



Круць Т. М.



Гев'юк І. М.



Саницький М. А.



Кропивницька Т. П.

**Круць Т. М., канд. техн. наук,
Гев'юк І. М., нач. лабораторії,
ПАТ «Івано-Франківськцемент», м. Івано-Франківськ,
Саницький М. А., доктор техн. наук, професор,
Кропивницька Т. П., канд. техн. наук, доцент,
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів**

ПРИНЦИПИ СТРАТЕГІЇ СТАЛОГО РОЗВИТКУ В ЦЕМЕНТНІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ

Розглянуто основні принципи стратегії сталого розвитку в цементній промисловості, що передбачають оптимальне використання невідновлюваної природної сировини, застосування ресурсозберігаючих технологій, утилізацію промислових відходів, а також всесторонню охорону довкілля та зниження емісії CO₂. Представлена дорожня карта сектору цементу та бетону в низькоемісійній господарці ЄС до 2050 року. На прикладі ПАТ «Івано-Франківськцемент» показано, що широкомасштабний випуск ефективних композиційних екоцементів забезпечує реалізацію в цементній промисловості прогресивних моделей раціонального використання природної сировини, палива, електричної енергії за мінімальних викидів парникових газів, а також дає змогу втілити в життя практику чистого виробництва.

Розвиток цивілізації, зокрема експансія міст чи розбудова інфраструктури, значною мірою спричиняє негативний вплив на довкілля. Надмірне споживання енергетичних ресурсів призводить до значного збільшення кількості вуглекислого газу в атмосфері, що викликає зміни клімату та загрожує майбутньому людства. При цьому також виникають проблеми утилізації відходів та зниження споживання натуральної сировини. Тому домінантною ідеологією функціонування земної цивілізації у XXI ст. є концепція сталого розвитку [1, 2]. Пріоритетними напрямками, що визначені на Всесвітньому саміті сталого розвитку, є інтеграція трьох його компонентів: економічного зростання, соціального розвитку та охорони навколишнього природного середовища.

На сучасному етапі надзвичайно гостро стоїть завдання впровадження засад сталого розвитку в секторі будівництва, особливо промисловості будівельних матеріалів. Це передбачає створення технічних передумов, що становлять основу для розроблення та впровадження дієвих заходів покращення енергетичної ефективності будівельних технологій згідно з вимогами до охорони довкілля із врахуванням особливостей повного циклу життя виробів та об'єктів. Основні принципи стратегії сталого розвитку в цементній промисловості передбачають оптимальне використання невідновлюваної природної сировини; застосування ресурсозберігаючих технологій; утилізацію промислових відходів, а також всесторонню охорону довкілля і зниження емісії CO₂ [3-6].

Сьогодні портландцемент залишається ключовим матеріалом, що широко застосовується в будівництві. Провідні цементні компанії всього світу виробляють понад 4 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. Швидке зростання потреб у цементній продукції відбувається в основному в нових індустріальних країнах. Так, виробництво цементу в Китаї за

останні 20 років збільшилось у 7 разів – у 2005 році складало 1,038 млрд. т, а до 2013 року зросло майже в 2 рази і становило 2,3 млрд. т (58,6%). Для промислово розвинених країн, таких як США і Японія, спостерігається незначне зменшення виробництва, проте вони все ще мають значну частку в світовому виробництві цементу – відповідно 1,9% і 1,5% (рис. 1). Виробництво цементу в Азії та Африці у 2008 році складало 170-180 млн. т, а в 2013 році збільшилось у 2,2-2,3 рази. Продукція цементу в країнах ЄС, що входять до ЦЕМБЮРО, досягнула 232,9 млн. т і складала всього 5,8%.

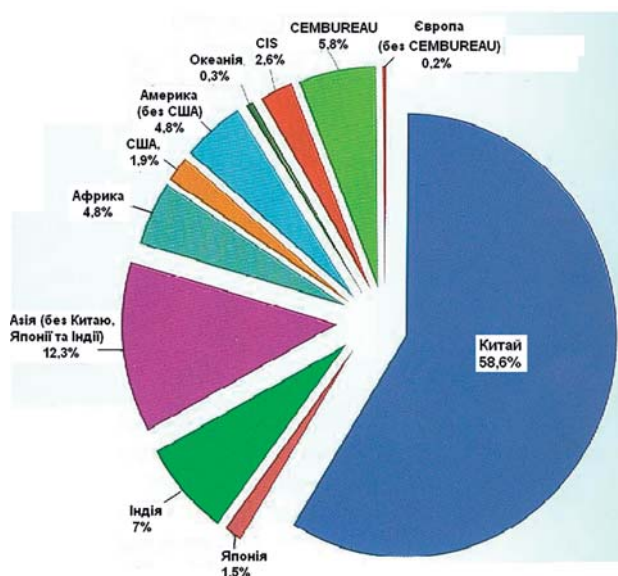


Рис.1. Світове виробництво цементу в 2013 році
[CEMBUREAU, Activity Report 2013]

