

УДК 666.97

ДОБАВКА МЕЛЕНОГО ДОМЕННОГО ШЛАКУ ДО ПОРТЛАНДЦЕМЕНТУ І ЇЇ ВПЛИВ НА ТЕРМО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕМЕНТНОВМІЩУЮЧИХ КОМПОЗИЦІЙ**ADDITION OF BLAST-MILL SLAG TO PORTLAND CEMENT AND ITS INFLUENCE ON THERMO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CEMENT-CONTAINING COMPOSITIONS**

Барабаш І.В., д.т. н., професор, ORCID: 0000 - 0003- 0241 - 4728; Волинський Д.О., аспірант, ORCID: 0009-0000-9328-6252 (Одеська державна академія будівництва та архітектури)

Barabasch I.V., DSc, Professor, ORCID: 0000-0003-0241-4728; Volynsky D.A., graduate student, ORCID: 0009-0000-9328-6252 (Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture)

В розглянутій статті приведено експериментальні результати, які відображають вплив вмісту меленого доменного шлаку на фізико-механічні властивості (насіпна та істинна густина, питома поверхня, нормальна густина та терміни тужавлення, міцність при стиску цементного каменю) та екзотермію в'язучого. Такий цемент отримували змішуванням портландцементу ПЦ І ($S = 382 \text{ м}^2/\text{кг}$) з меленим ($S = 350 \text{ м}^2/\text{кг}$) доменним шлаком, кількість якого корегувалася від 0 до 35% маси змішаного в'язучого.

This article presents experimental results reflecting the influence of ground blast furnace slag content on the physicochemical properties (bulk and true density, specific surface area, normal consistency, setting time, and compressive strength of cement paste) and the exothermic properties of the binder. This cement was produced by mixing PC I Portland cement ($S = 382 \text{ м}^2/\text{кг}$) with ground blast furnace slag ($S = 350 \text{ м}^2/\text{кг}$), the amount of which was adjusted from 0 to 35% of the mixed binder mass. The experiments revealed that the addition of blast furnace slag (35%) to Portland cement reduced the binder's bulk density from 982 to 940 kg/m^3 , its true consistency from 3.02 to 2.90 g/cm^3 , and its specific surface area from 382 to 340 $\text{m}^2/\text{кг}$. The addition of a given amount of ground blast-furnace slag to cement reduces the normal density of the cement paste from 29.5 to 28.7%. Increasing the blast-furnace slag content

in the mixed binder (from 0 to 35%) leads to an increase in the setting time of the cement paste: from 3:00 to 4:30 hours, and from 4:50 to 7:10 hours. Increasing the amount of ground blast-furnace slag in the binder leads to a decrease in exothermic heating from 45.6°C (no blast-furnace slag) to 31°C (35% blast-furnace slag in the mixed binder).

These results indicate that the addition of blast-furnace slag to Portland cement reduces the strength of the cement paste for all specified curing periods. It should be noted that with increasing age of the cement stone (from 3 to 28 days), the difference in strength between cement without additives (no blast furnace slag) and cement with blast furnace slag (35%) decreases. This can be explained by the hydration activity of blast furnace slag.

Ключові слова: Доменний шлак, портландцемент, помел, екзотермічний, міцність при стиску.

Blast furnace slag, Portland cement, grinding, exothermic, compressive strength

Вступ. В практиці виробництва бетонних сумішей та бетонів на їх основі широке розповсюдження одержали цементи з використанням активних мінеральних добавок. Технологічно такий цемент отримують як сумісним помелом портландцементного клінкеру, гіпсового каменю та мінеральної добавки, так і ретельним змішуванням портландцементу з меленою добавкою. Підвищення цін на мінеральні в'язучі надає особливу цінність дослідженням, які направлені на вирішення цілого ряду питань пов'язаних із зниженням матеріало- і енергоємності виробництва бетонних сумішей і бетонів на їх основі. Вирішення цих питань забезпечує не тільки зменшення ціни на в'язуче, але і надає в'язучому ряд позитивних властивостей, які відіграють важливу роль при виготовленні залізобетонних виробів і конструкцій.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Зростання цін на мінеральні в'язучі речовини сприяє розширенню досліджень, які забезпечують різке зниження матеріало- і енергоємності виробництва бетонних сумішей та бетонів на їх основі [1-5].

