



Саницький М. А.



Кропивницька Т. П.



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,
Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна

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

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

T. Kropyvnytska, PhD,
assistant professor of department of Building production
✉ tkropyvnytska@ukr.net, ☎ +38 096-57-47-212,
Lviv Polytechnic National University,
Lviv, 12 S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine

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

ШВИДКОТВЕРДНУЧІ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТИ З ДОБАВКОЮ ВАПНЯКУ

RAPID HARDENING PORTLAND CEMENTS WITH LIMESTONE ADDITIVE

БЫСТРОТВЕРДЕЮЩИЕ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТЫ С ДОБАВКОЙ ИЗВЕСТНЯКА

Анотація. У статті проаналізовано досвід широкого використання портландцементів з добавкою вапняку в країнах ЄС. Наведено показники фізико-механічних випробувань сертифікованого портландцементу з вапняком з високою ранньою міцністю CEM II/A-LL 42,5 R виробництва ПрАТ «Івано-Франківськцемент». Показано, що висока рання міцність досягається за рахунок активної структуроутворюючої ролі тонкодисперсної фракції вапняку відносно алюмінатних фаз та дії вапняку як мікронаповнювача. Швидкотверднучі портландцементи з добавкою вапняку забезпечують технологічний, технічний, екологічний та економічний ефекти при виготовленні збірного та монолітного залізобетону.

Ключові слова: портландцементи, висока рання міцність, вапняк, гранулометричний склад, гідратація, мікронаповнювач.

Аннотация. В статье проанализирован опыт широкого использования портландцементов с известняком в странах ЕС. Приведены показатели физико-механических испытаний сертифицированного портландцемента с известняком с высокой ранней прочностью производства ЧАО «Ивано-Франковскцемент». Показано, что высокая ранняя прочность достигается за счет активной структурообразующей роли тонкодисперсной фракции известняка относительно алюминатных фаз и действия известняка как микрозаполнителя. Быстротвердеющие портландцементы с добавкой известняка обеспечивают технологический, технический, экологический и экономический эффекты при изготовлении сборного и монолитного железобетона.

Ключевые слова: портландцементы, высокая ранняя прочность, известняк, гранулометрический состав, гидратация, микрозаполнитель.

Annotation. The article analyzes the experience of the wide use of Portland cements with limestone additive in the EU countries. The indexes of physical-mechanical tests of certified Portland limestone cement with high early strength CEM II/A-LL 42.5 R produced by PJSC «Ivano-Frankivsk Cement» are given. It is shown that high early strength is achieved due to the active structure formation role of the fine-grained limestone fraction relative to the aluminate phases and the limestone action as a microfiller. Rapid-hardening Portland cements with limestone additive provides technological, technical, ecological and economic effects in the production of prefabricated and monolithic reinforced concrete.

Keywords: Portland cements, high early strength, limestone, granulometric composition, hydration, microfiller.

Постановка проблеми

Основною тенденцією розвитку будівельної галузі є перехід на енерго- та ресурсозберігаючі технології виробництва будівельних матеріалів. Ключовим матеріалом, що широко застосовується у будівництві, на сьогодні залишається портландцемент. Провідні цементні компанії всього світу виробляють понад 4,6 млрд. т цементу за рік і при цьому викидають близько 4 млрд. т CO₂, що складає 6-7 % від загального обсягу викидів CO₂ на планеті. Цементна промисловість має унікальні можливості досягти змін в секторі будівництва, використовуючи нові технологічні рішення [1]. Для досягнення цілей зниження емісії CO₂ до 2050 року СЕМБЮРЕАУ запропоновано низьковуглецеву дорожню карту сектору цементу та бетону, одним з найбільш ефективних напрямків якої є заміщення клінкеру мінеральними складниками та впровадження нових типів цементів, що дозволить замінити значну частку високоенергоємного портландцементного клінкеру на цементозаміщуючі матеріали. При цьому розроблення швидкотверднучих порландцементів з пониженим клінкер-фактором, які забезпечують створення прогресивних технологій високоякісних бетонів, сприяє вирішенню важливої соціально-економічної проблеми, пов'язаної з необхідністю реалізації стратегії низьковуглецевого розвитку в Україні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На даний час у країнах ЄС з екологічних та економічних причин відбуваються зміни в номенклатурі вироблених і спожитих цементів, зокрема протягом останніх років збільшився випуск портландцементів типу CEM II класу міцності 42,5. Наглядною ілюстрацією даної тенденції є статистичні дані щодо застосування цементів CEM I, CEM II, CEM III різних класів міцності в Німеччині [2]. Як видно з рис. 1, у 2000 р. найвищий відсоток цементу (60,1%) виготовлявся класу міцності 32,5, тоді як випуск цементів класу міцності 42,5 складав 33,4 %, тобто в 1,8 разів менше. В той же час, станом на 2017 р. спостерігалось значне збільшення випуску високомарочних цементів: для класу міцності 42,5 зростання до 60,7 %, зокрема клас міцності 52,5 збільшився від 6,5 до 17 %, при цьому домінуючу роль відігравали портландцементи з добавками типу CEM II.

