



Саницький М. А.



Кропивницька Т. П.



Круць Т. М.



Гев'юк І. М.

Саницький М. А., д.т.н., професор,
завідувач кафедри будівельного виробництва,
✉ msanytsky@ukr.net, ☎ +38 032 258-25-41,

Кропивницька Т. П., к.т.н.,
доцент кафедри будівельного виробництва
✉ tkropyvnytska@ukr.net, ☎ +38 096-57-47-212,

Круць Т. М., к.т.н., заступник голови правління,
✉ krutskomerc@ifcem.if.ua ☎ +38 0342 58 35 22

Гев'юк І. М., к.т.н., начальник лабораторії,
✉ labcem@ifcem.if.ua ☎ +38 067 344 84 30
ПрАТ «Івано-Франківськцемент»,
с. Ямниця, 77244, Україна

M. Sanytsky, D.Sc, professor,
head of department of Building production
✉ msanytsky@ukr.net, ☎ +38 032 258-25-41,

T. Kropyvnytska, assistant professor of department
of Building production
✉ tkropyvnytska@ukr.net, ☎ +38 096-57-47-212,

T. Kruts, PhD, Vice Chairman,
✉ krutskomerc@ifcem.if.ua ☎ +38 0342 58 35 22

I. Geviuk, PhD, head of testing laboratory,
✉ labcem@ifcem.if.ua ☎ +38 067 344 84 30
JSC «Ivano-Frankivsk Cement»,
Yamnytsya, 77422, Ukraine

МОДИФІКОВАНІ ШВИДКОТВЕРДНУЧІ КЛІНКЕР-ЕФЕКТИВНІ БЕТОНИ

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ БЫСТРОТВЕРДЕЮЩИЕ КЛІНКЕР-ЭФФЕКТИВНЫЕ БЕТОНЫ

MODIFIED RAPID HARDENING CLINKER-EFFICIENT CONCRETES

Анотація. У статті проаналізовано досвід зниження «вуглецевого сліду» у будівельній галузі за рахунок широкого використання низькоемісійних цементів та клінкер-ефективних бетонів. Показана доцільність застосування високоякісних композиційних портландцементів з високою ранньою міцністю ПрАТ «Івано-Франківськцемент» та комплексного підходу до проектування складу бетону шляхом оптимізації суміші компонентів на різних функціональних рівнях, а також введення полікарбоксилатних суперпластифікаторів, лужних активаторів і нанокompatитів. Модифіковані швидкотверднучі клінкер-ефективні бетони забезпечують прискорені темпи будівництва та вирішення проблем, пов'язаних з необхідністю реалізації стратегії низьковуглецевого розвитку.

Ключові слова: клінкер-ефективні бетони, композиційний портландцемент, полікарбоксилатні етери, нанокompatити, висока рання міцність.

Аннотація. В статье проанализирован опыт снижения «углеродного следа» в строительной отрасли за счет широкого использования низкоэмиссионных цементов и клинкер-эффективных бетонов. Показана целесообразность применения высококачественных композиционных портландцементов с высокой ранней прочностью ПАО «Ивано-Франковскцемент» и комплексного подхода к проектированию состава бетона путем оптимизации смеси компонентов на различных функциональных уровнях, а также введения суперпластификаторов поликарбоксилатного типа, щелочных активаторов и нанокompatитов. Модифицированные быстротвердеющие клинкер-эффективные бетоны обеспечивают ускоренные темпы строительства и решение проблем, связанных с необходимостью реализации стратегии низкоуглеродного развития.

Ключевые слова: клинкер-эффективные бетоны, композиционный портландцемент, поликарбоксилатные эфиры, нанокompatиты, высокая ранняя прочность.

Abstract. The article analyzes the experience of reducing the carbon footprint in the construction industry due to the widespread introduction of low-CO₂ cements and clinker-efficient concretes. The expediency of using high quality composite Portland cements with high early strength of JSC «Ivano-Frankivskcement» and the complex approach for designing the concrete composition by optimizing the mixture of components at different functional levels, the introduction of polycarboxylate type superplasticizers, alkaline activators and nanocomposites is shown. Modified rapid hardening clinker-efficient concretes provide accelerated construction rates and solutions to the need for a low-carbon development strategy.

Keywords: clinker-efficient concrete, Portland composite cement, polycarboxylate ethers, nanocomposites, high early strength.

