

АНОТАЦІЯ

Івацшин Г. С. Низькоемісійні змішані цементи та модифіковані бетони і будівельні розчини на їх основі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192. Будівництво та цивільна інженерія (19 – Архітектура та будівництво). – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню завдання одержання екоефективних бетонів і будівельних розчинів за рахунок розроблення низькоемісійних цементів, які отримуються шляхом змішування звичайного портландцементу (СЕМ І 42,5R) з активними мінеральними добавками різних типів, що відносяться до цементозаміщуючих матеріалів (ЦЗМ). Перевагами таких цементних систем є високий рівень енергозбереження та низькі викиди CO₂ при виробництві цементів у поєднанні з високою довговічністю бетонів на їх основі. Показано, що комбіновані пуцоланові добавки (КПД) завдяки оптимізації речовинного і гранулометричного складів можуть бути окремим складником при виробництві ефективних бетонів та будівельних розчинів. Їх можна безпосередньо змішувати з СЕМ І в бетоно-розчинозмішувачі або вони можуть бути частиною змішаного цементу заводського виготовлення. Відзначено, що під час пуцоланової реакції між високоактивними суперцеолітом і мікрокремнеземом, а також низькокальцієвою золою-винесення з гідроксидом кальцію стимулюються процеси утворення гідратних фаз у міжзерновому просторі та ущільнення мікроструктури цементуючої матриці, що в поєднанні з добавками пластифікуюче-повітровтягувальної дії забезпечує техніко-технологічний ефект і еколого-економічну ефективність.

Актуальність розроблення низькоемісійних змішаних цементів та модифікованих бетонів і будівельних розчинів на їх основі відповідає світовій концепції сталого розвитку (Sustainable Development), вектором руху якої є раціональне використання та економія матеріальних і енергетичних ресурсів.

Розроблення таких в'язучих дає змогу створити прогресивні моделі раціонального використання природної сировини, палива, електричної енергії, утилізувати відходи виробництва, зменшити викиди парникових газів. Такий підхід дозволяє вирішити низку важливих екологічних, економічних і соціальних проблем.

Зроблено аналітичний огляд літературних джерел і показано, що реалізація концепції низьковуглецевого розвитку в секторі цементу та бетону, загалом, досягається завдяки удосконаленню виробничого процесу і зниженню клінкер-фактору цементу. Зі сторони технології виробництва портландцементного клінкеру економія енергоресурсів досягається за рахунок переходу з мокрого способу виробництва на сухий, який уже реалізовано на 90 %. Тому наступним кроком у цьому напрямку є розроблення низькоемісійних цементів за рахунок більш широкого використання цементозаміщуючих матеріалів і застосування сучасного обладнання. Відзначено, що основні складники цементу характеризуються різними коефіцієнтами розмелоздатності, тому при виробництві багатокomпонентних цементів рекомендується здійснювати роздільний помел, оскільки так досягається ефективний розподіл частинок за розміром для кожного компоненту.

Проаналізовано напрямки використання цементозаміщуючих матеріалів для зниження клінкер-інтенсивності бетонів. В країнах Європейського союзу найчастіше додають ЦЗМ під час виробництва цементу при сумісному чи роздільному помелі. Таким чином регламентується рівень заміщення портландцементного клінкеру і компонентний склад нормативними документами (EN 197-1, EN 413). В той же час, все більше набуває популярності досвід США, де виготовляють лише 5 типів цементів з нормованим співвідношенням складників (ASTM C150, ASTM C595), а ЦЗМ додають безпосередньо під час виготовлення бетонної чи розчинової суміші. При цьому розвивається виробництво органо-мінеральних добавок (ОМД) на основі місцевих цементозаміщуючих матеріалів, які дозволяють знизити витрати СЕМ I і забезпечити проектні властивості готових композитів. Зокрема, до таких ОМД належить PozzoSlag (США), який одержують на основі золи-винесення і ГДШ, а також «ZeoSlag» (Словаччина) – на основі

природнього цеоліту і ГДШ. Разом з тим, в цементній промисловості уже відчувається дефіцит гранульованих доменних шлаків, тому актуальним є пошук нових комбінацій цементозаміщуючих матеріалів для зниження питомої витрати портландцементного клінкеру в бетонах і будівельних розчинах.

