

Tendencje kształtujące przyszłość betonu

1. Wprowadzenie

Przewidywanie przyszłego rozwoju jest zadaniem trudnym i z oczywistych względów obarczonym dużym stopniem niepewności. „To, że w przeszłości przyszłość była podobna do przeszłości, nie oznacza, że tak będzie w przyszłości” [1]. Przyszłość jest trudno przewidywalna, ale przewidywanie jest konieczne [2]. Ci, których cele są niejasne, nie potrafią wykorzystać czynników napędowych zmian dla swojego rozwoju [3]. „Żaden wiatr nie sprzyja żeglarzowi, który nie zna portu przeznaczenia” (Seneka Starszy).

Prognozy formułuje się na ogół na podstawie oczekiwania specjalistów zaangażowanych w rozwój danej dziedziny. Przełom wieków sprzyja publikowaniu prognoz na różne tematy. Dotyczy to również betonu [4-9]. W tym opracowaniu skupiono się na tendencjach kształtujących rozwój betonu. Tendencje te mogą się okazać w przyszłości w różnym stopniu trwałe. Jak się wydaje, uprawnione wnioski praktyczne można z nich wyciągać na okres nieprzekraczający najbliższych trzydziestu lat [3][8].

Beton jest bardzo szczególnym przedmiotem prognozy. Znamionuje go bardzo krótki okres przydatności do użycia i długotrwałe skutki. Przydatność do użycia wynosi od kilkudziesięciu minut do kilku godzin, a trwałość po stwardnieniu co najmniej pięćdziesiąt lat. Okres trwałości to stan, w którym beton w konstrukcji odpowiada wymaganiom użytkowemu dotyczącym tej konstrukcji. Obiekty betonowe stają się trwałym elementem krajobrazu. Beton jest najstarszym sztucznym materiałem spośród obecnie stosowanych w technice. Za przyszłością betonu przemawia długa, sięgająca ponad 8000 lat historia (Syria, 6500 p.n.e.), w tym blisko 200 lat w czasach nowożytnych. Materiały (miejsce 4.) i konstrukcje (miejsce 9.) są zaliczane do 12 dziedzin najbardziej dynamicznie rozwijających się i o największym znaczeniu dla społeczeństwa [3]. Charakterystyczna jest ta gradacja „ważności innowacyjnej”: materiały przed konstrukcją (por. także A. Ajdukiewicz „Kierunki rozwoju badań konstrukcji beto-

nowych”, [w:] Konferencja „Dni Betonu”, Wisła, 2006). Postęp w materiałach wyprzedza i będzie wyprzedzał rozwój konstrukcji. Beton jest obecnie najczęściej stosowanym (ok. 6 mld m³ rocznie) materiałem spośród wytwarzanych przez człowieka, a drugim po wodzie w całym zbiorze stosowanych materiałów. Tak więc prognoza dla betonu dotyczy jednego z podstawowych czynników kultury materialnej współczesnej cywilizacji.

2. Przyszłość betonu: czy, dlaczego, jaka

W latach 2003-2004 na łamach kwartalnika „Budownictwo, Technologie, Architektura” odbyła się dyskusja „dlaczego beton ma przyszłość” [12]. Jest rzeczą charakterystyczną, że niemal zupełnie pominięto wątpliwość „czy beton ma przyszłość?”, przytaczając od razu argumenty za przyszłością betonu:

- ze względu na przeszłość
- ze względów demograficznych; populacja 6 miliardów ludzi wywiera presję na zaspokojenie jednej ze swoich podstawowych potrzeb (komfort cywilizacyjny zapewnia 300-500 kg cementu na jednego mieszkańca rocznie)
- ze względu na potencjał produkcyjny „zakłady” w przemyśle cementowym i betonowym: 2,2 mld ton cementu, ~7 mld m³ betonu rocznie.

Wszyscy dyskutanci na tytułowe pytanie odpowiedzieli zdecydowanie „tak!” [12-17]. Po twierdzących odpowiedziach o przyszłość betonu „czy i dlaczego”, logiczną konsekwencją jest – być może najważniejsze – pytanie „jaka?”.