Постановка проблеми

Бетон, як багатокomпонентний і широкомасштабний композиційний будівельний матеріал, завдяки порівняно низькій ціні, різноманітності застосування, високій довговічності та екологічності, все ширше застосовується у будівництві [1]. Це другий, найбільш часто використовуваний речовинний матеріал на планеті після води. За даними ООН, у зв'язку з подальшою індустріалізацією бетон буде мати важливе значення у будівництві інфраструктури, транспортних систем, реалізації проектів виробництва екологічно-чистої енергії. Слід відзначити, що клінкервмісні портландцементи і надалі будуть необхідним матеріалом для виготовлення бетону. Очікується, що до 2050 р. споживання бетону збільшиться ще на 12–15 % порівняно з показником 2014 р. При цьому передбачається ефективне використання цементозаміщуючих матеріалів з метою зниження клінкерної складової, розроблення нових типів низькоемісійних цементів та клінкер-ефективних бетонів на їх основі.

Найбільш ефективним способом зі скорочення викидів CO₂ є зниження вмісту клінкеру в портландцементі (в країнах ЄС у

2014 р. середній клінкер-фактор у цементі складав 80 %, а до 2050 р. згідно СЕМBUREAU передбачається, що співвідношення клінкеру до цементу становитиме 70 %). Тому інноваційним напрямком у галузі будівельного виробництва є застосування композиційних портландцементів типу СЕМ II/B-M з пониженим вмістом клінкеру. Перевагами таких еко-ефективних цементів є ресурс- та енергозбереження, а також зниження рівня емісії CO₂, при цьому бетони на їх основі характеризуються вищою довговічністю. Разом з тим, слід відзначити, що зменшення клінкер-фактору в цементах прямо впливає на зниження їх ранньої міцності та швидкості тверднення бетонів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На даний час одним із основних завдань цементної промисловості та будівельної галузі є зниження «вуглецевого сліду». Заміщення портландцементного клінкеру в складі цементів на активні мінеральні добавки гідралічної або пуцо-

ланічної дії, а також мікронаповнювачі в значній мірі сприяє вирішенню даної проблеми. При цьому заміна кожного кілограму клінкеру в бетоні на цементозаміщуючі матеріали дозволяє зменшити емісію CO_2 на 0,6–1,0 кг [2]. Разом з тим, зниження клінкер-фактору в бетоні призводить до суттєвого зменшення його ранньої міцності. Тому для одержання ефективних низьковуглецевих бетонів слід дотримуватись принципів їх поетапного розроблення за рахунок застосування змішаних та композиційних цементів високого класу міцності (не менше 42,5 МПа), оптимізації водо-цементного відношення та вмісту цементного матеріалу в бетонній суміші.

У доступному майбутньому головним складником цементів і надалі залишиться портландцементний клінкер, тому дуже важливим є вирішення питання про те, як ефективніше його використовувати. Це означає, що необхідно так знизити вміст клінкеру в бетоні, щоб не погіршувались характеристики останнього, зокрема довговічність при різних сценаріях зовнішнього впливу. В той же час, такий індикатор стану справ у скороченні емісії CO_2 підприємствами цементної галузі як вміст клінкеру в цементі на даний час вже не дозволяє встановити прямий зв'язок між екологічними і технічними характеристиками бетону. Тому згідно концепції, запропонованої М. Шнайдером, В. Калашниковим [2, 3], розглядаються параметри, що враховують технічні характеристики, зокрема ефективність в'язучого в бетоні, яка визначається таким параметром як клінкер-інтенсивність $[\text{кг клінкеру}/(\text{м}^3 \cdot \text{МПа})]$; крім цього встановлений параметр CO_2 -інтенсивність $[\text{кг CO}_2/(\text{м}^3 \cdot \text{МПа})]$, що характеризує емісію CO_2 при виготовленні 1 м^3 бетону заданого класу міцності. Характерно, що зі збільшенням міцності бетону величини цих параметрів зменшуються, оскільки клінкер використовується більш ефективно (рис. 1). Для традиційних бетонів із міцністю на стиск 30 МПа мінімальне значення клінкер-інтенсивності становить близько $8 \text{ кг}/\text{м}^3 \cdot \text{МПа}$, проте середнє значення складає, як правило, $12 \text{ кг}/\text{м}^3 \cdot \text{МПа}$. Мінімум CO_2 -інтенсивності становить близько $2 \text{ кг CO}_2/(\text{м}^3 \cdot \text{МПа})$ для бетонів вище 40–50 МПа і збільшується експоненціально для менших міцностей. У комплексі параметри клінкер- та CO_2 -інтенсивностей характеризують клінкер-ефективність бетону, підвищення якої можна досягти шляхом заміни частини клінкеру на активні мінеральні добавки (гранульовані доменні шлаки, цеолітовий туф, зола-винесення та ін.) [4].