В практиці виробництва мінеральних в'язучих широке запровадження знайшов «портландцемент з шлаком» марок ПЦ І/А-Ш та ПЦ І/Б-Ш з вмістом доменного шлаку від 6 до 20% та від 21 до 35% [6-9]. Для доменних шлаків загальноновизнаним прийнятий гідралічний характер тверднення, який включає в себе поетапний процес гідратації тонкомеленого шлакового скла з утворенням низькоосновного гідросилікату кальцію С-S-N [10-12]. Відносно рихла поверхня зерен шлаку та наявність в цементі С₃S та С₃A забезпечує їх підвищену гідралічну активність в процесі гідратації.

Виняткова роль в активації доменних шлаків відводиться гідрату окислу кальцію Са(ОН)₂, який утворюється в процесі гідратації цементу [13-15]. Саме наявність лужного середовища сприяє участі скловидної фази шлаків в

гідратаційному процесі, який приводе до утворення низькоосновних гідросилікатів [16-18]. Для промислового застосування «портландцементу з шлаком» значний інтерес викликає вплив кількості доменного шлаку в портландцементі (з кроком 5% в діапазоні від 5 до 35%) на фізико-механічні характеристики та екзотермічний розігрів цементного тіста та каменю.

Постановка мети і задач дослідження. Мета і задача запропонованої роботи полягає у визначенні впливу меленого доменного шлаку (5...35%) до портландцементу на фізико-механічні характеристики цементновміщуючої композиції та її екзотермічний розігрів.

Результати досліджень. В статті розглядаються питання, які пов'язані з визначенням впливу меленого доменного шлаку з $M_{осн} = 1,1$ на насипну та істинну густину, нормальну густоту, терміни тужавлення, а також тепловиділення та міцність цементного каменю при стиску у віці 3-х, 7-и, 14-и, 21-ї та 28-и діб твердіння.

Міцність при стиску цементного каменю визначалася шляхом випробування зразків-балочок розміром 4x4x16 см із цементно-шлакових композицій заданої рухомості (розплив конусу суміші 120 мм).

В проведених дослідженнях в якості в'язучого використовувався «портландцемент з шлаком» в кількості від 5 до 35% і який відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-46:2010 "Цементи загальнобудівного призначення. Технічні умови."

Цемент отримували ретельним змішуванням портландцементу ПЦ І з віддозованою кількістю меленого доменного шлаку з питомою поверхнею 250 м²/кг.

В дослідженнях по визначенню впливу добавки меленого доменного шлаку на насипну густину змішаного цементу встановлено, що введення шлаку в склад портландцементу приводе до зниження його насипної густини з 982 кг/м³ (шлак 0%) до 940 кг/м³ (шлак 35%), тобто майже на 6%, табл. 1.

Таблиця 1

Насипна густина портландцементу з добавкою меленого доменного шлаку

Портландцемент, %	100	95	90	85	80	75	70	65	0
Мелений шлак, %	0	5	10	15	20	25	30	35	100
Насипна густина змішаного цементу, кг/м³	982	975	970	965	960	950	945	940	865

Відносно впливу добавки меленого доменного шлаку на істинну густину змішаного цементу слід відзначити, що введення в портландцемент до 35% шлаку викликає зниження $\rho_{іст}$ з 3,02 г/см³(шлак відсутній) до 2,90 г/см³(шлак 35%), тобто майже на 5%, табл. 2.

Таблиця 2

Істинна густина портландцементу з добавкою меленого доменного шлаку

Портландцемент, %	100	95	90	85	80	75	70	65	0
Мелений шлак, %	0	5	10	15	20	25	30	35	100
Істинна густина змішаного цементу, г/см³	3,02	3,00	2,98	2,96	2,95	2,93	2,92	2,90	2,7

Що стосується впливу вмісту меленого шлаку на питому поверхню змішаного цементу то слід відзначити, що зростання кількості шлаку від 0 до 35% викликає зниження його питомої поверхні з 382 до 340 м²/кг, тобто на 11%, табл. 3.

Таблиця 3

Питома поверхня змішаного в'язучого

Портландцемент, %	100	95	90	85	80	75	70	65	0
Мелений шлак, %	0	5	10	15	20	25	30	35	100
Питома поверхня змішаного в'язучого, м²/кг	382	375	371	364	359	353	349	340	290

В експериментальних дослідженнях, які пов'язані з визначенням впливу добавки меленого доменного шлаку до портландцементу на нормальну густоту (НГ) цементно-водних композицій встановлено, що введення шлаку у в'язуче (0...35%) приведе до зниження НГ від 29,5 до 28,7%, табл. 4.