Слід зазначити, що у зв'язку з дефіцитом якісних гранульованих доменних шлаків (ГДШ) у ряді країн ЄС ставиться завдання повної або часткової його заміни. Це призводить до необхідності зниження вмісту ГДШ в складі цементів. Тому згідно з даними СЕМБЮРЕАУ у ЄС, починаючи з 2010 р., спостерігається збільшення випуску цементів з мінеральними до-

бавками та портландцементів з добавкою вапняку CEM II/L,LL, а рівень продажу портландцементу без добавок CEM I зменшився майже в два рази. Як видно з рис. 2, у 2017 р. найбільшу частку (47%) займали портландцементи з мінеральними добавками. При цьому спостерігається подальше зростання випуску портландцементів з вапняком CEM II/L, кількість яких вже є вищою в порівнянні з портландцементом типу CEM I.

Зростання випуску портландцементів з добавкою вапняку пов'язане з тим, що вапняк отримується з власних кар'єрів цементних заводів і є одним з найбільш широко доступних сировинних матеріалів. На рис. 3 представлена оцінка доступності можливих мінеральних добавок і наповнювачів у порівнянні з кількістю виробленого цементу.

Характерно, що вапняк є не лише головною природною сировиною для виробництва портландцементного клінкеру, але й відноситься до складників цементів, зокрема він є повноцінним компонентом портландцементів з вапняком CEM II/A,B-LL (L) і портландцементів композиційних CEM II/A,B-M. Крім цього виробники цементів також часто використовують вапняк як додатковий складник (до 5,0 мас.%). Згідно EN 197-1 вапняк, що використовується як мінеральна добавка для цементу, позначається літерами L або LL, а як основний складник портландцементів повинен відповідати вимогам щодо вмісту карбонату кальцію (CaCO_3 має становити не менше 75 мас. %), а також вмісту глинистих мінералів відповідно до EN 933-9, який не повинен перевищувати 1,20 г/100 г, та вмісту загального органічного вуглецю (TOC) при визначенні згідно EN 13639, який має відповідати одному з наступних критеріїв: для LL – не більше 0,20 мас. %, для L – не більше 0,50 мас. %.

Заміщення частини портландцементного клінкеру вапняком, окрім екологічного ефекту та економічної ефективності, дозволяє отримати цементи перш за все з покращеними технологічними властивостями [4]. У цілому, фізико-механічні властивості портландцементів з вапняком залежать насамперед від вмісту вапняку в складі цементу, хімічного і мінералогічного складу портландцементного клінкеру та питомої поверхні отриманого цементу (тонини помелу). Економічна ефективність використання вапняку полягає в зменшенні витрат на виробництво портландцементу CEM II/A-LL шляхом пониження клінкер-фактору при забезпеченні показників міцності на рівні портландцементу CEM I. При цьому екологічний ефект виробництва портландцементів з вапняком забезпечується за рахунок зниження викидів CO_2 і оксиду азоту, що утворюються в процесі виробництва портландцементного клінкеру.

У роботах В.М. Колбасова, В.В. Тимашова та ін. [5, 6] показано дію карбонатних добавок на структуру цементного каменю, а також їх позитивний вплив на будівельно-технічні властивості портландцементів, що обумовлено хімічною взаємодією карбонатних добавок з алюмінатними фазами портландцементного клінкеру. Карбонатні добавки в цементах, окрім участі в процесах фазоутворення, є підкладкою для кристалізації гідратних утворень, прискорюють процеси гідратації і забезпечують добре зчеплення між складовими каменю, тобто вапняк у цементах з мінеральними добавками сприяє повнішому прояву активності іншими компонентами системи. Добавка вапняку в складі портландцементів сприяє зменшенню водопотреби, розшарування та водовідділення бетонних сумішей, підвищенню їх водоутримувальної здатності, пластичності, щільності та однорідності. При цьому знижуються усадка та водопоглинання бетонів, покращується їх атмосферо-, водо-, морозостійкість і отримується світліший колір бетону.

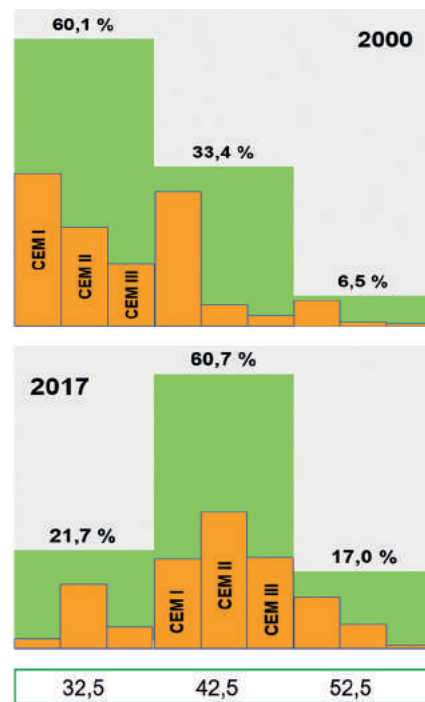


Рис. 1. Випуск цементів різних класів міцності у Німеччині

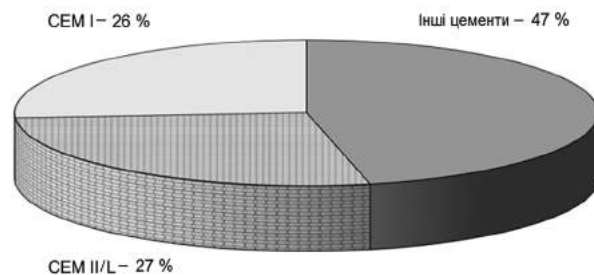


Рис. 2. Типи цементів, що виготовляються в країнах ЄС (2017 р.)