Для подолання такого суттєвого недоліку композиційних цементів, як зниження їх ранньої міцності, згідно концепції П.-К. Айчина [5] використовуються як хімічний, так і фізичний підходи. Хімічний підхід полягає у викори-

станні тонкомелених цементів з підвищеним вмістом у клінкері високореакційних мінералів C_3S та C_3A , проте такий підхід вже практично себе вичерпав, так як при цьому суттєво зростають енергетичні затрати на їх виготовлення, крім цього реологічні властивості сумішей погіршуються, а міцність у пізніші терміни тверднення суттєво не зростає. З точки зору довговічності бетону такий підхід призводить до зростання кількості етрингіту в гідратованому цементному камені, а відповідно до пониження його сульфатостійкості. Тому більш перспективним є фізичний підхід, який полягає у тому, щоб, не змінюючи хімічний склад портландцементного клінкеру, зменшити водо-в'язуче відношення (В/В) і збільшити щільність упаковки частин в'язучого в цементному тісті за рахунок введення високодисперсних мікронаповнювачів та суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу. При цьому забезпечується збільшення міцності композиційних цементів як у ранньому, так і в пізньому термінах тверднення. Важливим є також дослідження потенціалу підвищення показників бетону згідно вимог стратегії сталого розвитку, починаючи від початкового перемішування бетонної суміші до властивостей бетону в складних конструкціях, що піддаються різним типам навантажень та агресивних середовищ. Значний ефект прискорення ранньої міцності бетонів також забезпечується шляхом лужної активації [6–8].

Для забезпечення необхідної легковкладальності бетонної суміші та необхідних будівельно-технічних властивостей бетону проводять проектування його складу з використанням портландцементів загальнобудівельного призначення, дрібного та крупного заповнювачів. При цьому заповнювачі для бетонів (дрібний і крупний) за своїми основними властивостями (міцністю, зерновим складом, наявністю шкідливих домішок, морозостійкістю тощо) повинні відповідати вимогам, що наведені в національних нормативних документах на дані матеріали. Слід відзначити, що згідно ДСТУ Б В.2.7-32-95 зерновий склад піску для будівельних робіт знаходиться в межах 0,16...5,0 мм. В той же час, згідно норм ЄС зерновий склад піску складає 0–2 мм, а наступні фракції заповнювачів – відповідно 2–8 та 8–16 мм.

В Україні при виготовленні бетонних сумішей часто використовуються дуже дрібні піски ($M_k = 1,0 \dots 1,5$), а зерновий склад крупного заповнювача починається від 5 мм. Як правило, у бетонній суміші відсутні фракції від 2 до 5 мм, що призводить до збільшення міжзернової пористості в бетоні та перевитрати цементу [9, 10]. Тому на практиці виникає потреба порівняти результати випробувань бетонів, запроєктованих згідно вітчизняних та європейських стандартів.

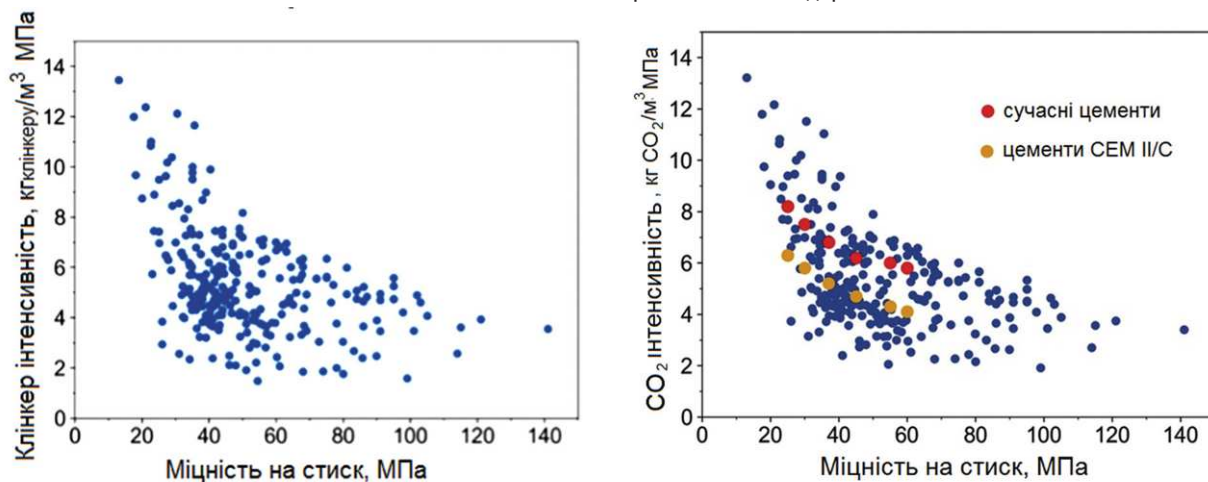


Рис. 1. Потенціал зниження викидів CO_2 шляхом оптимізації використання в'язучих із застосуванням сучасних технологій з високим вмістом наповнювачів та низькою водопотребою [4]

Метою роботи є розроблення швидкотверднучих модифікованих клінкер-ефективних бетонів шляхом використання композиційних портландцементів з високою ранньою міцністю та комплексного підходу, що передбачає оптимізацію суміші компонентів на різних функціональних рівнях в процесі проектування складу бетону, а також введення суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу та прискорювачів тверднення.