У документі Цембюро про роль цементу та бетону в низькоемісійній господарці Європи до 2050 року [7] розглядається перспектива сектору, згідно з якою вуглецевий слід від цементної промисловості може бути скорочений на 32% порівняно з рівнем 1990 року, в основному за рахунок використання традиційних засобів. У цьому ж документі також описані потенціальні важелі, які уможливають додаткове зниження емісії за рахунок застосування нових технологій, таких як уловлювання та зберігання CO₂ (CCS – carbon capture and storage). Впровадження інноваційних технологій та встановлення сучасного обладнання для уловлювання і зберігання вуглецю забезпечить зниження емісії CO₂ навіть до 80%. У дорожній карті сектору цементу та бетону до 2050 року передбачається 5 паралельних шляхів, кожен з яких може спричинитись до скорочення викидів CO₂. При цьому промисловість будівельних матеріалів має бути зосереджена на п'яти напрямках для досягнення цих цілей, три з яких перебувають «під контролем сектора». Потенціал скорочення емісії від двох інших напрямків, пов'язаних з ефективністю продуктів та ефектів від подальших елементів ланцюга постачання (Product Efficiency і Downstream) не відноситься безпосередньо до виробництва цементу, проте дослідження нових способів впливу на створення низькоемісійної господарки із замкнутим циклом обігу через використання цементу та бетону сприяє її інноваційності. Особливо це стосується тих випадків, коли емісію протягом цілого циклу життя будинків та будівель можна суттєво скоротити завдяки «розумному» застосуванню бетону.

Одним із основних документів ЄС, котрий визначає закон довкілля за вимогами щодо зниження емісії та покращення стану навколишнього середовища, є Директива IPPC щодо використання «Найкращих доступних технологій» (Best Available Techniques – BAT) в окремих галузях промисловості. При виробництві цементів передбачається виконання наступних вимог: використання «маловідходних» технологій; перероблення відходів; забезпечення технологічних переваг і поглиблення наукових підходів; визначення природи та об'ємів викидів; визначення часу для впровадження BAT; впровадження процесу енергоефективності [8].

Як показує досвід роботи цементних заводів країн ЄС, значне покращення екологічної ситуації досягається за рахунок енергетичного використання паливних відходів як джерел альтернативного палива (побутове сміття, відходи переробки нафти, відпрацьовані мастила, автомобільні шини та ін.) в обортових печах цементної промисловості. Цементні заводи країн ЄС використовують 30-40 %, а деякі – до 70 % альтернативного палива для випалу портландцементного клінкеру.

При цьому цементна обортова піч є найбільш придатним, з точки зору екологічної безпеки, тепловим агрегатом для спалювання паливних відходів. Висока температура факелу горіння 1700...1900°C (в печах заводів для спалювання побутового сміття температура складає 700...1000°C), засвоєння золи палива мінералами клінкеру та інші чинники дозволяють звести до мінімуму забруднення довкілля діоксинами, фуранами та важкими металами [9-11]. Термічна утилізація відходів у обортових цементних печах вирішує одночасно проблеми їх ліквідації та зниження собівартості виробництва портландцементного клінкеру. Енергетичне використання горючих відходів призводить до значної консервації викопного палива, при цьому емісія газів зменшується на 20-30%.

Згідно з документом Цембюро [7], при виробництві цементу в 2050 році, вміст клінкеру в середньому буде складати 70%. При цьому одержання нових цементів (для яких викиди CO₂ зменшаться на 50 % порівняно зі звичай-

ними портландцементами) може скласти 5% від загального обсягу виробництва цементу.

В Україні згідно з ДСТУ Б В.2.7-46:2010 «Цементи загальнобудівельного призначення» можливе виробництво широкої гами портландцементів, які містять в своєму складі крім клінкеру ще активні мінеральні добавки та регулятор термінів тужавіння (двоводний гіпс). Цементи загальнобудівельного призначення згідно з ДСТУ Б В.2.7-46:2010 поділяються на п'ять типів: ПЦ I – портландцемент; ПЦ II – портландцемент з добавками; ШПЦ III – шлакопортландцемент; ПЦЦ IV – пуцолановий цемент; КЦ V – композиційний цемент. Портландцемент ПЦ I може містити до 5 % мінеральних добавок. Вміст мінеральних добавок у цементах від ПЦ II до КЦ V може змінюватися у широкому діапазоні – від 6 до 80 мас.%. У стандарті на цементи загальнобудівельного призначення та в європейському стандарті EN 197 виділені як окремий тип композиційні цементи, які згідно з вимогами повинні містити не менше двох видів мінеральних добавок різної природи активності (гідралічної та пуцоланічної дії) [12, 13].