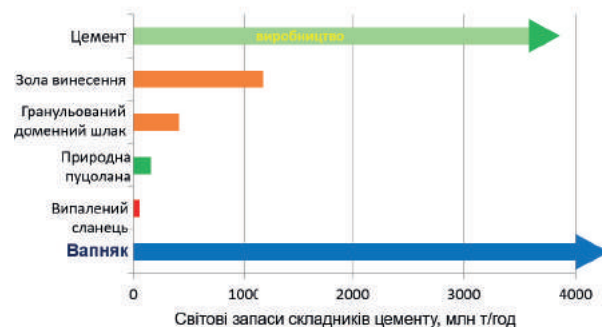


Рис. 3. Світове виробництво та запаси складників цементу [3]

Як зазначають Й. Штарк і В. Бернт [7], вапняк є особливо ефективним за тонкого подрібнення. Внаслідок цього забезпечується ширший діапазон розподілу зерен за фракціями, що дозволяє збагатити систему дрібнішими частинками і тим самим зменшити об'єм порожот між зернами портландцементного клінкеру. Під час тверднення такої цементуючої системи карбонат кальцію активізує реакції гідратації з утворенням гідрокарбоалюмінатів кальцію та етрингіту.

З огляду на реалії виробництва і споживання портландцементів з вапняком в країнах ЄС і прагнення України також зайняти своє місце на європейському ринку цементів, представляється доцільним розглянути питання випуску таких цементів в Україні, так як використання гранульованого доменного шлаку як основної добавки до цементів останнім часом пов'язане з певними труднощами, зокрема їх транспортуванням на значні відстані та ін.

Властивості портландцементу з вапняком

ПрАТ «Івано-Франківськцемент» – перший в Україні виробник портландцементів, який використовує карбонатну добавку – вапняк найвищої якості (LL) з родовища в Івано-Франківській обл. Вапняк – осадова, мономінеральна порода, що складається переважно з кальцію карбонату (CaCO_3) у формі кристалів кальциту різного розміру та незначної кількості домішок. У природньому стані вапняк характеризується вологістю на рівні 8-10%, що вимагає теплоенергетичних затрат на його сушіння. Після повного насичення водою вологість гранул вапняку зростає до 14% (рис. 4).

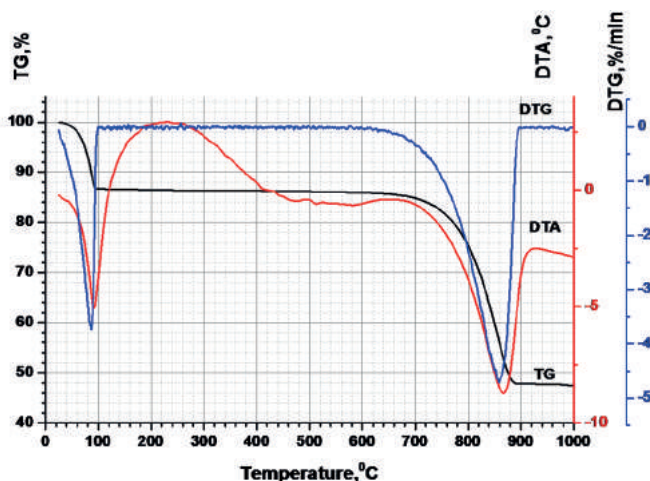


Рис. 4. Термограма вапнякового каменю після насичення водою

ПрАТ «Івано-Франківськцемент» використовує енергозберігаючу та високопродуктивну технологію «сухий» спосіб і широко впроваджує досягнення науки і техніки та передовий досвід у виробничі процеси. Використання сучасної технології помелу в замкненому циклі дозволяє одержувати широкий асортимент цементів шляхом як сумісного, так і роздільного помелу клінкеру і добавок в млинах з сепараторами останнього покоління. Процеси виготовлення цементів перебувають під контролем аналітичної техніки; найсучасніше обладнання лабораторії та контролю технологічного процесу дозволяє системно забезпечувати якість сировинної суміші, клінкеру та безпосередньо самого цементу на високому рівні [8].

На ПрАТ «Івано-Франківськцемент» сертифіковано портландцемент з добавкою вапняку (LL) класу 42,5 з високою ранньою міцністю (R): умовне позначення EN 197-1 CEM II/A-LL 42,5R; позначення згідно ДСТУ Б В.2.7-46:2010 – ПЦ II/A-B-500P-H.

