювача є менш вираженими.

Зі збільшенням частки в'язучого спостерігається істотне підвищення міцності, яке зберігається і на пізніших етапах тверднення.

Використання гіпсу вищої марки (Г-15) у поєднанні з мінімальним водов'язучим відношенням і максимальною кількістю ГЦШВ забезпечує формування розчинів із найвищими показниками міцності.

В/Вяз стає більш вагомим у віці 28 діб, що пов'язано з активізацією процесів структуроутворення при твердінні портландцементу та шлаку

1. Бетони нового покоління / Л. Й. Дворкін, В. В. Житковський, О. М. Бордюженко, В. В. Марчук, Ю. О. Рубцова. Рівне : НУВГП, 2021. 317 с. 2. ДСТУ Б В.2.7.126:2011. Суміші будівельні сухі модифіковані. Загальні технічні умови. 3. Gengying Li, Huicai Xie, Guangjing Xiong. Transition zone studies of new-to-old concrete with different binders. 4. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Мироненко А. В., Поліщук-Герасимчук Т. О., Кундос М. Г. Модифіковані гіпсові і сульфатно-шлакові в'язучі та матеріали на їх основі. Рівне : НУВГП, 2011. 5. Ефективні гіпсові матеріали : монографія / Л. Й. Дворкін, О. М. Гавриш, О. В. Безусьяк та ін. К. : «СПД Павленко», 2013. 240 с. 6. Дворкін Л., Житковський В., Степасюк Ю., Марчук В. Ефективні будівельні розчини для 3d-принтера. *Будівельні матеріали та вироби*. 2020. Вип. 1–2(101). С. 16–21. 7. Huaqiang Sun, Jueshi Qian, Yalun Yang, Chuanhe Fan, Yanfei Yue, Optimization of gypsum and slag contents in blended cement containing slag. *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 112, P. 103674. 8. Caijun Shi, A.



Fernández Jiménez, Angel Palomo. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41, Issue 7. P. 750–763. **9.** Xiaobing Yang, Zepeng Yan, Weiguang Li, Leiming Wang, Shenghua Yin. Effect of Slag Gypsum Binder as a Substitute to Cement on the Stability of Backfill Mining. *Frontiers in Materials*. 2022. Вип. 9. P. 869875. **10.** Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Житковський В. В. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту. Рівне : НУВГП, 2011. 174 с.

REFERENCES:

1. Betony novoho pokolinnia / L. Y. Dvorkin, V. V. Zhytkovskyi, O. M. Bordiuzhenko, V. V. Marchuk, Yu. O. Rubtsova. Rivne : NUVHP, 2021. 317 s. **2.** DSTU B V.2.7.126:2011. Sumishi budivelni sukhi modyfikovani. Zahalni tekhnichni umovy. **3.** Gengying Li, Huicai Xie, Guangjing Xiong. Transition zone studies of new-to-old concrete with different binders. **4.** Dvorkin L. Y., Dvorkin O. L., Myronenko A. V., Polishchuk-Herasymchuk T. O., Kundos M. H. Modyfikovani hipsovi i sulfatno-shlakovi viazhuchi ta materialy na yikh osnovi. Rivne : NUVHP, 2011. **5.** Efektyvni hipsovi materialy : monohrafiia / L. Y. Dvorkin, O. M. Havrysh, O. V. Bezusiak ta in. K. : «SPD Pavlenko», 2013. 240 s. **6.** Dvorkin L., Zhytkovskyi V., Stepasiuk Yu., Marchuk V. Efektyvni budivelni rozchyny dlia 3d-pryntera. *Budivelni materialy ta vyroby*. 2020. Vyp. 1–2(101). S. 16–21. **7.** Huaqiang Sun, Jueshi Qian, Yalun Yang, Chuanhe Fan, Yanfei Yue, Optimization of gypsum and slag contents in blended cement containing slag. *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 112, R. 103674. **8.** Caijun Shi, A. Fernández Jiménez, Angel Palomo. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41, Issue 7. P. 750–763. **9.** Xiaobing Yang, Zepeng Yan, Weiguang Li, Leiming Wang, Shenghua Yin. Effect of Slag Gypsum Binder as a Substitute to Cement on the Stability of Backfill Mining. *Frontiers in Materials*. 2022. Vyp. 9. P. 869875. **10.** Dvorkin L. Y., Dvorkin O. L., Zhytkovskyi V. V. Rozv'язuvannia budivelno-tekhnolohichnykh zadach metodamy matematychnoho planuvannia eksperymentu. Rivne : NUVHP, 2011. 174 s.

Levchyk O. O. [1; ORCID ID: 0009-0003-6260-5750],

Post-graduate Student,

Dvorkin L. Y. [1; ORCID ID: 0000-0001-8759-6318],

Doctor of Engineering, Professor,

Marchuk V. V. [1; ORCID ID: 0000-0003-0999-0402],

Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor

¹National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

HIGH-STRENGTH FAST-HARDENING REPAIR MIXTURES BASED ON GYPSUM-CEMENT-SLAG BINDER

The article investigates the possibility of producing rapid-hardening repair mortars based on gypsum–cement–slag binder (GCSB) using gypsum

of various strength grades. The influence of mixture composition factors on the kinetics of strength development of repair mortars has been determined. Using methods of mathematical experiment design, a system of polynomial models was obtained that describes the relationship between the composition and the physical–mechanical properties of the repair mixtures at different curing ages. These models were applied to analyze the influence of formulation parameters on compressive and flexural strength. During operation, concrete and reinforced concrete structures are exposed to aggressive environments, dynamic loads, and other destructive factors, which lead to deterioration and partial destruction of structural elements. This creates a significant demand for effective materials and technologies for the repair and protection of structures. Under the conditions of post-war reconstruction and general infrastructure recovery in Ukraine, the use of rapid-hardening dry repair mixtures enables faster and more efficient restoration of damaged buildings and structures, contributing to the improvement of living conditions and the economic revival of the country. The development and application of modern rapid-hardening repair mixtures based on gypsum–cement–slag binders represent an important step towards the modernization of Ukraine’s construction industry.

Keywords: gypsum–cement–slag binder; fast-hardening repair mixtures; mathematical modeling; compressive strength; flexural strength; post-war reconstruction.

Отримано: 08 жовтня 2025 року
Прорецензовано: 10 жовтня 2025 року
Прийнято до друку: 18 грудня 2025 року