Таблиця 4

Вплив добавки меленого доменного шлаку на нормальну густоту цементного тіста

Портландцемент, %	100	95	90	85	80	75	70	65
Мелений шлак, %	0	5	10	15	20	25	30	35
Нормальна густота, %	29,5	29,4	29,3	29,1	29,0	28,9	28,8	28,7

Стосовно впливу добавки меленого шлаку на терміни тужавлення цементного тіста слід відмітити, що зростання вмісту меленого шлаку у в'язучому приведе до зростання термінів як початку, так і кінця тужавлення, табл. 5.

Таблиця 5

Вплив вмісту меленого доменного шлаку у в'язучому на терміни тужавлення цементного тіста, год-хв

Термін тужавлення	Вміст меленого шлаку у змішаному в'язучому, %				
	0	10	20	30	35
Початок тужавлення, год-хв	3-00	3-10	3-30	3-50	4-30
Кінець тужавлення, год-хв	4-50	5-05	5-35	6-20	7-10

Вміст доменного шлаку у портландцементі позначається також і на тепловідленні в'язучого. Для визначення екзотермії цементу використовували термосний метод. Початкова температура цементно-водної композиції з добавкою доменного шлаку (0...35%) приймалася рівною +20 °С.

Отримані результати свідчать про те, що керуючи вмістом меленого доменного шлаку у в'язучому можливо в широкому діапазоні керувати екзотермічним розігрівом цементно-водної композиції. Підтвердженням цього є наведені в табл. 6 експериментальні результати екзотермічного розігріву цементно-водних композицій з добавкою меленого доменного шлаку у кількості від 0 до 35% за масою (від витрати цементу).

Таблиця 6

Екзотермічний розігрів цементно-водних композицій з добавкою меленого доменного шлаку

Номер складу	Вміст мел. домен.	Початков. т	Екзотермічний розігрів, °С, через год							
			2	4	6	8	10	12	14	16
1	0	20	20,7	21,8	28,0	38,0	45,6	45,0	44,5	-
2	5	20	20,6	21,5	26,5	35,1	42,8	42,5	41,9	-
3	10	20	20,6	21,3	25,1	31,0	38,1	40,4	39,2	-
4	15	20	20,6	21,3	23,5	29,0	35,1	37,8	37,4	-
5	20	20	20,6	21,1	22,0	26,0	32,0	35,9	35,4	-
6	25	20	20,7	21,0	21,8	24,5	30,0	34,1	33,8	-
7	30	20	20,6	20,8	21,4	24,2	28,6	32,0	34,0	33,0
8	35	20	20,6	20,8	20,9	21,0	23,2	27,5	31,0	31,0

На рис. 1 приведено графічне відображення впливу вмісту меленого доменного шлаку у портландцементі на екзотермічний розігрів цементного тіста.

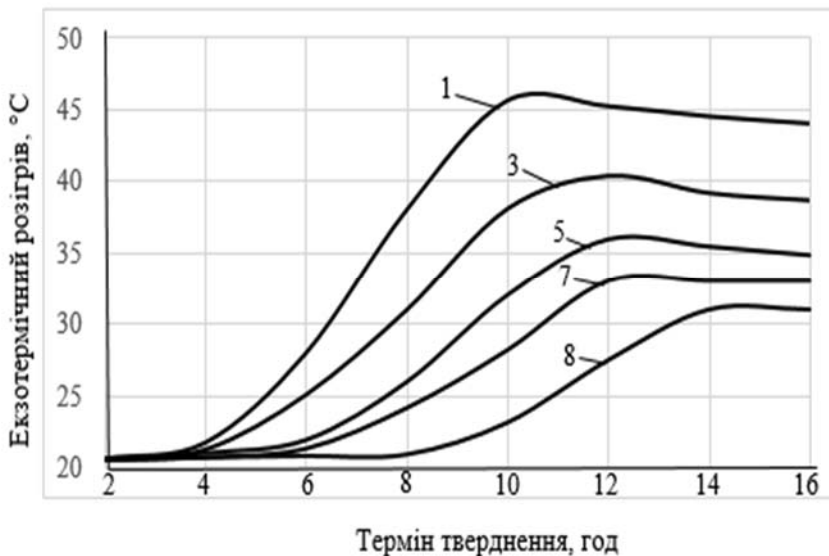


Рис. 1. Вплив кількості меленого доменного шлаку в портландцементі на екзотермічний розігрів композиції:
1, 3, 5, 7, 8 – витрата меленого шлаку в портландцементі (0, 10, 20, 30, 35%) від маси портландцементу