Комплексною оцінкою дисперсності портландцементу з вапняком ПЦ II/A-B-500P-H встановлено, що питома поверхня $S_{\text{плит}} = 4300 \text{ см}^2/\text{г}$, залишок на ситі $A_{0,045} = 5,5\%$. Згідно даних лазерної granulometriї (табл. 1), портландцемент з вапняком характеризується високим вмістом (9,01%) тонкодисперсної фракції менше 1,0 мкм; для фракції менше 5,0 мкм вміст частинок складає 31,92%. При цьому ефективні діаметри $D_v(10)$, $D_v(50)$ і $D_v(90)$ складають відповідно 1,26, 11,8 і 45,6 мкм. Об'ємний середній діаметр $D[4;3]$ відповідає 18,4 мкм, а максимум середнього діаметра $D[3;2]$ за розподілом питомої поверхні становить 2,92 мкм. Слід зазначити, що питома поверхня портландцементу ПЦ II/A-B-500P-H визначається переважно тонкою фракцією вапняку (рис. 5), яка більшою мірою сприяє його вищій реакційно-хімічній активності.

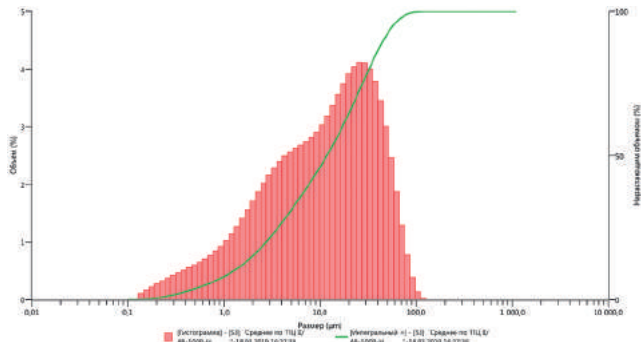


Рис. 5. Розподіл частинок за розміром портландцементу ПЦ II/A-B-500P-H (CEM II/A-LL 42,5 R)

Вапняк, порівняно з клінкером або гранульованим доменним шлаком, представляє собою м'який матеріал з підвищеною розмелоздатністю. Після сумісного помелу з портландцементним клінкером, вапняк забезпечує тонку фракцію (<5 мкм) в цементі (рис. 6, а), яка сприяє підвищенню активності змішаного портландцементу за рахунок оптимізації granulometriчного складу із забезпеченням більш широкого діапазону розподілу зерен за фракціями і тим самим зменшення об'єму порожнин між зернами клінкеру. Тонка фракція вапняку сприяє підвищенню пластичності цементного тіста, а решта фракцій – виконує функцію мікронаповнювача, збільшуючи щільність цементуючої матриці (рис. 6, б).

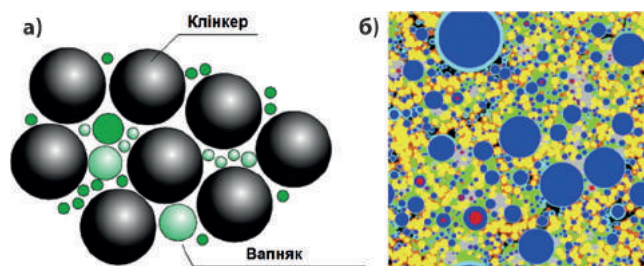


Рис. 6. Модель розподілу частинок клінкеру та вапняку після помелу (а) та після гідратації (б) для цементу з добавкою 20 мас.% вапняку

Для портландцементу з вапняком ПЦ II/A-B-500P-H нормальна густина цементного тіста складає 27,5%, об'ємний коефіцієнт водовідділення – 21,5%. Порівняльні фізико-механічні випробування портландцементу з вапняком проведені згідно ДСТУ Б В.2.7-187 при $V/C=0,39$ на основі монофракційного піску, а також згідно ДСТУ Б EN 196-1 при $V/C=0,50$ на поліфракційному піску, що в більшій мірі відповідає вимогам для товарного бетону. Так, при випробуванні згідно з ДСТУ Б В.2.7-187 та ДСТУ Б EN 196-1 розплив стандартного конуса цементно-піщаної суміші становить відповідно 113 та 235 мм (рис. 7). Це свідчить, що даний портландцемент забезпечує покращену легковкладальність бетонних сумішей. Основні показники портландцементу CEM II/A-LL 42,5R (ПЦ II/A-B-500P-H), виготовленого на основі клінкеру нормованого мінералогічного складу EN 197-1:2011 (ДСТУ Б В.2.7-46:2010), наведені в табл. 2. Звідси видно, що границя міцності на стиск через 2 та 28 діб складає $R_{c2}=30,0$ (34,0) МПа та $R_{c28}=45,6$ (52,0) МПа. Слід зазначити, що рання міцність даного цементу відповідає міцності портландцементу без добавок ПЦ I-500P-H.

Таблиця 1.

