



fot. Archiwum

Beton a środowisko naturalne

Przyjaźń, niekiedy „szorstka”, nowożytnego betonu i środowiska naturalnego trwa ponad 150 lat i nic nie wskazuje, aby to „kochające się małżeństwo z rozsądku” miało zakończyć swój związek.

Układ dwuskładnikowy czy triada?

Omówienie relacji między środowiskiem naturalnym a betonem wymaga zdefiniowania obu pojęć. O ile definicja betonu nie stwarza nadmiernych trudności, to precyzyjne określenie, co jest środowiskiem naturalnym, a co nim nie jest, wcale nie jest już takie łatwe. Odwołanie się do Ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 – *Prawo ochrony środowiska*, według której środowisko należy rozumieć jako „ogół elementów przyrodniczych, w tym także przekształconych w wyniku działalności człowieka, a w szczególności powierzchnię ziemi, kopalinę, wody, powietrze, krajobraz, klimat oraz pozostałe elementy różnorodności biologicznej, a także wzajemne oddziaływania pomiędzy tymi elementami”, tylko w części rozwiązuje problem.

W przytoczonej definicji użyto formy dokonanej („... przekształconych w wyniku działalności człowieka...”). Takie określenie można rozumieć jako wskazanie pewnej cezury czasowej. Nie wydaje się, aby środowisko naturalne można traktować jako swoistego rodzaju byt, który od pewnego czasu istnieje w niezmiennej postaci. Środowisko naturalne zawsze ulegało i nadal ulega zmianom, w tym również samoistnym, o których tak naprawdę niewiele wiadomo, gdyż człowiek stanowi bardzo młody element omawianego układu. Nie definiujemy zatem środowiska nazbyt precyzyjnie, lecz przyjmijmy, że „środowisko naturalne, jakie jest, każdy widzi” i przejdźmy do rozważań o betonie.

Nowożytny beton stanowi materiał, do wytworzenia którego jest niezbędny cement, przede wszystkim cement portlandzki. Odpowiednią datą, od której można rozpocząć rozważania na temat wzajemnych relacji betonu i środowiska naturalnego,

jest 21 października 1824 roku, dzień, w którym Joseph Aspdin z Leeds zgłosił patent opisujący sposób wytwarzania cementu portlandzkiego, rozpoczynając tym samym kohabitację środowiska naturalnego z betonem. W tym czasie w Anglii trwała rewolucja przemysłowa i pełną parą, również w dosłownym tego słowa znaczeniu, rozwijała się industrializacja. Słowo ekologia miało się pojawić dopiero za lat czterdzieści, a światła części społeczeństwa nie myślała bynajmniej o ochronie środowiska naturalnego (taki termin nie istniał), lecz o walce z przyrodą. W polityce, i nie tylko, obowiązywała maksyma: „Niech zdobywa ten, kto ma siłę, niech utrzymuje się ten, kto zdola”. Wszyscy byli po stronie silniejszego. Aż trudno uwierzyć, że bardzo szybko doszło do „kolizji środowiskowej” z betonem w tle. Otóż Aspdin został ukarany za „nadmierne kurzenie”. Chodziło, co prawda, o produkcję cementu, ale tenże cement był nieodzowny do wytwarzania betonów.

Cóż w tym czasie działo się w Polsce? Trudne pytanie. Polski, jako państwo, po prostu nie było, nie istniało również wtedy w języku polskim słowo beton, który to termin miał wprowadzić do naszego języka kilka lat później Feliks Pancer, wspaniały człowiek i znakomity inżynier, współtwórca „cementu augustowskiego”. Prawdziwy polski cement portlandzki pojawił się jednak dopiero w 1857 roku za sprawą Jana Ciechanowskiego. Od tego też roku, również w Polsce, można mówić o kohabitacji środowiska naturalnego i betonu.

Przyjaźń, niekiedy „szorstka”, nowożytnego betonu i środowiska naturalnego trwa zatem już ponad 150 lat i nic nie wskazuje, aby to „kochające się małżeństwo z rozsądku” miało zakończyć swój związek. Wzajemne relacje środowiska i betonu mają wiele odsłon i różnie zapisanych kart, które w zależności od emocjonalnego stosunku obserwatora, a także uprawianej przez niego profesji, można opisać w zgoła odmienny sposób i zilustrować wieloma spektakularnymi przykładami piękna

lub brzydoty oraz funkcjonalności konstrukcji betonowych lub ich braku. Emocje nie sprzyjają jednak rzetelnym ocenom czegokolwiek. Dokonywane w takim stanie ducha opisy i wypowiedzane sądy są niemal zawsze nieobiektywne, a „czucie i wiara” znaczy więcej w ich formowaniu niż „mędrca szkiełko i oko”. Przyjrzyjmy się zatem układowi beton – środowisko, a raczej triadzie człowiek – środowisko – beton chłodnym okiem obserwatora żyjącego na początku XXI wieku, bez zbędnych emocji i bez nadmiernej pewności co do trafności swoich osądów, zdając sobie równocześnie sprawę, że żaden ze składników wspomnianej triady nie jest elementem o cechach niezmiennych w czasie.