Аналізуючи експериментальні дані по екзотермічному розігріву композицій, які наведені у табл. 6 та на рис. 1, слід відмітити, що зростання за масою вмісту доменного шлаку у портландцементі до 35% приводе до зниження розігріву композиції від 45,6 °C до 31 °C, тобто майже на 15 °C. Окрім зниження максимальної температури розігріву введення до складу чистоклінкерного цементу доменного шлаку відтерміновує досягнення піку розігріву від 10 год (чистоклінкерний портландцемент) до 15 год (35% добавка меленого доменного шлаку до цементу).

На заключному етапі дослідження визначався вплив добавки меленого доменного шлаку (0...35%) до портландцементу на міцність на стиск цементного каменю у віці 3-х, 7-и, 14-и, 21-ї та 28-и діб твердіння в н.у. Склади цементно-шлакових композицій (%) приведені у табл. 7.

Міцність на стиск цементного каменю з добавкою меленого
доменного шлаку, МПа

№ п/п	Цемент, %	Доменний шлак, %	В/Т	Термін твердіння зразків, діб.				
				3	7	14	21	28
1	100	0	0,335	25,3	37,9	47,5	52,5	54,0
2	95	5	0,335	23,1	35,2	44,5	48,5	50,0
3	90	10	0,335	22,4	34,4	41,2	45,0	46,1
4	85	15	0,335	19,0	31,2	37,5	42,3	44,4
5	80	20	0,335	17,5	28,1	35,0	39,5	42,2
6	75	25	0,335	16,4	26,6	32,6	37,4	41,3
7	70	30	0,335	15,4	25,3	31,3	34,5	37,0
8	65	35	0,335	14,3	23,1	27,3	32,2	34,4

Аналіз експериментальних даних, наведених у табл. 7, свідчить про те, що введення меленого доменного шлаку до складу в'язучого приведе до зниження міцності цементного каменю як у ранньому віці (3 доби) так і в більш пізньому, зрілому віці – 28 діб. Слід відмітити, що процент відставання набору міцності цементного каменю від введення шлаку зменшується із зростанням терміну тверднення цементно-шлакових композицій. Так, наприклад, якщо в 3-х добовому віці міцність на стиск цементного каменю з добавкою 35% доменного шлаку складала 56% від міцності каменю на бездобавочному цементі, то в 28-и добовому віці ця різниця зменшувалась і не перевищувала 36%.

Висновки і рекомендації: 1. Добавка меленого доменного шлаку до портландцементу приведе до зниження максимальної величини екзотермічного розігріву цементновміщуючої композиції – з 45,6 °С (добавка доменного шлаку до портландцементу відсутня) до 31 °С (добавка доменного шлаку в кількості 35% від маси цементу).

2. Зростання вмісту меленого доменного шлаку в портландцементі від 0 до 35% викликає відтермінування початку терміну тужавлення з 3 год 00 хв до 4 год 30 хв. Кінець тужавлення аналогічних складів композицій настає через 4 год 50 хв (0% шлаку) та 7 год 10 хв (35% шлаку).

3. Введення до складу портландцементу 20% і 35% доменного шлаку викликає зниження міцності цементного каменю в марочному віці (в порівнянні з контролем) з 54,0 МПа (контроль) до 42,2 МПа (20% доменного шлаку) та 34,4 МПа (35% доменного шлаку).

1. Сторчай Н.С., Савін Ю.Л., Волнянська І.П. Науково-технічне обґрунтування використання мінеральних дисперсних систем техногенного походження. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2020. Вип. 38. С. 277-282.

Storchai N.S., Savin Yu.L., Volnianska I.P. Naukovo-tekhniche obgruntuvannya vykorystannia mineralnykh dyspersnykh system tekhnogennoho pokhodzhennia. Resursoekonomni materialy, konstruktii, budivli ta sporudy. 2020. Vyp. 38. S. 277-282.