Матеріали і методи досліджень

Отримання клінкер-ефективних бетонів забезпечують технологічно-оптимізовані високоякісні портландцементи СЕМ I 42,5R, СЕМ II/A-S 42,5R, СЕМ II/A-LL 42,5R, СЕМ II/A-P 42,5R ПрАТ "Івано-Франківськцемент", які повністю відповідають європейським стандартам та виготовляються на основі портландцементного клінкеру нормованого мінералогічного складу, мас. %: $C_3S - 60,82$; $C_2S - 14,62$; $C_3A - 6,76$; $C_4AF - 12,32$; вміст лужних оксидів у перерахунку на $Na_2O_e - 0,8$ [11, 12]. В той же час, для технології клінкер-ефективних бетонів значний практичний інтерес також представляє застосування композиційного портландцементу з високою ранньою міцністю СЕМ II/B-M(S-P-L) 32,5R, який характеризується пониженим до 0,65 клінкер-фактором.

Для проектування зернового складу заповнювачів застосовано дрібні піски Миколаївського та Жовківського родовищ, гранітний щебінь двох фракцій: 2–5 мм та 5–20 мм. В якості високоефективних водоредуруючих добавок використано суперпластифікатори полікарбоксилатного типу (PCE). Для прискорення процесу тверднення бетону застосовано лужно-сульфатний активатор та дисперсію колоїдного розчину SiO_2 Levasil CB з частинами розміром від 2 до 150 нм (вміст сухої речовини – 50 мас. %).

Мікроструктуру бетонів досліджували на растровому електронному мікроскопі PEM 106I, а макроструктуру – з використанням стереоскопічного мікроскопу Bresser ETD-101.

Результати досліджень

Типовий склад бетонної суміші на основі високомарочного портландцементу СЕМ I 42,5R характеризувався кількісним співвідношенням компонентів Ц:П:Щ=1:1,81:3,46 (Ц=350 кг, В/Ц=0,61). Добавки суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу різних виробників PCE-1 та PCE-2 забезпечували зниження В/Ц бетонної суміші на 25...30%, тоді як для лігносульфонатів ЛСТ водоредуруючий ефект складав всього 10%. Як видно з рис. 2, для бетону з добавками полікарбоксилатів характерним є суттєвий (на 30...35%) приріст міцності на стиск як у ранньому віці, так і через 28 діб порівняно з бетоном з добавкою ЛСТ; при цьому за кінетику наростання міцності бетону з добавками PCE можна віднести до швидкотверднучих ($f_{cm2} / f_{cm28} \geq 0,5$). Клінкер-інтенсивність для бетону без добавок складає 8,25 кг клінкеру/(м³·МПа), а для бетону з добавками PCE-1 та PCE-2 зменшується до 6,38...6,11 кг клінкеру/(м³·МПа).

Слід відзначити, що показники клінкер-інтенсивності вказаних складів бетонів як без добавок, так і з добавками

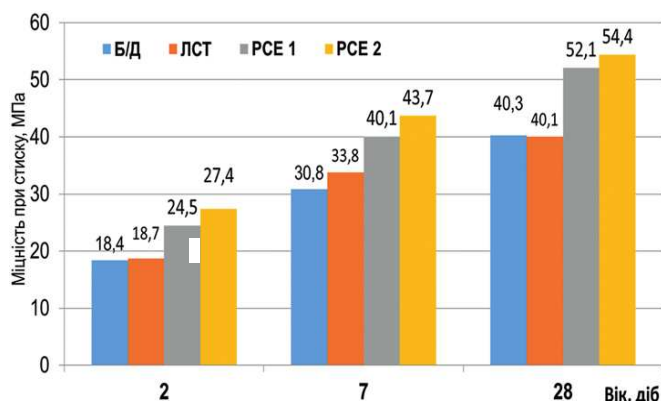


Рис. 2. Міцність бетону з добавками пластифікаторів різних генерацій

PCE в 2-3 рази перевищують мінімальні значення для клінкер-ефективних бетонів. Причиною цього, окрім підвищених значень В/Ц бетонної суміші, є також невідповідність кривої зернового складу бетону, що негативно впливає на його властивості, зокрема може викликати невідповідну легковкладальність бетонної суміші; проблеми з перекачуванням та ущільненням суміші; сегрегацію складників бетонної суміші; підвищену витрату цементу, високий вміст пор, пониження параметрів міцності, а також погіршення експлуатаційних властивостей та довговічності бетону [13].