Kończąc rozważania historyczne, warto może jeszcze wspomnieć, że przekształcenie środowiska naturalnego przez człowieka rozpoczęło się właściwie wraz z początkiem osiadłego trybu życia ludzi i trwa nieprzerwanie do dnia dzisiejszego. Jest ciągiem zdarzeń i zmian określanych jeszcze nie tak dawno mianem „ujarzmienia przyrody”. Wyrażenie to brzmi obecnie niemal jak bluźnierstwo, ale to przecież w imię takich właśnie haseł, nucąc pieśń: „Budujemy nowy dom, betonowy nowy dom...”, wznoszono nie tyle domy, co olbrzymie zapory, zwracano biegi rzek oraz budowano śluzy i kanały, zużywając do tych celów ogromne masy betonu oraz niemiłosiernie dewastując otoczenie i niszcząc całe ekosystemy. Już w owym czasie istniały jednak kontrowersje co do celowości takich działań, a dobitnym ich przykładem były między innymi spory wokół budowy Wielkiej Tamy Asuańskiej. W owej walce z naturą, używając wojennej retoryki, straty ponosiło zarówno środowisko naturalne, jak i ludzie, o czym dobitnie świadczą dramaty towarzyszące np. budowie Kanału Panamskiego. Na polach bitew, niezależnie od ich wyników, pozostawał natomiast niezmiennie beton, niemy i długowieczny świadek zmagania, również tych międzyludzkich (bunkry w okolicach Wizny, umocnienia Wału Pomorskiego).

Beton

Współczesny beton jest kompozytem, wytwarzanym z trzech podstawowych składników: cementu, kruszywa oraz wody. W skład betonu wchodzi zazwyczaj również mineralne dodatki aktywne, dodatki inertne oraz domieszki chemiczne, w wielu przypadkach także zbrojenie rozproszone. Spełniająca określone wymagania woda oraz część lub całość kruszywa używane są do produkcji betonu w stanie naturalnym. Pozostałe składniki betonu (cement, domieszki chemiczne, zbrojenie) są produktami różnych gałęzi przemysłu lub, co należy szczególnie podkreślić, stanowią odpady przemysłowe (popioły lotne, pyły krzemionkowe, żużle hutnicze).

Na dużą skalę odpady przemysłowe wykorzystywane są również jako składniki namiaru surowcowego, z którego produkowany jest klinkier portlandzki. Stanowią też składniki cementów powszechnego użytku *per se* (popioły lotne, granulowane żużle wielkopieczowe, desulfogipsy). Mogą być użyte także do produkcji kruszyw. Odpady palne stanowią liczące się źródło energii w przemyśle cementowym (paliwa alternatywne). Powszechne wykorzystanie odpadów w procesach wytwarzania ce-

mentów i produkcji betonów w sposób oczywisty poprawia relacje produkt – środowisko, nadając takim rozwiązaniom problemów surowcowych cechy działań proekologicznych, które należy wziąć pod uwagę przy ocenie wpływu cementu i betonu na środowisko naturalne.