2. Саницький М.А., Кропивницька Т.П., Гев'юк У. М. Швидкотверднучі клінкер-ефективні цементи та бетони. Монографія. Львів: ТОВ Простір-М, 2021, 206с.

Sanytskyi M.A., Kropyvnytska T.P., Hev' yuk U. M. Shvydkotverdnuchi klinker-efektyvni tsementy ta betony. Monohrafiia. Lviv: TOV Prostir-M, 2021, 206s.

3. Дворкін Л.Й. та інші Ефективні технології бетонів та розчинів із застосуванням техногенної сировини/ Л.Й. Дворкін, В.В. Житковський, В.В. Марчук, Ю. Стасюк, М.М. Скрипник. Монографія. Рівне: НУВГП, 2017, 424с.

Dvorkin L.Y. ta inshi Efektyvni tekhnolohii betoniv ta rozchyniv iz zastusuvanniam tekhnogennoi syrovyny/ L.Y. Dvorkin, V.V. Zhytkovskyi, V.V. Marchuk, Yu. Stasiuk, M.M. Skrypnyk. Monohrafiia. Rivne: NUVHP, 2017, 424s

4. Kožul N. et al. Influence of ultrafine mineral additives on the durability of concrete. Materials. 2019. Vol. 12(8). P. 1313.

5. Barabasch I.V., Babiy I.M., Streltsov K.O. Intensive separate technology and its influence on the properties of cement -Water compositions, solutions and concretes on their basis // Modern construction and architecture, Issue N2. Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2022. P. 44-51.

6. Русин Б.Г. Високофункціональні бетони на основі портландцементів, модифікованих ультрадисперсними мінеральними добавками: авторец. дис. на здобуття наук. ст. к.т.н. за спец. 05.23.05/ НУ «Львівська політехніка». Львів. 2014. 21с.

Rusyn B.H. Vysokofunktsionalni betony na osnovi portlandtsementiv, modyfikovanykh ultradispersnymy mineralnymy dobavkamy: avtorets. dys. na zdobuttia nauk. st. k.t.n. za spets. 05.23.05/ NU «Lvivska politekhnikha». Lviv. 2014. 21s.

7. Gots, Volodimir & Rudenko, Igor & Lastivka, Oles & Volinska, E.V. Роль хімічних добавок у формуванні властивостей лужних цементів. Кераміка: наука і життя. 2017. Вип. 3(36). С. 5-14.

8. Gots, Volodimir & Rudenko, Igor & Lastivka, Oles & Lakusta, Sergei & Volinska, E.V. Особливості формування порової структури бетону на основі лужного цементу. Будівельне виробництво. 2017. Вип. 63(1). С. 20-27.

9. Rudenko, Igor & Kryvenko, Pavlo & Gots, Volodimir & Runova, Rayisa & Lastivka, Oles. Features of Alkali-Activated Slag Portland Cement. Conference: 1-st Intern. Conf. On the Chemistry of Construction Materials At: Berlin, Germany. 2013. P. 453-456.

10. Fang, Yonghao & Lu, Zheng & Wang, Zhong. FT-IR Study on Early-Age Hydration of Alkali-Activated Slag Cement. Key Engineering Materials. 2011. Vol. 492. P. 429-432.

11. Newlands, Katrina & Macphee, Donald. The reactivity of aluminosilicate glasses in cements – effects of Ca content on dissolution characteristics and surface precipitation. Advances in Applied Ceramics. 2017. Vol. 116. P. 1-9.

Відомості про статтю:		Article information	
Отримано	31.03.2026	Received	31.03.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді	08.04.2026	Received in revised form	08.04.2026
Прийнято	15.04.2026	Accepted	15.04.2026
Опубліковано	31.05.2026	Published	31.05.2026

Політика відкритого доступу

Політика відкритого доступу збірника передбачає безкоштовний та безперешкодний доступ до наукових матеріалів. Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Open access policy

The open access policy of the collection provides free and unhindered access to scientific materials. All data is available in digital or graphical form in the main text of the article.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest regarding the current study, including financial, personal, authorial or any other that could be included in the study, as well as the results presented in this document.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

Use of Artificial Intelligence

The authors confirm that they did not use artificial intelligence technologies in the creation of the current work.