Granulometriчний склад ПЦ II/A-B-500P-H (CEM II/A-LL 42,5R)

$\varnothing < 1 \text{ мкм}$, %	$\varnothing < 5 \text{ мкм}$, %	$\varnothing < 10 \text{ мкм}$, %	$\varnothing < 20 \text{ мкм}$, %	$\varnothing < 45 \text{ мкм}$, %	$D[3;2]$ мкм	$D[4;3]$ мкм	$D_v(10)$ мкм	$D_v(50)$ мкм	$D_v(90)$ мкм
9,01	31,92	48,72	66,51	94,50	2,92	18,4	1,26	11,8	45,6

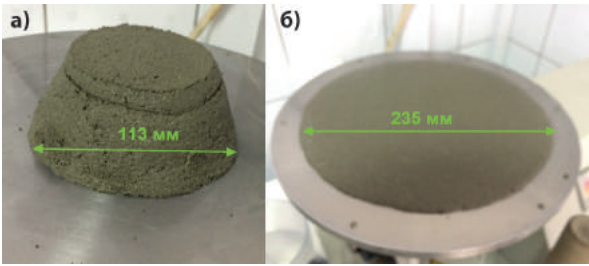


Рис. 7. Розплив стандартної цементно-піщаної суміші на основі портландцементу з вапняком, виготовленої з використанням: а – монофракційного піску згідно ДСТУ Б В.2.7-187 при В/Ц=0,39; б – поліфракційного піску згідно ДСТУ Б EN 196-1 при В/Ц=0,50

Методом диференційної калориметрії встановлено, що для ПЦ II/A-B-500P-H перший екзоефект становить 39,5 мВт/г; індукційний період складає 1,4 год. Другий екзоефект спостерігається через 7,0 год і відповідає 4,67 мВт/г. Теплота гідратації через 24 і 96 год складає відповідно 234 і 328 Дж/г і знаходиться на рівні портландцементу ПЦ I-500P-H (табл. 3).

Дослідженнями мікроструктури цементного каменю з добавкою тонкодисперсного вапняку в ранній період структуроутворення [9] встановлено (рис. 8, а), що фази C-S-H формуються на зернах алітової фази та кальциту. Це свідчить, що дрібні частинки вапняку у цементній системі можуть діяти як затравки для формування первинних продуктів гідратації (рис. 8, б) і таким чином сприяють зростанню міцності на ранній стадії.

Тонкодисперсний вапняк не є інертною добавкою, так як в процесі гідратації портландцементу взаємодіє з трикальцієвим алюмінатом з утворенням гідрокарбоалу-

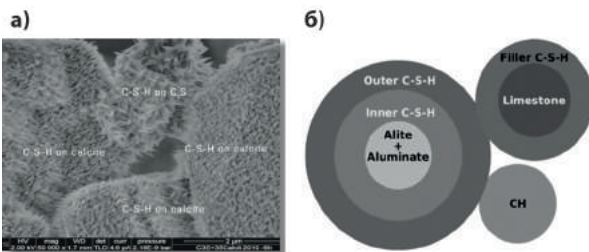
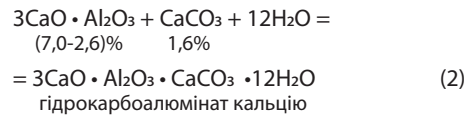
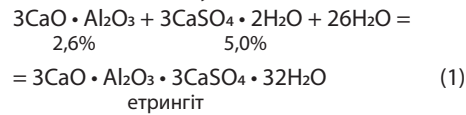


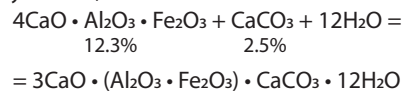
Рис. 8. Мікрофотографія портландцементу з добавкою вапняку, гідратованого 6 год (а) та модель утворення C-S-H-фаз на частинках цементу та вапняку (б) [9]

мінатів кальцію. При цьому має місце утворення переважно низькокарбонатної форми типу $C_3A \cdot CaCO_3 \cdot 12H_2O$, яка відноситься до гексагональних AFm-фаз [10]. Для чистоклінкерного портландцементу СЕМ I на ранній стадії гідратації алюмовмісний мінерал C_3A (7,0 мас.%) вступає у реакцію спочатку з двоводним гіпсом (5,0 мас.%) з утворенням еtringіту, а пізніше з кальцію карбонатом. Реакції їх взаємодії мають наступний вигляд:



Двоводний гіпс відноситься до малорозчинних сполук (розчинність 2,05 г/л), тоді як вапняк практично нерозчинний, тому в ранній період структуроутворення в основному проходить реакція (1). При цьому добавка 5,0 мас.% двоводного гіпсу зв'язує в еtringіт всього 2,6 мас.% C_3A , а решта C_3A гідратується з утворенням метастабільних гідроалюмінатів кальцію C_4AH_{13-19} , які з часом переходять у кубічний гідроалюмінат C_3AH_6 , що супроводжується зростанням пористості цементного каменю на 20-30%.