Аналіз даних у області хімії та технології цементів та бетонів, а також відомих закономірностей формування структури штучного каменю із заданими властивостями дозволяє висунути робочу гіпотезу про доцільність розроблення низькоемісійних змішаних цементів, що отримуються шляхом роздільного помелу та раціонального проектування гранулометричного і речовинного складів комбінованих добавок пуцоланічної дії, які при їх поєднанні з добавками пластифікуюче-повітровтягувальної дії створюють можливість одержання клінкер-ефективних модифікованих бетонів і будівельних розчинів з заданою проектною маркою за міцністю при стиску, проектними показниками якості, покращеними експлуатаційними властивостями, зокрема корозійною стійкістю, а також зниженням показника CO₂-інтенсивності на одиницю продукту.

Наведено результати дослідження впливу цементозаміщуючих матеріалів на структуроутворення та фізико-механічні властивості низькоемісійних змішаних цементів. Аналіз гранулометричного складу вихідних матеріалів дозволяє встановити, що вміст реакційноздатних частинок розміром менше 10 мкм для ГДШ і золи-винесення (36,19 і 22,13 %) значно менший порівняно з СЕМ І 42,5 R (43,41 %), суперцеолітом (48,86 %) і мікрокремнеземом (100,00 %). Це обумовлює недостатньо високі коефіцієнти поверхневої активності ГДШ і золи-винесення, що визначає сповільнення кінетики наростання міцності цементів з вмістом таких ЦЗМ.

Експериментальними дослідженнями показано, що підвищення дисперсності гранульованого доменного шлаку дозволяє збільшити вміст реакційноздатних частинок, що підтверджується зростанням його індексу активності через 28 діб тверднення на 35 %. Проте відзначено, що підвищення дисперсності ЦЗМ суттєво впливає на їх фізичні властивості, а саме призводить до зниження водовідділення і підвищення водопотреби.

Проведеними дослідженнями згідно EN 450-1:2009 встановлено, що показники пуцоланової активності (PSAI) для високодисперсних добавок мікрокремнезему і суперцеоліту через 90 діб тверднення дорівнюють 1,28 і 1,09. За показниками міцності при згині ($R_{зг} \geq 0,5$ МПа) і стиску ($R_{ст} \geq 2,5$ МПа) вапняно-пуцоланового тіста (В:П=1:3) через 28 діб тверднення згідно методики «norma włoska» мікрокремнезем ($R_{зг} = 4,6$ МПа, $R_{ст}=9,5$ МПа) та суперцеоліт ($R_{зг} = 3,2$ МПа, $R_{ст}=7,9$ МПа) відносяться до високоактивних пуцолан. В той же час, через низьку кількість реакційноздатної фракції 0-10 мкм золи-винесення (PSAI=0,80) згідно «norma włoska» вона не належить до високоактивних пуцолан ($R_{зг} = 0,6$ МПа, $R_{ст}=1,8$ МПа). Зроблено висновок, що присутність в складі золи-винесення значної кількості крупних, сферичної форми частинок дозволяє їй виконувати роль мікронаповнювача пластифікуючої дії («ефект ролико-підшипника»).

Аналіз поверхонь функції відгуку водопотреби, водовідділення і пуцоланової активності дозволяє визначити оптимальні склади комбінованих пуцоланових добавок КПД-02 (ЗВ – СЦ) і КПД-03 (ЗВ – СЦ – МК) з НГТ= 31,5 і НГТ=33,0 та $K_{06}=13,5$ % і $K_{06}=6,4$ %, при цьому показники пуцоланової активності становлять $PSAI_{28}=94$ %, $PSAI_{90}=126$ % і $PSAI_{28}=99$ %, $PSAI_{90}=134$ % відповідно.

Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість одержання низькоемісійних змішаних цементів типу СЕМ IV/В за рахунок оптимізації речовинного та гранулометричного складів неклінкерних складників різної дисперсності комбінованої пуцоланової добавки з урахуванням особливостей розподілу розмірів частинок та їх поверхневої енергії. Результати ДТА і РФА підтверджують, що активний SiO_2 суперцеоліту більш реакційноздатний порівняно з SiO_2 інших пуцоланових добавок, тому реакція з $Ca(OH)_2$ активно протікає у ранній і пізній періоди тверднення. Це призводить до утворення додаткової кількості С-S-H-гелю і сприяє збільшенню відносного обсягу гідратних новоутворень в міжзерновому просторі.

Таким чином, оптимізовані склади комбінованих пуцоланових добавок і змішаних цементів типу СЕМ IV/В на їх основі стають раціональним вирішенням проблеми покращення енергоефективності цементного виробництва. Стратегія

такого розвитку передбачає, що комбінування ЦЗМ пуцоланічної дії різної дисперсності на основі суперцеоліту, мікрокремнезему та золи-винесення сприяє зниженню емісії CO₂ та збереженню матеріальних ресурсів. Такий підхід також передбачає оптимізацію фізико-механічних властивостей. При виробництві низькоемісійних змішаних цементів забезпечується суттєва економія паливно-енергетичних ресурсів із зниженням викидів CO₂. В той же час, їх рання міцність є нижчою порівняно з портландцементом типу СЕМ І, тому для повної оцінки ефективності розроблених цементів проведено дослідження впливу модифікаторів на кінетику наростання міцності бетонів на їх основі.

Розроблено склади модифікованих бетонів і будівельних розчинів на основі низькоемісійних змішаних цементів та досліджено їх будівельно-технічні властивості. Встановлено, що технологічний ефект, отриманий від додавання суперпластифікатора до складу дрібнозернистого бетону на основі низькоемісійного змішаного цементу, становить $\Delta R_K=94\%$ без зниження міцності при стиску. За рахунок водоредукуючого ефекту ($\Delta B/C=20\%$) технічний ефект (ΔR_{ct}) через 2; 7 і 28 діб відповідно становить 31; 19 і 24 %. Екологічний ефект змішаного цементу СЕМ IV/B складає 47 % за рахунок зниження емісії CO₂, оскільки викиди вуглекислого газу скорочуються з 865 кг/т цементу (СЕМ І, клінкер-фактор 0,95) до 456 кг/т цементу (клінкер-фактор 0,50).

Встановлено, що застосування комбінованої пуцоланової добавки КПД-03 в складі дрібнозернистого бетону замість 50 % портландцементу СЕМ І в комплексі з 1,50 мас.% РСЕ дозволяє одержати вищі показники міцності на 16,5 % через 28 діб тверднення порівняно з бетонами на основі СЕМ І 42,5 R, що не містять цементозаміщуючих матеріалів.

Реалізація принципів створення модифікованих бетонів на основі низькоемісійних змішаних цементів дозволяє отримати комплекс якісно нових показників (легкоукладальність, понижене тепловиділення, підвищена корозійна стійкість, атмосферостійкість та ін.), що забезпечують технологічний, технічний, економічний та екологічний ефекти. Модифіковані клінкер-ефективні бетони на основі СЕМ IV/B 32,5 R характеризуються підвищеною водонепроникністю (W10)

та морозостійкістю (F150), що визначає збільшення довговічності конструкцій, зниження їх вартості на всіх етапах життєвого циклу. При цьому питома витрата клінкеру на одиницю міцності та CO₂-інтенсивність клінкер-ефективних бетонів складає 2,9 кг/(м³·МПа) та 2,5 кг CO₂/(м³·МПа) відповідно.