Вирішення проблеми енергозбереження в цементній промисловості в значній мірі визначається пошуком структурно-логічних та екологічних шляхів заміни частини портландцементного клінкеру вторинними компонентами з оптимізацією гранулометричного та речовинного складів цементів. Однією з основних тенденцій світової цементної промисловості є розроблення малоенерговмісних цементів. З метою заощадження паливно-енергетичних ресурсів у розвинутих країнах постійно збільшується частка багатоконпонентних цементів, використання яких дозволяє не тільки економити паливо та енергію (на 30...40%) при виробництві цементу, але й збільшити обсяг випуску бетону на цьому в'язучому.

Розвиток сучасних будівельних технологій у всіх технічно розвинених країнах спрямований на розроблення ефективних матеріалів, використання яких є економічно доцільним, дає змогу скоротити енергетичні затрати та витрату сировинних ресурсів. На сучасному етапі розвитку будівництва для забезпечення потреб ринку також виникає гостра необхідність підвищення якості бетонів та розширення їх функціонального призначення, що досягається в разі проектування їх складу як композиційних матеріалів, які відрізняються складністю структури, кількістю та характером компонентів, особливостями міжфазової поверхні, формування якої визначається проявленням адитивних або синергетичних ефектів і має безпосередній вплив на експлуатаційні властивості матеріалу.

Впровадження засад сталого розвитку для раціонального використання матеріальних і енергетичних ресурсів із зменшенням негативного впливу на навколишнє середовище в будівництві забезпечується за рахунок розроблення нового підходу, який ґрунтується на принципах композиційної побудови мультимодальних малоенерговмісних цементів з необхідними будівельно-технічними властивостями, що включає аналіз їх речовинного складу та вмісту основних оксидів з одночасним використанням комплексних модифікаторів [14].

Ефективність і відповідність світовому рівню в'язучих речовин забезпечується випуском, з однієї сторони, низькоенерговмісних клінкерів, а з іншої – введенням доповнюючих цементуючих матеріалів (Supplementary Cementitious Materials – SCM) з максимальним ступенем утилізації відходів металургії та теплоенергетики, представлених шлаками і золами. Принципово нові прогресивні технології виготовлення цементів і використання сучасного обладнання забезпечують випуск високотех-

нологічної продукції з урахуванням як зменшення енергоємності їх виробництва, так і зниження ступеня забруднення навколишнього середовища.

Значні резерви зниження енергоємності в'язучих на основі алітових портландцементних клінкерів забезпечує перехід до екоцементів, що характеризуються підвищеним вмістом активних мінеральних добавок гідралічної (доменний гранульований шлак) та пуцоланічної (зола винесення, цеоліт) дії. На більшості цементних заводів України в якості активної мінеральної добавки використовується доменний гранульований шлак (ДГШ). Разом з тим, із збільшенням вмісту ДГШ погіршується розмелювальна здатність цементів. Щільна склоподібна структура і, як наслідок, підвищена абразивність доменного гранульованого шлаку вимагає додаткових витрат електроенергії на помел шлаковмісних цементів для забезпечення марочної міцності. Тому на відміну від портландцементів з добавкою доменного гранульованого шлаку (тип ПЦ ІІ/Б-Ш у середньому потребує 77% від загальної витрати первинної енергії, необхідної для виробництва портландцементу ПЦ І тієї ж марки) та шлакопортландцементу ШПЦ ІІІ/А (потребує 64% первинної енергії), композиційні портландцементи типу ПЦ ІІ/А-К та ПЦ ІІ/Б-К характеризуються меншою енергоємністю.

Лідером у цементній галузі України є ПАТ «Івано-Франківськцемент» (рис. 2), що широко впроваджує найбільш сучасне обладнання та новітні технології. Завод укомплектований високотехнологічним обладнанням провідних фірм ЄС, провів реконструкцію обертової печі мокрого способу 3,6х64 м для сушіння природних (вапняк, цеоліт, пісок) і техногенних (гранульований доменний шлак та ін.) матеріалів відхідними газами печі сухого способу при випалі портландцементного клінкеру, що забезпечує можливість виробництва ефективних цементів при сумісному та роздільному помелі портландцементного клінкеру і додаткових цементуючих матеріалів у млинах з сучасними сепараторами.

Введення природних цеолітів та карбонатних добавок разом з ДГШ до портландцементів ІІ типу дозволяє підвищити активність за рахунок оптимізації гранулометричного складу одержаного портландцементу композиційного, а також покращити технологічні та фізико-механічні властивості будівельних розчинів і бетонів на основі такого в'язучого. Введення в процесі помелу додатково цеоліту до портландцементного клінкеру з доменним гранульованим шлаком дозволяє покращити на 12 % розмелоздатність в'язучого, при цьому добавка вапняку дозволяє підвищити активність композиційних портландцементів за рахунок оптимізації їх гранулометричного складу із забезпеченням більш широкого діапазону розподілу зерен за фракціями і тим самим зменшення об'єму порожнеч між зернами клінкеру.

Характерно, що для портландцементу ПЦ ІІ/А-П-400 ($S_{\text{плт}} = 4100 \text{ см}^2/\text{г}$) спостерігається зростання водопотреби на 10–15% (табл. 1), при цьому об'ємний коефіцієнт водовідділення зменшується в 1,17 рази і складає 16%. Для композиційного портландцементу ПЦ ІІ/Б-К(Ш-П-В)-400 ($S_{\text{плт}} = 4000 \text{ см}^2/\text{г}$) НГТ=29,8%, терміни тужавіння становлять: початок – 2 год 20 хв, кінець – 3 год 30 хв. Оптимальний вміст високодисперсних добавок цеоліту і вапняку забезпечує одержання ПЦ ІІ/Б-К(Ш-П-В)-400 з підвищеною



Рис. 2. ПАТ «Івано-Франківськцемент» після реконструкції

міцністю у ранньому віці ($R_{\text{кр}2}=25,6 \text{ МПа}$). При цьому його міцність перевищує марочну міцність ПЦ ІІ/Б-Ш-400 та не поступається марочній міцності ПЦ ІІ/А-Ш-400. При випробуванні згідно EN 196 композиційний портландцемент відповідає класу СЕМ ІІ/В-М 32,5R, для якого границя міцності на тиск через 2 та 28 діб складає відповідно 19,5 та 41,8 МПа.

Композиційні цементні типів ПЦ ІІ/Б-К та КЦ V/A з тонкодисперсними мінеральними добавками доменного гранульованого шлаку, природного цеоліту та вапняку характеризуються зниженням виробничих затрат та підвищеною екологічністю. Як видно з табл. 1, зменшення вмісту клінкерної складової в цементах ПЦ ІІ/Б-К і КЦ V/A забезпечує зниження кількості викидів CO_2 відповідно в 1,46 і 2,37 рази. Тому їх можна віднести до композиційних екоцементів.

Синергічне поєднання активних мінеральних добавок різних груп: гідралічної (доменний гранульований шлак) і пуцоланічної (цеоліт) дії

Фізико-механічні властивості цементів ПАТ «Івано-Франківськцемент»
(ДСТУ Б В.2.7-46:2010) та емісія CO₂ при їх виробництві

Цемент	S _{питт} , см ² /г	НГТ, %	Терміни тужавіння, хв		Границя міцності на стиск, у віці, діб, МПа			Емісія CO ₂ , кг/т цементу
			поч	кін	2	7	28	
ПЦ І -500	3420	29,2	140	190	32,8	40,4	51,0	864,5
ПЦ ІІ/А-Ш-500	3480	29,9	150	200	31,4	39,9	50,6	819,0
ПЦ ІІ/А-Ш-400	3480	28,5	160	210	24,9	34,9	42,6	728,0
ПЦ ІІ/А-П-400	4100	31,5	130	200	25,7	35,2	43,5	728,0
ПЦ ІІ/Б-Ш-400	3360	28,0	160	220	21,8	34,1	40,7	591,5
ПЦ ІІ/Б-К-400	4000	29,8	140	210	25,6	34,4	42,6	591,5
ШПЦ ІІІ/А-400	3500	29,0	180	250	18,1	30,8	40,6	318,5
КЦ V/A-400	4050	30,0	140	230	22,6	34,0	41,8	364,0

та тонкодисперсного вапняку як мікронаповнювача – при суттєвому зменшенні вмісту високоенергоємної клінкерної складової в композиційних цементах ПЦ ІІ/Б-К-400 та КЦ V/A-400 дозволяє покращити реологічні характеристики і забезпечує прискорення кінетики набору міцності в'язучого та бетонів багатофункціонального призначення на їх основі за рахунок раціонального проектування щільної цементуючої матриці, що забезпечує підвищення довговічності бетонів, а особливо при експлуатації в умовах агресивного сульфатного середовища. При цьому тонкодисперсний вапняк не є інертним наповнювачем, а в процесі гідратації клінкерної складової стабілізує продукти гідратації трикальцієвого алюмінату з утворенням гексагональних гідрокарбоалюмінатів C₄A·CO₂·12H₂O [15].

Портландцемент ПЦ ІІ/Б-К-400 використовується для виготовлення бетонів класів С 8/10...С 32/40, виробництва несучих конструкцій усіх видів будівництва та для виготовлення будівельних розчинів. Композиційні цемента можна також застосовувати для виготовлення важких бетонів для підземного будівництва, спеціальних фундаментів, ін'єкційних розчинів для заповнення ка-

бельних порожнин, ущільнення підземних стін, сухих будівельних сумішей та ін.

Таким чином, на основі принципів сталого (стійкого, збалансованого) розвитку, що базуються на поєднанні «енергія х екологія х економія» (символ е³), створюється можливість моделювання різних напрямків керованого розвитку, з високою точністю прогнозувати їх результати та вибирати найбільш оптимальний. У цементній промисловості принципи стратегії сталого розвитку зводяться до мінімізації споживання енергії та сировини в процесі одержання портландцементного клінкеру, а також мінімізації впливу на навколишнє природне середовище. Розроблення малоенерговмісних композиційних цементів із частковою заміною традиційного портландцементного клінкеру додатковими цементуючими матеріалами із синергічним поєднанням добавок гідралічної, пуцоланічної дії та мікронаповнювачів, що характеризуються пониженням споживання енергії та відповідають вимогам сучасної будівельної індустрії, а також охорони навколишнього середовища (зниження викидів CO₂ до атмосфери) – є одним з основних аспектів збалансованого розвитку в будівництві.

Література:

1. Zrównoważone budownictwo. Seria Dokumenty Unii Europejskiej dotyczące budownictwa. – Warszawa: ITB, 2010.
2. Проблеми сталого розвитку в будівництві / М.А. Саницький, Б.В. Федунь, Л.В. Жук, Ю.Б. Федунь // Вісник НУ «Львівська політехніка» «Теорія і практика будівництва». – 2012. – №742 – С. 184-191.
3. Sustainable cement production-present and future / M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, H. Bolio // Cement and Concrete Research. – 2011. – V. 41. – P. 642-650.
4. Gardeik H.O. Sustainability and cement manufacture / Process Technology of Cement Manufacturing / VDZ Congress 2002. – Dusseldorf, 2003. – P. 472-478.
5. Фонта Ф. Устойчивое развитие и цемент – как справиться с возникающими проблемами / Цемент и его применение. – 2014. – №5. – С. 56-60.
6. Schnejder M. Technology developments in the cement industry / Cement International. – 2015. – №1. – P. 2-12.
7. The role of cement in the 2050 low carbon economy. <http://www.cembureau.eu>
8. Kavalerova E.S. Alkali-activated cement production and «best available techniques» / 17. Ibausil. Internationale Baustofftagung. – Weimar, 2009. – Band 1. – P. 0469-0475.
9. Cembureau. Sustainable cement production. Co-processing of alternative fuels and raw materials in the

European cement industry, 2009. (<http://www.cembureau.be>).

10. Круць Т.М. Енергетичне використання вторинних паливних матеріалів при випалі портландцементного клінкеру / Вісник Національного університету «Львівська політехніка». «Хімія, технологія речовин та їх застосування». – Львів, 2009. – № 644 – С. 232-236.
11. Саницький М.А., Хруник С.Я., Чернер К. Екологічні аспекти співпалювання альтернативного палива в обортових печах / Будівельні матеріали та вироб. – 2011. – №1. – С. 2-7.

12. Саницький М.А., Соболев Х.С., Марків Т.Є. Модифіковані композиційні цемента: навч. посібник – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. – 132 с.
13. Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonow nowej generacji / Z. Giergiczny, J. Malolepszy, J. Szabowski, J. Sliwinski // Opole, 2002. – 174 p.

14. Sustainable Green Engineered Composites Containing Ultrafine Supplementary Cementitious Materials / M. Sanytsky, T. Kruts, T. Kropyvnytska, B. Rusyn // 14th International congress on the Chemistry of Cement. Beijing China, 13-16 October, Vol. 1. 2015. – P. 265-271.

15. Production engineering and properties of multi-modal Portland cements containing limestone meal / T. Kropyvnytska, R. Kotiv, T. Kruts, I. Geviuk // 19. Ibausil. Bauhaus-Universität Weimar, 2015. – Band 2. – P. 423-430.