Omawiając relacje beton – środowisko naturalne, niezbyt często rozróżnia się bezpośredni wpływ betonu jako tworzywa budowlanego i oddziaływanie na środowisko konstrukcji wykonanych z betonu, a są to dwie różne rzeczy. Jeżeli konstrukcje betonowe, tak pięknie nazywane „przestrznią zakłęta w betonie”, zostaną źle zaprojektowane i niedbale wykonane, mogą być nie tylko obce dla środowiska i bardzo głęboko ingerować w funkcjonowanie lokalnych ekosystemów, ale wręcz stanowić gwałt na naturze i klócić się z poczuciem estetyki. Na ten ostatni temat szczególnie dużo mogliby powiedzieć konserwatorzy zabytków, załamujący ręce nad nie do końca przemyślanymi „betonowymi renowacjami” niektórych budowli. Nie jest to jednak wina betonu, który stanowi przecież tylko tworzywo, poddające się woli projektanta i wykonawcy. Jeżeli beton potraktujemy jako produkt finalny, a jego składniki jako surowce wyjściowe, których wpływ na środowisko rozpatrzony zostanie oddzielnie, to „ślad” betonu *per se* w środowisku naturalnym, poza zużyciem określonych ilości surowców naturalnych (woda, kruszywo), będzie stosunkowo niewielki. Złożą się na niego relatywnie niskie wydatki energii związane z transportem surowców i mieszanki betonowej, przygotowania mieszanki betonowej i układania betonu, a w przypadku prefabrykatów betonowych również energia zużyta do ich naparzenia i transportu. Przy zachowaniu odpowiednich standardów, woda z mycia urządzeń w węzłach betoniarskich zostanie odpowiednio zagospodarowana i nie będzie stanowiła zagrożenia dla środowiska. Nie da się uniknąć wprowadzenia do ekosystemu pewnej ilości energii, co wynika z egzotermicznego charakteru reakcji cementu z wodą. Nie są to jednak nadmiernie duże ilości, gdyż ciepło hydratacji cementów powszechnego użytku nie przekracza z reguły 350 J/g. Nie uda się również całkowicie wyeliminować hałasu związanego z pracą urządzeń i przemieszczaniem się materiałów oraz zagęszczaniem betonów. Możliwe jest natomiast ograniczenie hałasu na placu budowy poprzez zastosowanie betonu samozagęszczalnego.

Beton nazywany jest często sztucznym kamieniem, a niekiedy także „skąfą natychmiastową”. Obydwie



foto: Archiwum

te nazwy w znacznej mierze wskazują, jaki charakter przyjmują relacje między środowiskiem naturalnym a betonem. W rezultacie zmieszania składników betonu zainicjowane zostały reakcje chemiczne i przemiany, prowadzące do utworzenia zwarzonego materiału, w którym ziarna kruszywa są zespolone produktami hydratacji cementu, głównie uwodnionymi krzemianami wapnia (C-S-H). Patrząc na konsekwencje tego procesu z punktu widzenia środowiska, można powiedzieć, że utworzony został nowy rodzaj skały. Problemem staje się rola tej skały w środowisku naturalnym.

Przyjrzyjmy się zatem betonowi jeszcze raz. Składniki kruszywa są bez wątpienia częścią środowiska naturalnego, i nigdy nie budziły obaw, gdyż stanowią pospolite minerały, występujące w skorupie ziemskiej w bardzo dużych ilościach. Zaczyn cementowy to głównie uwodnione krzemiany wapnia i wodorotlenek wapnia. W przyrodzie krzemiany te występują bardzo rzadko, gdyż ich utworzenie wymaga specyficznych warunków, są jednak obecne, i nie ma powodów, aby nie były traktowane jako „pełnoprawny” składnik środowiska naturalnego. Pozostaje zatem wodorotlenek wapnia, który w formie, w jakiej występuje w betonie, nie tylko nie stanowi zagrożenia dla środowiska naturalnego, ale ze względu na swój alkaliczny charakter jest swoistego rodzaju wianem, jakie beton wnosi do kohabitacji ze środowiskiem naturalnym.

Kontakt betonu z powietrzem powoduje przejście występującego w betonie wodorotlenku wapnia w węglan wapnia. Karbonatyzacji ulegają przypowierzchniowe warstwy betonu, a produktem reakcji jest kalcyt, pospolity minerał występujący w skałach osadowych. Element betonowy może być zatem traktowany jako bryła, której warstwy przypowierzchniowe o narastającej w miarę upływu czasu grubości są wzbogacone w węglan wapnia. W jądrze takiej bryły, o silnie alkalicznym charakterze (pH około 12,8), wśród produktów hydratacji cementu dominują natomiast uwodnione krzemiany wapnia i wodorotlenek wapnia. Materiał taki nie tylko nie stanowi zagrożenia dla środowiska, lecz wręcz przeciwnie, odgrywa pozytywną rolę, gdyż wiąże pewną ilość dwutlenku węgla z powietrza, zmniejszając „śląd węglowy” betonu. Coraz ważniejszym elementem relacji środowisko naturalne – beton staje się recykling betonu użytkowanego w wyniku rozbiórki zużytych konstrukcji betonowych.

Kolejnym pozytywem betonu jest możliwość związania w betonie szeregu odpadów przemysłowych, które w przeciwnym razie byłyby deponowane, powodując dewastację środowiska naturalnego. Spośród odpadów przemysłowych wykorzystywanych w produkcji betonu wymienić należy przede

wszystkim popioły lotne wychwytywane z gazów odlotowych w elektrowniach i elektrociepłowniach oraz pyły krzemionkowe, stanowiące odpad w hutach produkujących metaliczny krzem i stopy żelazokrzemu.