Негативний вплив підвищеного водо-цементного відношення та невідповідності фракційного складу компонентів вищенаведеного складу бетону наглядно виявляється при дослідженні мікроструктури цементуючої матриці поверхні сколу бетону без хімічних добавок методом растрової електронної мікроскопії. Так, на мікрофотографії (рис. 3, а – рівень мезоструктури x200) спостерігається нібито монолітна структура цементуючої матриці; в той же час, як видно при великому збільшенні (x10000), цементні зерна контактують недостатньо щільно (рис. 3, б), що призводить до зростання капілярної пористості. Це свідчить про необхідність підвищення щільності цементуючої матриці бетону для забезпечення довговічності бетону.

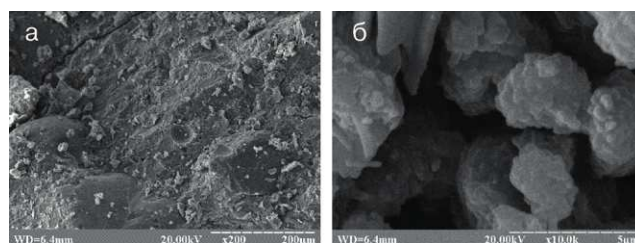


Рис. 3. Мезо- (а) та мікроструктура (б) традиційного бетону (В/Ц=0,61)

В подальших дослідження підбір складу бетонної суміші проводився згідно стандарту PN-B-06250:1988 з використанням композиційного портландцементу з високою ранньою міцністю СЕМ II/B-M(S-P-L) 32,5R. Для одержання клінкер-ефективних бетонів визначальним для щільності упаковки зерен є оптимізація гранулометричного складу компонентів. Для проектування кривої необхідного гранулометричного складу товарної бетонної суміші використано поліфракційні заповнювачі (пісок Жовківський фракції 0,125–2,0 мм, щебінь фракції 2–4; 4–8; 8–16 мм), зерновий склад яких визначався методом сухого просіювання через набір сит згідно EN 933-1:2012-03. Як видно з рис. 4, в цілому запроєктована гранулометрична крива заповнювачів знаходиться в області задовільних складів, що гарантує відповідну легковкладальність та консистенцію бетонної суміші при якомога найменшій кількості води та цементу (розчинової складової), а також мінімальному вмісту повітря.

Оцінка впливу рецептурних і технологічних факторів на властивості бетонів проведена з використанням методу екс-

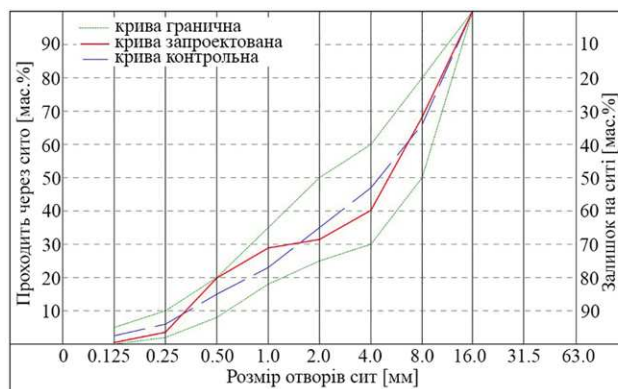


Рис. 4. Запроєктована гранулометрична крива заповнювачів згідно PN-B-06250:1988

периментально-статистичного моделювання. В якості змінних факторів вибрано витрату СЕМ II/В-М(S-P-L) 32,5R ($X_1=320; 370; 420 \text{ кг/м}^3$) та кількість суперпластифікатора PCE-2 ($X_2=0; 0,8; 1,6 \text{ мас.}\%$). Для прискорення набирання ранньої міцності до складу бетонів також вводили лужний активатор тверднення (2,0 мас.% Na_2SO_4). Аналізом отриманих моделей міцності бетонів встановлено, що при витраті композиційного портландцементу в межах $320 \dots 420 \text{ кг/м}^3$ у бетонній суміші без добавок ($\text{OK}=16-18 \text{ мас.}\%$) показник В/Ц змінювався від 0,62 до 0,48; при цьому такий бетон характеризувався пониженою міцністю в ранньому віці (через 1 добу $f_{\text{cm1}}=3,1 \dots 5,8 \text{ МПа}$). При введенні $1,0-1,6 \text{ мас.}\%$ PCE за рахунок суттєвого водоредукуючого ефекту (27-34 %) міцність модифікованих бетонів через 1 добу збільшилась у 3,5-4,6 рази. Найвищі значення міцності у віці 2 та 28 діб ($f_{\text{cm2}}=47,0 \text{ МПа}$; $f_{\text{cm28}}=80,0 \text{ МПа}$) досягаються для модифікованого бетону з витратою цементу $\text{Ц}=420 \text{ кг/м}^3$ та суперпластифікатора 1,6 мас. % PCE (рис. 5, а). Для модифікованих бетонів питома витрата клінкеру на одиницю міцності через 28 діб зменшується до $4,5 \dots 3,0 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{МПа)}$ (рис. 5, б), а CO_2 -інтенсивність складає $3,9 \dots 2,6 \text{ кг CO}_2/(\text{м}^3 \cdot \text{МПа})$.