Слід зазначити, що в присутності тонкодисперсного $CaCO_3$ гексагональні гідроалюмінати кальцію замінюються на більш стабільні моногідрокарбоалюмінати $C_4A \cdot CO_2 \cdot 12H_2O$ (AFm-фази), структуроутворююча роль яких з часом зростає. Групи $[CO_3]^{2-}$ в структурі $C_3A \cdot CaCO_3 \cdot 12H_2O$ упаковані паралельно до шарів $[Ca_2Al(OH)_6]^+$ і стабілізують їх. В той же час, після взаємодії з двоводним гіпсом залишається ще певна кількість (4,4 мас.%) клінкерного мінералу C_3A , при цьому в гексагональні гідрокарбоалюмінати кальцію зв'язується лише 1,6 мас.% $CaCO_3$. Реакції гідратації алюмоферитної фази C_4AF (12,3 мас.%) відбуваються аналогічно C_3A з утворенням гідроалюмоферитів кальцію, а при взаємодії алюмоферитної фази з карбонатом кальцію ще додатково зв'язується 2,5 мас.% $CaCO_3$:



Таблиця 2.

Основні показники портландцементу з вапняком з високою ранньою міцністю СЕМ II/A-LL 42,5R (ПЦ II/A-B-500P-H) ПрАТ «Івано-Франківськцемент» при випробуванні згідно EN 197-1 та ДСТУ Б В.2.7-46

Показник		Вимоги EN 197-1 (ДСТУ Б В.2.7-46)	Значення
Вміст вапняку, %		6-20	12,0
Нормальна густина тіста, %		-	29,0
Терміни тужавлення, хв	початок	≥60	140
	кінець	-	220
Рівномірність зміни об'єму (розширення), мм		≤ 10,0	0
Міцність на стиск, МПа	Рання, 2 доби	≥ 20,0 (20,0)	30,0 (34,0)
	Стандартна, 28 діб	≥ 42,5 ≤ 62,5 (50)	45,6 (52,0)
Середня активність при пропарюванні, МПа згідно ДСТУ Б В.2.7-112		≥ 32,0	40,0
Група ефективності при пропарюванні згідно ДСТУ Б В.2.7-112		-	I
Ознаки хибного тужавіння		немає	немає
Вміст трикальцієвого алюмінату (C3A) в клінкері, %		< 8,0	6,5-7,5

Термокінетичні параметри процесу гідратації портландцементів*

Цемент	Перший екзоефект, мВт/г	Індукційний період, год	Другий (основний) екзоефект		Теплота гідратації, Дж/г, год			
			Момент досягнення, год	величина, мВт/г	24	48	72	96
ПЦ I	31,5	1,6	8,4	4,55	234	289	314	327
ПЦ II/A-B	39,3	1,4	7,0	4,67	232	295	321	328

*- дослідження проведені в калориметричному центрі ХНУБА під керівництвом проф. О.В. Ушєрова-Маршака

Звідси витікає, що згідно стехіометрії вказаних реакцій з утворенням гексагональних AFm-фаз при вмісті 19,3 мас.% мінералів-плавнів може бути задіяно всього 4,1 мас.% тонкодисперсного карбонату кальцію, а решта виступає як мікронаповнювач, що забезпечує «ефект дрібних порошоків».

Таким чином, лише незначна кількість карбонату кальцію (4-5 мас.%) відіграє активну структуроутворюючу роль за рахунок входження в структуру гексагональних AFm-фаз [11]. Тому важливе значення має наявність саме тонкодисперсної фракції вапняку, що стабілізує продукти гідратації трикальцієвого алюмінату з утворенням структурно-активних гексагональних гідрокарбоалюмінатів $C_4A \cdot CO_2 \cdot 12H_2O$, які внаслідок епітаксильних зрощень забезпечують добре внутрішнє зчеплення між складовими цементного каменю. З іншої сторони, крупніша фракція частинок $CaCO_3$ в результаті ефекту «дрібних порошоків» виступає як мікронаповнювач: частинки $CaCO_3$ розсувають зерна тверднучої системи, що при відведенні продуктів гідратації сприяє прискоренню процесів гідратації, ущільненню цементного каменю та зростанню його міцності.

Досвід використання цементів з вапняком у країнах ЄС

Виробник Gorazdze Cement (HeidelBergCement Group, Польща) проводить випуск портландцементу з вапняком типу СЕМ II/A-LL 42,5R [12]. Портландцемент СЕМ II/A-LL класу 42,5 з високою ранньою міцністю (R) за міцністю на стиск не поступає портландцементу СЕМ I цього ж класу міцності 42,5 (рис. 9, а). Через 24 год теплота гідратації для портландцементів СЕМ I 42,5 R і СЕМ II/A-LL 42,5R складає 268 Дж/г. Портландцемент з вапняком СЕМ II/A-LL 42,5R характеризується помірною водопотребою, високою ранньою міцністю, необхідною стандартною міцністю. Результати випробувань бетонів на основі СЕМ II/A-LL 42,5R (350 кг цементу на 1 м³ бетону) свідчать про суттєвий вплив В/Ц на міцність (рис. 9, б).

Виробником Gorazdze Cement рекомендовано застосовувати портландцемент СЕМ II/A-LL 42,5 R для виробництва бетону класів від С16/20 до С50/60, а також високоміцних та самоущільнювальних бетонів; виробництва великогабаритних і малих збірних елементів та бетонуванні в умовах понижених додатних температур. Даний цемент також доцільно використовувати при виготовленні бруківки, мурувальних та штукатурних розчинів. Портландцемент СЕМ II/A-LL 42,5 R може використовуватись для виробництва бетонів різних класів експозиції, а також у дорожньому будівництві.