Zaletą betonów jest również to, że produkty hydratacji cementu wykazują bardzo duże zdolności imobilizacji metali ciężkich, które w śladowych ilościach znajdują się np. w popiele lotnym, uniemożliwiając ich „przejście” do środowiska.

Cement w betonie

W rozważaniach dotyczących betonu nie można pominąć relacji zaznaczających się między surowcami użytymi do wytworzenia betonu a środowiskiem naturalnym. Uwaga dotyczy zwłaszcza układu cement – środowisko, gdyż ta składowa w decydujący sposób rzutuje na całkowity śląd węglowy betonu, traktowanego jako produkt końcowy. Śląd węglowy stanowi miarę emisji antropogenicznego dwutlenku węgla do atmosfery, powstałego podczas całego cyklu wytwarzania określonego produktu, z uwzględnieniem emisji związanej z wytworzeniem wszystkich półproduktów oraz pozyskaniem surowców, wyrażoną w masie emitowanego dwutlenku węgla na jednostkę masy produktu. Ponieważ beton nie wydziela żadnych substancji szkodliwych, a jego relacje ze środowiskiem naturalnym są takie, jak przedstawiono wyżej, śląd węglowy w sposób zadowalający spełnia rolę miernika jego oddziaływania na środowisko w sensie globalnym. Głównym „udziałowcem” w ślądzie węglowym betonu jest cement.

Paradoks, dobrze widoczny na przykładzie Polski, polega na tym, że olbrzymi postęp techniczny, jaki zaznaczył się w przemyśle cementowym, i wysiłek włożony w ograniczenie uciążliwości tego przemysłu dla środowiska, nie uchroniły od wyznaczonej mu roli „chłopca do bicia”, gdy okazało się, że emisja dwutlenku węgla do atmosfery jest rzeczywistą, chociaż inni twierdzą, że jedynie domniemaną przyczyną globalnego ocieplenia.

Śląd węglowy cementu, a ściślej rzecz ujmując klinkieru portlandzkiego, jest bardzo duży. Omówmy tylko dwie jego składowe. Podstawowym surowcem używanym do wytwarzania klinkieru portlandzkiego jest wapień. Wapień to przede wszystkim CaCO_3 . Rozkład termiczny 1 tony CaCO_3 to 440 kg dwutlenku węgla, do którego należy doliczyć również dwutlenek węgla stanowiący produkt spalania paliw, niezbędnych do syntezy klinkieru portlandzkiego. W efekcie, wytworzenie 1 tony klinkieru powoduje wyemitowanie do atmosfery niemal 1 tony CO_2 , z której około 62% stanowi „technologiczny” dwutlenek węgla, którego emisji, przy zachowaniu stałej produkcji klinkieru portlandzkiego, ograniczyć się praktycznie nie da. Możliwość ograniczenia emisji CO_2 powstałego w wyniku spalania paliw też są ograniczone, gdyż zużycie ciepła w cementowniach posiadających nowoczesne instalacje piecowe zbliża się do teoretycznego zapotrzebowania ciepła na proces syntezy klinkieru portlandzkiego. Cementownie zmieniają więc paliwo węglowe na zawierające więcej wodoru paliwa alternatywne. Ilość pozyskiwanej w ten sposób energii ciepłej w ostatnich trzech latach wynosiła odpowiednio 2007 – 18%, 2008

Tabela 1. Wybrane dane dotyczące przemysłu cementowego w Polsce w latach 2007–2009

Rodzaj informacji	Dane za określony rok, tys. ton		
	2007	2008	2009
Produkcja klinkieru	12997,2	12380,3	10650,8
Produkcja cementu	16654,1	16973,5	15197,3
Sprzedaż cementu w kraju (ogółem)	16529,1	16861,1	15096,7
Zużycie surowców odpadowych w produkcji klinkieru	1363,5	1811,9	1420,9
Zużycie surowców odpadowych w produkcji cementu	3547,6	3757,2	3176,1
Zużycie paliw alternatywnych	488,7	617,0	751,9
Emisja dwutlenku węgla	11423,7	10465,6	8795,6

– 26%, 2009 – 36% całkowitej energii uzyskiwanej ze spalania paliw oraz zwiększają w produkcji udział cementów o mniejszej zawartości klinkieru portlandzkiego i nadal modernizują linie technologiczne. Uzyskiwane wskaźniki w wielu dziedzinach stawiają polski przemysł cementowy w ścisłej czołówce krajów europejskich. Produkcja cementów powszechnego użytku ma jednak swoje prawa (wapień, skład fazowy klinkieru portlandzkiego, 1450°C w strefie spiekania pieca) i ślad węglowy cementu, a tym samym betonu, nadal pozostaje duży. Jak wygląda to w liczbach?