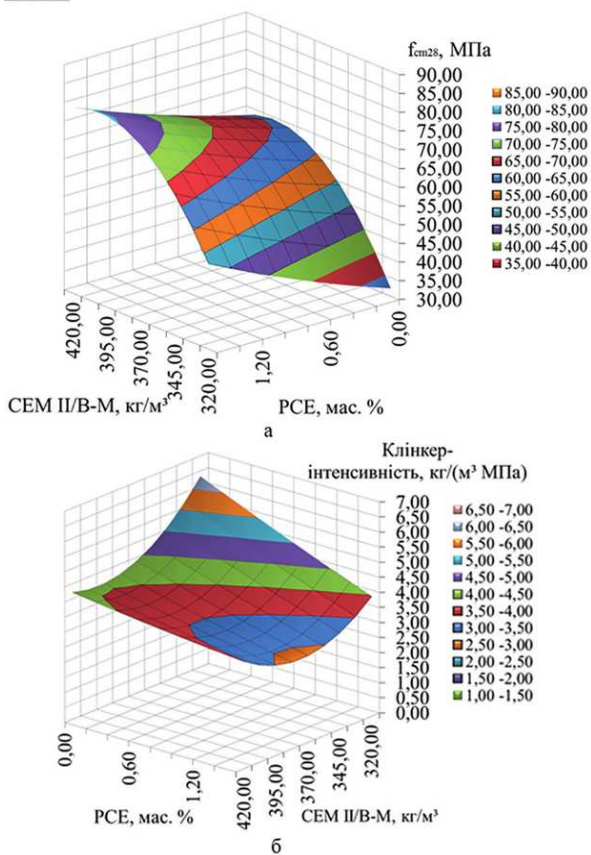


Рис. 5. Ізопараметричні діаграми міцності на стиск (а) та клінкер-ефективності (б) бетону у віці 28 діб

Дослідження впливу суперпластифікатора (PCE-2), лужного активатора та наномодифікатора на технологічні властивості та міцність клінкер-ефективних бетонів проводили на оптимізованому складі суміші компонентів з витратою матеріалів на 1 м^3 : $\text{Ц}=370 \text{ кг}$, $\text{П}=407 \text{ кг}$, $\text{Щ}_{2-4}=527 \text{ кг}$, $\text{Щ}_{4-16}=824 \text{ кг}$ (марка бетонної суміші за осадкою конуса – S4). Для бетону без добавок рання міцність через 12 та 24 год становила відповідно 0,8 та 10,2 МПа, стандартна – 40,5 МПа, що відповідає класу C25/30. При введенні добавки PCE + Na_2SO_4 до бетонної суміші досягається водоредукуючий ефект $\Delta\text{В/Ц}=40\%$ із забезпеченням осадки конуса 160 мм ($\rho_{\text{сер}}=2420 \text{ кг/м}^3$, $V_n=2,2\%$). За оцінкою питомої міцності згідно EN 206-1 такий модифікований бетон характеризується середнім її наростанням ($f_{\text{cm2}} / f_{\text{cm28}} = 0,39$). Введення комбінованої добавки

PCE + Na_2SO_4 + нано- SiO_2 до бетонної суміші ($\text{В/Ц}=0,40$, $\rho_{\text{сер}}=2410 \text{ кг/м}^3$, $V_n=2,5 \%$) забезпечує приріст ранньої міцності через 12 год – у 8 разів, а через 2 доби – у 2,3 рази. Для наномодифікованого клінкер-ефективного бетону на основі композиційного портландцементу СЕМ II/В-М міцність на стиск у віці 28 діб складає 78,9 МПа, що відповідає класу міцності C50/60. Такий клінкер-ефективний бетон характеризується швидким наростанням міцності ($f_{\text{cm2}} / f_{\text{cm28}} = 0,51$).

Для модифікованих швидкотверднучих клінкер-ефективних бетонів характерне формування щільної контактної зони між крупним заповнювачем і цементуючою матрицею на мікро- та нанорівнях, що забезпечує її високу міцність. Методом растрової електронної мікроскопії встановлено, що цементуюча матриця бетону без добавок характеризується пористою мікроструктурою зі слабким зчепленням між гідратованими фазами. Нанокремнезем покращує ефективність цементуючих матеріалів завдяки надзвичайно високій пуцолановій активності та здатності до заповнення капілярних пор. Результати, отримані за допомогою методів SEM та EDX, свідчать, що додавання нанокремнезему покращує мікроструктуру бетону за рахунок утворення додаткових кластерів щільного гелю С-S-N(I), які сприяють зшиванню частинок у цементуючій матриці (рис. 6, а, б)