Еволюцію використання цементів з добавкою вапняку слід розглянути на прикладі ряду європейських країн [13]. Так, в Австрії вже понад 60 років використовуються цементи з добавкою вапняку типу СЕМ II/A для товарного та збірного бетону, а також для торкретування. На даний час також застосовуються портландцементи з більш високим вмістом вапняку: СЕМ II/B-M (S-LL), СЕМ II/B-M (V-LL). Високоякісний портландцемент з вмістом вапняку СЕМ II/A-LL 52,5 R з високою ранньою міцністю є найкращим типом цементу для виробництва збірних залізобетон-

них елементів у Данії (рис. 10, а). Його застосування дозволило скоротити час виробничого циклу при виготовленні збірних залізобетонних елементів.

Цементна промисловість Ірландії ще з 2004 р. випускає портландцементи СЕМ II з добавкою вапняку. Так, при реконструкції порту (рис. 10, б) – хвилеріз, пірс, вантажний причал, естакади, глибоководні причали, плаваючі понтони та супутні послуги – був обраний портландцемент СЕМ II/A-L з огляду на його якість та консистенцію, а також універсальність за рахунок широкого діапазону застосування. Для інших частин причалу використовували залізобетонні блоки, розміщені на масивних бетонних фундаментах. Вибір СЕМ II/A-L дозволив використовувати одноступінчасту дозувальну установку із забезпеченням усіх вимог до бетону.

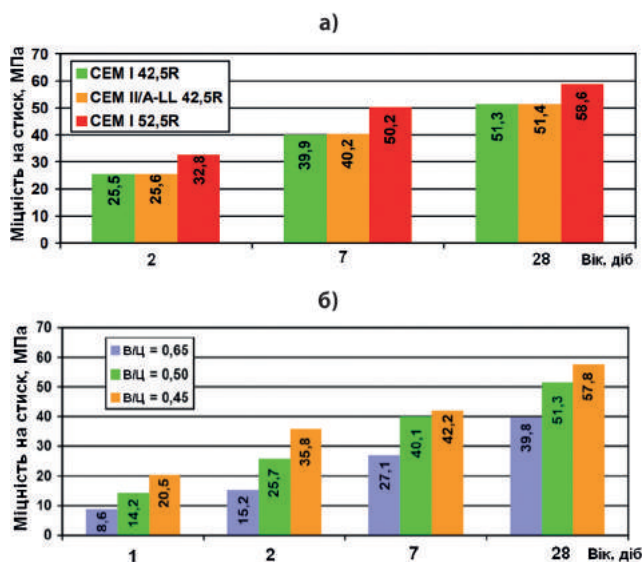


Рис. 9. Порівняльні показники міцності портландцементів (а) та бетонів на основі СЕМ II/A-LL 42,5R залежно від показника В/Ц (б) [12]

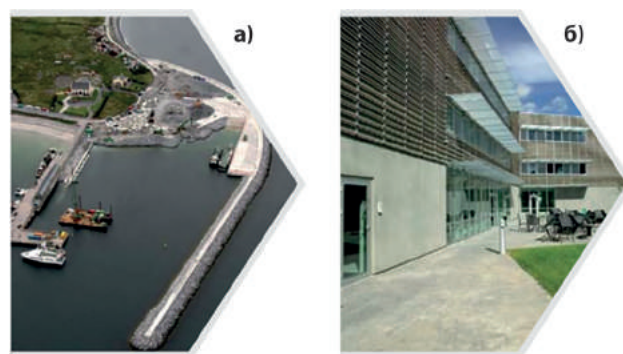


Рис. 10. Використання портландцементу СЕМ II/A-LL для виробництва збірних залізобетонних елементів у Данії (а) та при реконструкції порту в Ірландії (б)

У Німеччині портландцементи з добавкою вапняку CEM II/A-LL використовуються з початку 1980-х років. Для більш ефективного зниження емісії CO₂, німецькі виробники цементу розробили і почали випуск композиційних портландцементів типу CEM II/A-M і CEM II/B-M з добавками S-LL, V-LL відповідно до EN 197-1.

Цементна промисловість Португалії з 2002 р. розпочала виробництво портландцементу CEM II/A-L. Португальські цементні компанії також виготовляють портландцемент з добавкою вапняку CEM II/B-L класу 42,5. Більш широке використання цементів з пониженим клінкер-фактором залишається основною проблемою для цієї країни, оскільки немає наявного ГДШ, а доступність золи-винесення є обмеженою. Це призводить до збільшення промислового використання вапняку, як основної складової в цементі, зокрема білий цемент – CEM II/A-L 52,5 N був використаний для будівництва штаб-квартири Vodafone у місті Порто – основна будівля з білого бетону. Був збудований прототип натурального масштабу для перевірки специфіки білоцементної панелі з CEM II/A-L 52,5 N – колір, текстура, пластичність, дизайн панелі опалубки.