Produkcja cementu w skali globalnej zbliża się do trzech miliardów ton, zaś produkcja betonu wyrażona w 1 m³ jest niewiele mniejsza niż liczba ludzi zamieszkujących Ziemię. Udział przemysłu cementowego w globalnej emisji antropogenicznego CO₂ wynosi 5–7%.

Informacje dotyczące przemysłu cementowego w Polsce przedstawiono w tabeli 1.

Emisja CO₂ przypadająca na 1 t klinkieru portlandzkiego wyprodukowanego w Polsce wynosiła odpowiednio: 2007 – 0,8751 t, 2008 – 0,8473 t, 2009 – 0,8229 t. W odniesieniu do 1 t cementu wartości te kształtowały się następująco: 2007 – 0,6829 t, 2008 – 0,6180 t, 2009 – 0,5411 t.

Należy podkreślić szybki wzrost wykorzystania paliw alternatywnych. W ostatnich latach paliwa te zapewniły odpowiednio: 2007 – 18%, 2008 – 26%, 2009 – 36% całkowitej ilości energii cieplnej zużytej w procesie wytwarzania klinkieru portlandzkiego

Jako paliwa alternatywne są stosowane różne rodzaje przetworzonych i nieprzetworzonych odpadów palnych lub ich mieszaniny, które w przeciwnym razie zalegałyby na składowiskach. Warunki spalania w krajowych cementowniach spełniają z dużą nawiązką wszystkie wymagania stawiane profesjonalnym spalarniom odpadów (odpowiednio wysoka temperatura, dostatecznie długi czas przebywania materiału w piecu). Zaletami cementowych instalacji piecowych jest również bardzo duża pojemność cieplna, zasadowe środowisko oraz brak odpadów po spalaniu paliw alternatywnych, gdyż popiół z paliw wchodzi w reakcje z wypalonym materiałem, wbudowując się w struktury składników klinkieru portlandzkiego.

Co dalej?

Wydaje się, że spośród prawdopodobnych zmian w procesach wytwarzania betonów, których beneficjentem będzie środowisko naturalne, należy wymienić przede wszystkim: wzrost zużycia odpadów przemysłowych wykorzystywanych jako dodatki aktywne w betonach, ograniczenie jednostkowego zużycia cementu, zwiększenie recyklingu materiałów z rozbiórki konstrukcji betonowych oraz recyklingu wody w wytwórniach betonów, zwiększenie trwałości betonu, wzrost udziału SCC w całkowitej masie wytwarzanych betonów. Swoją obecność w technologii betonów znacznie szerzej zaznaczy zapewne nanotechnologia, czego przykładem są wytwarzane już obecnie betony samoczyszczące, zawierające nanocząstki dwutlenku tytanu.

Ślad węglowy betonów wynikający ze stosowania cementów powszechnego użytku będzie zapewne systematycznie malał, lecz jeszcze przez długi czas pozostanie bardzo duży. W procesie wytwarzania klinkieru portlandzkiego w znaczący sposób wzrosnie wykorzystanie paliw alternatywnych. Zmniejszy się zapewne średnia zawartość klinkieru portlandzkiego w cementach powszechnego użytku, a tym samym w betonach. Nie wydaje się natomiast możliwe, aby w dającej się przewidzieć przyszłości znalaziono powszechnie dostępne surowce, które byłyby w stanie zastąpić wapień, jako nośnik CaO w namiarze surowcowym do produkcji klinkieru portlandzkiego. Alternatywą dla wapieni jako źródła CaO mogą być co prawda siarczany wapnia (gips i anhydryt), jednak pod warunkiem gwarancji całkowitego zagospodarowania powstającego SO₂ (produkcja kwasu siarkowego i jego pochodnych). Nasiłają się zapewne poszukiwania możliwości ograniczenia emisji CO₂ w wyniku rozwoju produkcji cementów belitowych, wytwarzanych w złożu fluidalnym (takie rozwiązanie już funkcjonuje), a w dalszej perspektywie rozwijać się będą prace, których celem będzie wykorzystanie energii słonecznej jako źródła ciepła w syntezie klinkieru portlandzkiego. Czy zatem beton ma przyszłość? Oczywiście. Będzie ulegał zmianom, ale nadal pozostanie podstawowym materiałem konstrukcyjnym o bardzo atrakcyjnych właściwościach użytkowych.

dr hab. Marek Gawlicki, prof. AGH

Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki