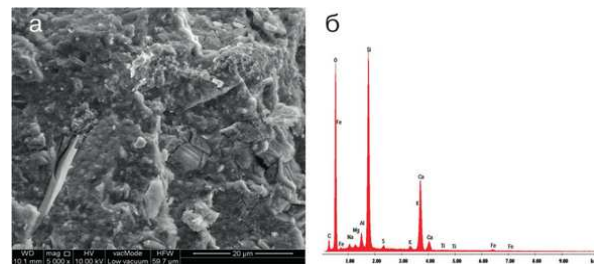


Рис. 6. Електронна мікрофотографія (а) та мікрозондовий рентгеноспектральний аналіз (б) поверхні цементуючої матриці модифікованого клінкер-ефективного бетону через 28 діб тверднення

Дослідженнями порової структури (рис. 7) встановлено, що модифікований клінкер-ефективний бетон характеризується підвищеною кількістю дрібних замкнених мікропор ($A_{300}=1,34$), які рівномірно розподілені в структурі цементуючої матриці. При цьому показник Пауерса, який визначає відстань між порами, складає 0,157 мм (норма $\leq 0,2 \text{ мм}$), що сприяє підвищенню морозостійкості. Для клінкер-ефективного бетону класу C50/60 призма міцність становить $f_{\text{cm,prism}}=62,5 \text{ МПа}$, модуль пружності $E_{\text{cm}}=48,4 \text{ ГПа}$, коефіцієнт Пуасона $\nu=0,17$; морозостійкість – F300.

Таким чином, використання технологічно-оптимізованих композиційних портландцементів ПрАТ «Івано-Франківськцемент» в комплексі з добавками полікарбоксилатних суперпластифікаторів та прискорювачів тверднення при умові правильно запроєктованого гранулометричного складу полікомпонентної суміші заповнювачів дозволяє отримати швидкотверднучі клінкер-ефективні бетони, які відносяться до нового покоління низькоемісійних бетонів з високими експлуатаційними властивостями та представляють інноваційний напрямок у технології будівельного виробництва. Перевагами таких бетонів є високий рівень клінкер-ефективності та низькі показники викидів CO_2 у поєднанні з їх підвищеною довговічністю та надійністю конструкцій. Високоякісні композиційні портландцементи з високою ранньою міцністю забезпечують понижене тепловиділення модифікованих бетонів, що визначає їх ефективне засто-

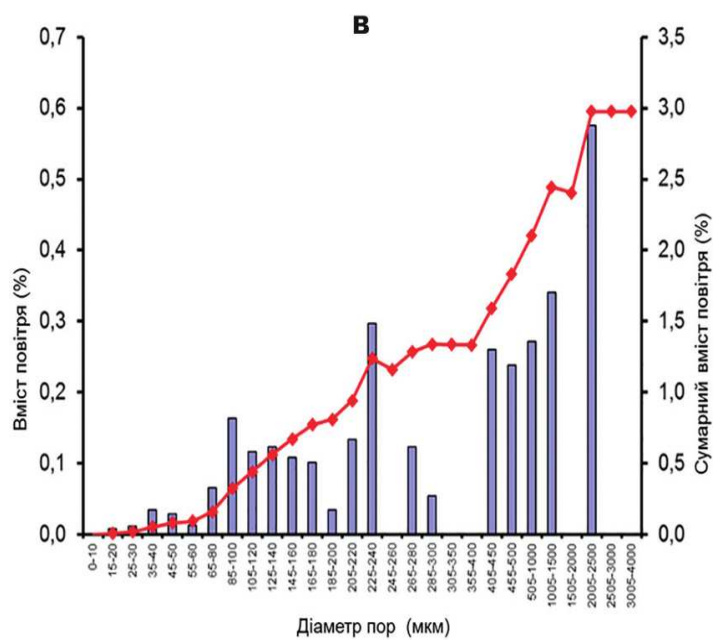
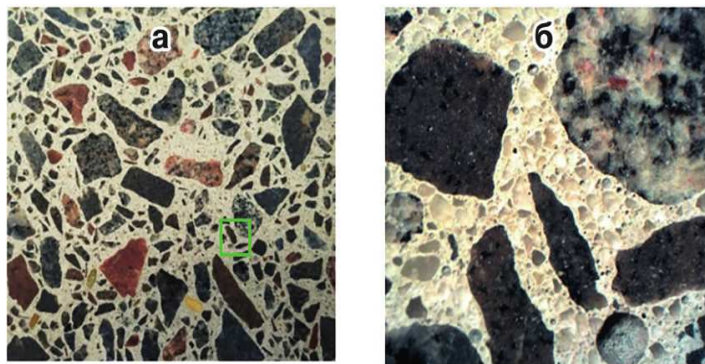


Рис. 7. Модифікований клінкер-ефективний бетон:
 а – макроструктура,
 б – мезоструктура,
 в – розподіл повітряних пор за розмірами

сування в масивних конструкціях; крім цього створюється можливість одержання корозійностійких бетонів для гідротехнічних і меліоративних об'єктів, що піддаються впливам різних агресивних середовищ, а також будівельних конструкцій з особливими вимогами.

Висновки

Значне зростання виробництва бетону у світі визначає згідно стратегії сталого розвитку необхідність зниження емісії при його виробництві. Швидкотверднучі високофункціональні клінкер-ефективні бетони в значній мірі сприяють вирішенню даної проблеми, проте для цього потрібна всестороння зміна технології будівельного виробництва за рахунок вдосконалення процесів, матеріалів та методів виготовлення бетону. В перспективі чистоклінкерний портландцемент необхідно буде повністю замінити більш складними бінарними, третинними або навіть четвертинними в'язучими з використанням спеціальних цементозаміщуючих матеріалів.

Підвищення клінкер-ефективності бетонів на основі композиційних портландцементів з високою ранньою міцністю досягається за рахунок оптимізації гранулометричного складу компонентів бетонної суміші на різних структурних рівнях, введення суперпластифікаторів полікарбоксилатного типу, лужних активаторів і наномодифікаторів, що в комплексі забезпечує високу щільність упакування зерен цементуючої матриці. При цьому досягається підвищення показників особливо ранньої міцності бетону ($R_{c12\text{год}}=6,4$ МПа) та одержання клінкер-ефективних бетонів класу C50/60 із швидким наростанням міцності ($f_{cm2} / f_{cm28} = 0,51$). Модифіковані клінкер-ефективні бетони характеризуються дрібними рівномірно розподіленими замкненими порами в цементуючій матриці, що визначає їх підвищену морозостійкість та довговічність в різних умовах експлуатації.

Література:

1. Принципи стратегії сталого розвитку в цементній промисловості / Т.М. Круць, І.М. Гев'юк М.А. Саницький, Т.П. Кропивницька // Будівельні матеріали та вироб. – 2015. – № 3-4. – С. 16-19.
2. Schneider M. The cement industry on the way to low-carbon future / M. Schneider // Cement and Concrete Research. – 2019. – Vol. 124. – P. 1–19.
3. Калашников В. И. Через рациональную реологию в будущее бетонов / В. И. Калашников // Строительные материалы XXI века. Технологии бетонов. – 2007. – № 5. – С. 8–10.
4. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry / K. L. Scrivener, V. M. John, E. M. Gartner, et al. // Cement and Concrete Research. – 2018. – Vol.114. – P. 2-26.
5. Aitcin, P.-C. Cements of today – concretes of tomorrow / P.-C. Aitcin, W. Wilson // CWB. – 2014. – P. 349–358.
6. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Gorpynko O., Geviuk I. Effect of the Particle Surface Distribution on the Reactivity of Supplementary Cementitious Materials in Blended Cements. Book of abstracts ICCS 2019. – P. 188.
7. Кропивницька Т.П. Концепція еко-ефективних наномодифікованих лужноактивованих композиційних цементів з високою ранньою міцністю / Т. П. Кропивницька // Вісник НУ «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. – 2019. – № 912. – С. 18-23.
8. Щелочные цементы : монография / П. В. Кривенко, Р. Ф. Рунова, М. А. Саницький, И. И. Руденко // К. : Основа, 2015. – 448 с.
9. Гоц В. І. Бетони і будівельні розчини: підручник / В. І. Гоц, В. В. Павлюк, П. С. Шилюк. – К.: Основа, 2016. – 568 с.
10. Дворкін Л. Й., Гоц В. І., Дворкін О. Л. Випробування бетонів і будівельних розчинів. Проектування їх складів: навчальний посібник / К. : Основа, 2014. – 304 с.
11. Високоякісні швидкотверднучі портландцементи виробництва ПрАТ «Івано-Франківськцемент» / Т.М. Круць, О.Ф. Горпинко, І.М. Гев'юк, М.А. Саницький, Т.П. Кропивницька // Будівельні матеріали та вироб. – 2018. – № 1/2 (97). – С. 34–37.
12. Саницький М. А., Кропивницька Т. П., Гев'юк І.М. Швидкотверднучі портландцементи з добавкою вапняку // Будівельні матеріали та вироб. – 2019. – № 1-2 (100). – С. 18–23.
13. Development of nanomodified rapid hardening clicker-efficient concretes based on Portland-composite cements / T. Kropyvnytska, M. Sanytsky, T. Rucinska, O. Rykhlitska // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Technology organic and inorganic substances. – 2019. – Vol. 4/6 (100). – P 38-48.