На ринок Швеції в 1999-2000 рр. успішно введено новий тип портландцементу CEM II/A-LL 42,5 R з метою повної заміни портландцементу CEM I 42,5 R, який був стандартним продуктом для будівельних конструкцій. Встановлено, що в умовах холодного клімату та високих темпів будівництва перехід на цемент з меншим вмістом клінкеру може бути успішно впроваджений лише завдяки високим показникам ранньої міцності. Сьогодні CEM II/A-LL 42,5 R є основним цементом для всіх типів будівельних конструкцій Швеції.

На ринку Фінляндії з 2007 р. основними цементами загальнобудівельного призначення є портландцементи типу CEM II/A: CEM II/A-M (S-LL) 42,5 N та CEM II/A-LL 42,5 R, що продукуються в кількості 35–45%. З 2010 р. на ринок впровадили ще портландцемент CEM II/B-M (S-LL), а портландцемент CEM I вже не виготовляється. Для будівництва автомобільного мосту було використано

портландцемент CEM II/B-M(S-LL) 42,5N з метою обмеження максимальної температури в масивній конструкції (близько 2 тис. м³ бетону). Оскільки в районі Турку часто переважають понижені температури, а на дорогах в зимовий період використовується сіль, особлива увага приділялася стійкості бетону до заморожування-відтавання. Тому бетони попередньо перевіряли на корозійну стійкість після заморожування-відтавання.

Висновки

1. В цементній галузі країн Європи найбільш поширеним цементозаміщуючим матеріалом є вапняк, який приймає участь у реакціях гідратації та є активною мінеральною добавкою відносно алюмінатної фази, а також виступає як мікронаповнювач. Внаслідок пониження капілярного ефекту тонкодисперсний вапняк сприяє підвищенню щільності бетону та значному зменшенню висолів на його поверхні. Досвід широкого використання портландцементів з вапняком у країнах ЄС свідчить, що на основі портландцементів з добавкою вапняку можна одержати високоякісні бетони, які характеризуються покращеними фізико-механічними властивостями та більш світлим кольором.
2. На ПрАТ «Івано-Франківськцемент» організовано промисловий випуск портландцементу з вапняком з високою ранньою міцністю ПЦ II/A-B-500P-H (CEM II/A-LL 42,5 R), який має світлий колір, використовується для виготовлення бетонів класів C20/25...C50/60 при виробництві несучих конструкцій усіх видів будівництва, надає гладку поверхню виробам. Ефективність використання портландцементу з високою ранньою міцністю ПЦ II/A-B-500P-H проявляється передусім у підвищенні рухливості бетонних сумішей і зменшенні їх водовідділення, збільшенні ранньої міцності бетону, а також прискореному твердненню в умовах понижених додатних температур.

Література:

1. Концепція низьковуглецевого розвитку в цементній промисловості / М. А. Саницький, Т. П. Кропивницька, Г. С. Іващишин, Б. Г. Русин // Будівельні матеріали та виробі. – 2017. – № 5-6. – С. 10-13.
2. Schneider M. Innovation and technical trends in cement production / M. Schnejder // 20. Internationale Baustofftagung, Weimar. – 2018. – Band 1. – P. 75-80.
3. Scrivener K., John V., Gartner E. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry/ Cement and Concrete Research – 2018 (114). – P. 2-26.
4. Cements with a high limestone content – durability and practicability / Ch. Müller, S. Palm, C.-A. Graubner, T. Proske, S. a.o. / Cement International, 2014. – 12(2). – P. 78-85.
5. Тимашев В.В. Свойства цементов с карбонатными добавками / В.В. Тимашев, В.М. Колбасов // Цемент. – 1981. – № 10. – С. 10-12.
6. Бабич Н. В. Киряева Э. Е. Добавка известняка в цемент. 2012. https://ceprocem.com.ua/dobavka_izvestnjaka_v_cement.
7. Штарк Й. Цемент и известь / Й. Штарк, В. Бернд; пер. с нем. А. Тулаганова под ред. П. Кривенко. – К.: Оранта, 2008. – 480 с.
8. 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 виробі. – 2018. – № 1/2 (97). – С. 34–37.
9. Israel P. Production of CEM II/B cements with optimized properties / D. Israel, P. Boos, T. Neumann, F. Wanzura // Cement International. – 2013. – № 1. – P. 55-60.
10. Саницький М. А. Модифіковані композиційні цементы / М. А. Саницький, Х. С. Соболев, Т. Є. Марків // Львів: Вид-во Львів. політехніки. – 2010. – 132 с.
11. Вплив карбонатних добавок на властивості портландцементу композиційного / Т.П. Кропивницька, М.А. Саницький, І.М. Гев'юк // Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Теорія і практика будівництва. – 2013. – № 755. – С. 214-220.
12. Giergiczny Z. Cement z dodatkiem kamienia wapienego CEM II/A,B-LL – właściwości i możliwości zastosowania w budownictwie / Z. Giergiczny, M. Sokołowski // Budown., Technolog., Architektura, 2008. – № 3. – P. 54-57.
13. Cements for low-carbon Europe – Cembureau. https://cembureau.eu/media/1501/cembureau_cementslowcarboneyurope.pdf