Підтверджено ефективність одержання самоущільнювальних бетонів (Ц:П:Щ=1:1,27:1,69, В/Ц=0,30) на основі низькоемісійного цементу СЕМ IV/В 32,5 R з витратою 525 кг/м³ бетону (клінкер-інтенсивність 262,5 кг/м³ бетону). За рахунок оптимізованого гранулометричного складу низькоемісійного змішаного цементу і раціонально підібраних модифікаторів, забезпечується стабільність показників технологічності і відсутність явища сегрегації. Відзначено високі показники міцності самоущільнювальних бетонів через 2; 7 і 28 діб тверднення – міцність при стиску становила 19,5; 44,6 і 76,4 МПа відповідно, що відповідає класу міцності С45/55. При цьому питома витрата клінкеру на одиницю міцності – 3,4 кг/(м³·МПа); відповідно CO₂-інтенсивність самоущільнювального бетону складає 2,9 кг CO₂/(м³·МПа).

Методом математичного планування експерименту проведено проектування складів будівельних розчинів на основі низькоемісійного змішаного цементу для мурування МС 22,5Х. Встановлено, що при оптимальному вмісті цементу (390 кг на 1 м³ піску) та комплексної хімічної добавки пластифікуюче-повітровтягувальної дії Master Air 81 (0,11 мас. %) забезпечується висока рухомість розчину та одержується необхідна марка за міцністю М100. Висока функціональність будівельних розчинів на основі низькоемісійного змішаного цементу визначається також терміном придатності розчинової суміші в необхідних межах при забезпеченні повної відповідності експлуатаційних показників нормативним вимогам для будівельних мурувальних розчинів. Крім цього, такі будівельні розчини характеризуються пониженим висолоутворенням.

Представлено промисловий випуск комбінованої пуцоланової добавки КПД-03 на ТЗОВ «Ферозіт» і низькоемісійного змішаного цементу для будівельних розчинів ЦБР 300 ДСТУ Б В.2.7-124-2004 на ПрАТ «Івано-Франківськцемент», а також впровадження модифікованих бетонів підприємством

ТЗОВ «ТПК»БУДСПОРТ» і будівельних розчинів підприємством ТЗОВ «ВЕСТБЕТОНБУД» на основі розроблених в'язучих.

Ключові слова: низькоемісійний змішаний цемент, цементозаміщуючі матеріали, суперцеоліт, комбінована пуцоланова добавка, пуцоланова активність, індекс активності за міцністю, клінкер-ефективний бетон, питома витрата цементу на одиницю міцності, CO₂-інтенсивність.

Список публікацій здобувача:

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Кропивницька Т. П., Іващишин Г. С., Котів М. В., Чекайло М. В. Ефективність використання низькоенергоємних цементів для будівельних розчинів // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва.* 2017. № 877. С. 121–125. ISSN 2520-2332.

2. Саницький М. А., Кропивницька Т. П., Іващишин Г. С., Русин Б. Г. Концепція низьковуглецевого розвитку в цементній промисловості // *Будівельні матеріали та виробу.* 2017. № 5-6 (96). С. 18–21. ISSN 2413-9890.

3. Кропивницька Т. П., Іващишин Г. С., Семенів Р. М. Низькоемісійні багатокомпонентні цементу в технології будівельних розчинів // *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури.* 2017. Вип. 68. – С. 70–75. ISSN 2415-377X.

4. Іващишин Г. С. Фізико-механічні властивості низькоемісійних багатокомпонентних цементів // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва.* 2018. № 888. С. 59–64. ISSN 2520-2332.

Стаття у науковому періодичному виданні, що включене до міжнародних наукометричних баз:

5. Ivashchyshyn H., Sanytsky M., Kropyvnytska T., Rusyn B. Study of low-emission multi-component cements with a high content of supplementary cementitious

materials // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4, № 6 (100). P. 39–47. ISSN 1729-3774 (DOI:10.15587/1729-4061.2019.175472). Scopus.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Ivashchyshyn H., Kropyvnytska T., Kotiv R. Production engineering and properties of low-energy masonry cement // *7th International academic conference «GAC-2016»*. 24-26 November 2016. Lviv, 2016. P.141–142.

7. Кропивницька Т. П., Котів Р. М., Іващишин Г. С. Малоенерговмісні багатокomпонентні цементи для будівельних розчинів // *Енергоефективні технології в міському будівництві та господарстві* : матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф. 17-18 листопада 2016 р. Одеса, 2016. С. 87–88.

8. Kropyvnytska T., Semeniv R., Ivashchyshyn H. Increase of brick masonry durability for external walls of buildings and structures // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 116 : 6th International scientific conference "*Reliability and durability of railway transport engineering structures and buildings*" (Transbud-2017), Kharkiv, Ukraine, April 19–21, 2017. ISSN 2261-236X (DOI: 10.1051/matecconf/201711601007). Scopus.

9. Кропивницька Т. П., Іващишин Г. С., Русин Б. Г., Котів Р. М. Сучасні низькоемісійні композиційні цементи // *Енергоефективні технології в міському будівництві та господарстві* : матеріали VII Міжнар. наук.-практ. конф. 17-18 травня 2018 р. Одеса, 2018. С. 172–174.

10. Ivashchyshyn H., Semeniv R. Multicomponent cements for masonry mortars in the low carbon economy // *World sustainable energy days* : international conference, 28 February – 2 March 2018. Wels, Austria, 2018. P. 1–7.

11. Kropyvnytska T., Sanytsky M., Kotiv R., Ivashchyshyn H. Performance of low-carbon composite cements containing granulated blast furnace slag, zeolite and limestone // *20th Internationale Baustofftagung. Bundesrepublik Deutschland*. 12-14 September 2018. Weimar, German, 2018. Band 2. P. 451–459.

12. Kropyvnytska T., Kotiv R., Ivashchyshyn H. Nano-modified composite cements for mortars // *Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues*. 30 October – 2 November 2018. Beijing, China, 2018. P. 403–416.

13. Ivashchyshyn H., Kropyvnytska T., Kirakevych I. Low-carbon blended cement with high content of supplementary cementitious materials // VIII Міжнародний молодіжний науковий форум "*Litteris et Artibus*" & 13-та Міжнародна конференція "*Молоді вчені до викликів сучасної технології*" : матеріали. 22-24 листопада 2018. Львів, 2018. С. 105–106.
14. Ivashchyshyn H., Horpynchenko O. Economic and environmental benefits of low-energy blended cements // *World sustainable energy days* : international conference, 27 February – 1 March 2019. Wels, Austria, 2019. P. 1–6.
15. Ivashchyshyn H., Rusyn B. Economic and environmental aspects of using low-carbon multicomponent cements // *Sustainability, economics and safety* : proceedings of the international seminar. 11-12 April 2019. Szczecin, Poland, 2019. P. 45.
16. Шістка М., Іващишин Г., Кропивницька Т. П. Вплив цементозаміщуючих матеріалів на міцнісні властивості низькоемісійних цементів // *Фізичні процеси в енергетиці, екології та будівництві* : тези II Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих вчених. 11-12 квітня 2019 р. Одеса, 2017. С. 37–38.
17. Kropyvnytska T., Rucinska T., Ivashchyshyn H., Kotiv R. Development of eco-efficient composite cements with high early strength // *Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol. 47* : Proceedings of CEE 2019. Advances in resource-saving technologies and materials in civil and environmental engineering. P. 211–218. ISSN 2366-2557 (DOI: 10.1007/978-3-030-27011-7_27). Scopus.
18. Іващишин Г. С., Русин Б. Г., Кіракевич І. І., Кілочко Н. Я. Вплив цементозаміщуючих матеріалів на міцність низькоемісійних цементів // *Теорія і методи будівельного матеріалознавства*: матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. 4-5 жовтня 2019 р. Харків, 2019. С. 4–6.
19. Саницький М. А., Іващишин Г. С., Русин Б. Г. Оптимізація складу багатокомпонентних цементів з високим вмістом цементозаміщуючих мінеральних добавок // *Моделювання та оптимізація будівельних композитів* : матеріали міжнародного семінару. 21-22 листопада 2019 р. Одеса 2019. С. 159–161.

Патент:

20. Зв'язуюче: пат. 116303 Україна. № а201610807; заявл. 27.10.2016; опубл. 26.02.2018, Бюл. №4. 3 с. (Патент на винахід).

ABSTRACT

Ivashchyshyn H. S. Low-carbon blended cements and modified concrete and building mortars on their basis. On rights of the manuscript.

PhD thesis (Doctor of Philosophy) in Engineering sciences by specialty 192. “Construction and civil engineering ” (19 – Architecture and Construction). – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine. – Lviv, 2019.

The dissertation is devoted to solving the problem of obtaining eco-efficient concretes and mortars due to the development of low-carbon cements, which are obtained by blending Ordinary Portland cement (CEM I) with active mineral additives of various types related to supplementary cementitious materials (SCMs). The advantages of such cement systems are the high level of energy saving and the low CO₂ emissions of cement production combined with the high durability of concrete on their basic. It has been shown that the combined pozzolanic additives thanks to optimizing the material and particle size distribution can be a dedicated component in the production of efficient concretes or mortars. They can be directly blended with CEM I in the concrete mixer or be part of factory blended cement. It is noted that during the pozzolanic reaction between high-activity superzeolite and micro silica, low-calcium fly ash with calcium hydroxide stimulate the processes of formation the hydration phases in the intergranular space and the compaction of the microstructure of the cement matrix. It and combination with additives of plasticizing and air-entering action provides the technical&technological effect and eco-economic efficiency.

The topicality of developing low-carbon blended cements and modified concretes and mortars based on them is consistent with the worldwide concept of Sustainable

Development, the vector of movement of which is the rational use and economy of material and energy resources. The development of such binders allows to create progressive models of rational use of natural raw materials, fuel, electricity, utilize production wastes and reduce greenhouse gas emissions. This approach addresses a number of important environmental, economic and social issues.

An analytical review of the literature is made, and it is shown that the realization of the concept of low carbon development in the cement and concrete sector is mainly achieved by improving the production process and reducing the clinker factor of cement. Energy savings in Portland cement clinker production technology are realized by 90 % through the transition from wet to dry production. So, the next step is to develop low-carbon cements through increased use of supplementary cementitious materials and application of modern equipment. It is noted that the main components of cement are characterized by different coefficients of grindability, so it is recommended to carry out separate grinding in the production of multicomponent cements. This achieves an effective particle distribution for each component of multicomponent cements.

The directions of supplementary cementitious materials using for reducing clinker intensity are analyzed. In the countries of the European Union, SCMs is most often added during cement production with compatible or separate grinding. In this way is control the level of substitution of the Portland cement clinker and the component composition of cement by regulatory documents (EN 197-1, EN 413). However, the experience of the USA, where only 5 types of cement with a regulatory ratio of components (ASTM C150, ASTM C595) are made, and SCMs are added directly during the manufacture of concrete or mortar is gaining popularity. At the same time, the production of organo-mineral additives (OMA) on the basis of local supplementary cementitious materials is being developed, which allows to reduce the costs of CEM I and to ensure the design properties of finished composites. In particular, these OMAs include PozzoSlag (USA), which is obtained on the basis of fly ash and ground granulated blast furnace slag (GGBFS), as well as «ZeoSlag» (Slovakia) – based on natural zeolite and GGBFS. However, the cement industry is already experiencing a shortage of slag, so it is important to look for

new combinations of supplementary cementitious materials to reduce the specific consumption of Portland cement clinker in concrete and mortar.

Analysis of data in the field of chemistry and technology of cements and concretes, as well as the known patterns of formation of artificial stone structure with the given properties allows to hypothesize the feasibility of developing low-carbon blended cements, obtained by separate grinding and rational design of granulometric and substance compositions of combined pozzolanic additives (CPA). The combination CPA with additives of plasticizing and air-entering action provides create the possibility of obtaining clinker-efficient modified concretes and mortars with the a given design class of compressive strength, design quality properties, improved performance properties.

Results of research of supplementary cementitious materials' influence on structure formation and physical and mechanical properties of low-carbon blended cements are presented. The particle size distributions analysis of the output materials revealed that the content of reactive particles smaller than 10 μm for the GGBFS and fly ash (36.19 and 22.13 %) were significantly lower compared to CEM I 42,5 R (43.41 %), superzeolite (48.86 %) and micro silica (100.00 %). This causes insufficiently high coefficients of surface activity, which determines the deceleration of the kinetics of the increase in the strength of the cement with the content of low active SCMs.

Experimental studies have shown that increasing the dispersion of ground granulated blast furnace slag allows to increase the content of reactive particles, which is confirmed by an increase the strength activity index (SAI) of GGBFS by 35 % after 28 days of curing. However, it is note that increasing the dispersion of SCMs significantly affects their physical properties, namely, leads to a decrease bleeding and increase water demand.

Studies according to EN 450: 2009 shows that the pozzolanic activity (PSAI) for highly dispersed micro silica and superzeolite additives is equal to 1.28 and 1.09 after 90 days of curing. According to the «norma wloska» method the flexural and compressive strength ($R_{fs} \geq 0.5 \text{ MPa}$, $R_{cs} \geq 2.5 \text{ MPa}$) of lime-pozzolanic paste (L: P = 1: 3) were determined for micro silica ($R_{fs} = 4.6 \text{ MPa}$, $R_{cs} = 9.5 \text{ MPa}$) and superzeolite ($R_{fs} = 3.2 \text{ MPa}$, $R_{cs} = 7.9 \text{ MPa}$) after 28 days of curing. It allows them to be attributed to highly active pozzolans. At the same time, for fly ash PSAI is 0.80 due to the low amount

of reactive fraction of 0-10 μm , and according to «norma wloska» the FA does not belong to highly active pozzolan ($R_{fs} = 0.6 \text{ MPa}$, $R_{cs} = 1.8 \text{ MPa}$). It is concluded that the presence of a large number of coarse, spherical particles in the composition of fly ash allows it to perform the role of microfiller with plasticizing action («ball bearing effect»).

The analysis of the functions surfaces of water demand, bleeding and pozzolanic activity allows to determine the optimal compositions of the combined pozzolanic additives CPA-02 (FA – SZ) and CPA-03 (FA – SZ – MS) with $WD=31,5 \%$ and $WD=33,0 \%$; $K_{Vol}=13,5 \%$ and $K_{Vol}=6,4 \%$. At the same time indicators of pozzolanic activity are $PSAI_{28} = 94 \%$, $PSAI_{90} = 126 \%$ and $PSAI_{28} = 99 \%$, $PSAI_{90} = 134 \%$ respectively.

It is theoretically substantiated and experimentally confirmed the possibility of obtaining low-carbon blended cements type CEM IV / B by optimizing the material and particle size distribution of non-clinker components with different dispersion of the combined pozzolanic additive, taking into account the peculiarities of the particle size distribution and their surface energies. The results of DTA and RFA confirm that the active SiO_2 of superzeolite is more reactive than SiO_2 of other pozzolanic additives, so the reaction with Ca(OH)_2 is active in the early and late time of hardening. This leads to the formation of an additional amount of C-S-H-gel and contributes to the increase of relative volume of hydrated products in the intergranular space.

Thus, optimized formulations of combined pozzolanic additives and blended cements CEM IV/B on their basis become a rational solution to the problem of improving the energy efficiency of cement production. The strategy of such development implies that the combination of SCMs pozzolanic action of different dispersion based on superzeolite, micro silica and fly ash, reduces CO_2 emissions and conserves material resources. This approach also involves optimization of physical and mechanical properties. In the production of low-carbon blended cements significant savings of fuel and energy resources while reducing CO_2 emissions are ensured. At the same time, their early strength is lower than CEM I, therefore, to fully evaluate the effectiveness of the developed cements, the study of the effect of modifiers on the kinetics of the strength increasing of concrete based on them.

The compositions of modified concretes and mortars have been developed on the basis of low-carbon blended cements and their construction and technical properties have been investigated. It was found that the addition of superplasticizer to the composition of fine-grained concrete based on low-carbon blended cement provides the technological effect $\Delta W = 94 \%$ without reducing the compressive strength. The technical effect (ΔR_{cs}) after 2, 7 and 28 days, respectively, is 31, 19 and 24 % due to the water-reducing effect ($\Delta W/C = 20 \%$). The ecological effect of blended cement CEM IV / B is 47 % due to the reduction of CO₂ emission from 865 kg per tonne of cement (CEM I, clinker factor – 0.95) to 456 kg per tonne of cement (clinker factor – 0.50).

It is established that the use of the combined pozzolanic additive CPA-03 in the composition of fine-grained concrete instead of 50 % Portland cement CEM I with adding PCE in the amount of 1.50 % allows to obtain higher strength values by 16.5 % after 28 days of hardening compared to the concrete based on CEM I 42,5 R without supplementary cementitious materials.

The implementation of the principles of creation modified concretes based on low-carbon blended cements allows to obtain a complex of qualitatively new indicators (workability, reduced heat of hydration, increased corrosion resistance, weathering resistance, etc.), providing technological, technical, economic and environmental effects. Clinker-efficient concretes based on CEM IV/B 32,5 R are characterized by reduced water permeability (W10) and increased frost resistance (F150), which determines the rise of durability of structures, their decrease the cost at all stages of the life cycle. A significant reduction in the specific consumption of clinker per unit strength – 2.9 kg/(m³·MPa) and the CO₂ intensity of clinker-efficient concrete is 2.5 kg CO₂/(m³·MPa).

The efficiency of obtaining self-compacting concretes (C: FA: CA = 1: 1,27: 1,69, W/C = 0.30) on the basis of low-carbon CEM IV/B 32.5 R cement with a consumption of 525 kg per m³ of concrete (clinker intensity 262.5 kg / m³ of concrete) and was confirmed. Due to the optimized particle size distribution of low-carbon blended cement and rationally selected modifiers, the stability of the manufacturability indicators and the absence of the segregation phenomenon are ensured. High strength indicators were

noted – after 2; 7 and 28 days of hardening the compressive strength were 19.5; 44.6 and 76.4 MPa, respectively, which corresponds to the strength class C45/55. Specific consumption of clinker per unit strength – 3.4 kg/(m³·MPa); the CO₂ intensity of the self-compacting concrete is 2.9 kg of CO₂/(m³·MPa).

The design of building mortars compositions based on low-carbon blended cement for mortars MC 22,5X by the method of mathematical planning of the experiment is carried out. It is established that the optimum content of cement is 390 kg per 1 m³ of sand and the flow rate of the complex chemical additive plasticizing and air-entering action – 0.11 %, in which the high workability of the system is ensured and the required class of strength M100 is obtained. The high functionality of building mortars on the basis of low-carbon blended cement is also determined by the shelf life of the mortar within the required limits while ensuring full compliance with the performance requirements for building masonry mortars. In addition, such mortars are characterized by reduce the efflorescence formation.

The industrial release of the combined pozzolanic additive CPA-03 at “Ferozit” LLC and low-carbon blended cement for mortars MC 22,5X DSTU B B.2.7-124-2004 at PJSC “Ivano-Frankivsk Cement” and the production of modified concretes by the enterprise “TPK “BUDSPORT” LLC and building mortars by “VESTBETONBUD” LLC based on the developed binders are presented.

Keywords: low-carbon blended cement, supplementary cementitious materials, superzeolite, combined pozzolanic additive, pozzolanic activity, strength activity index, clinker-efficient concrete, specific cement consumption per unit strength, CO₂ intensity.