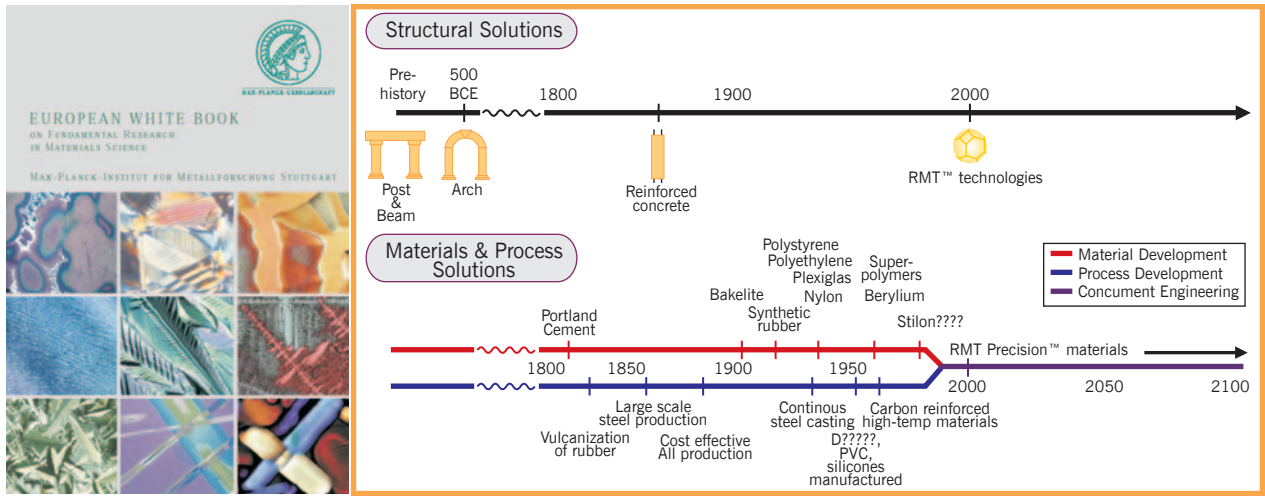
3. Spojrzenie spoza betonowego podwórka

Rocznie na świecie publikuje się ponad pięć tys. artykułów na temat betonu [18]. Nie budzi więc zdziwienia, że obraz internetowy w świetle wyników wyszukiwarki Google składa się z dużych liczb. Liczba informacji o betonie to około 210 milionów; dla porównania o wodzie około 1,5 milara (tablica 1). Charakterystyczne, że betonowi historycznemu – betonowi przeszłości – poświęcone jest około 30% ogółu informacji o betonie, zaś liczba informacji o betonie przyszłości to ułamek promila. Z przyszłością wody natomiast jest związane około 20% informacji spośród półtoramilionowego zbioru.

W 2001 roku ukazała się Europejska Biała Księga o podstawowych badaniach w nauce o materiałach, wydana przez Instytut Maxa Plancka i określana w przedmowie jako kamień milowy w europejskiej nauce o materiałach. W liczącej 500 stron dużego formatu książce określenie „beton” pojawia się tylko raz i to w odniesieniu do polimerów: „functional polymers in the processing of

Tablica 1. Wyniki poszukiwań – wyszukiwarka Google

Lp	Słowa kluczowe	Liczba odpowiedzi	%
1	Concrete – beton	210 000 000	100
2	Past concrete – beton przeszłości	58 800 000	28
3	Sustainable concrete – „beton zrównoważony”	17 700 000	8,4
4	Portland cement	4 860 000	2,3
5	Lunar concrete – beton księżycowy	834 000	0,4
6	Future concrete – beton przyszłości	65 500	0,03
7	Water – woda	1 500 000 000	714
8	Future of water – przyszłość wody	275 000 000	131



concrete” [19]. Jest to promujące dla wszystkich zajmujących się betonami polimerowymi [20], ale niekorzystne dla obrazu dziedziny, która stanowczo jest odbierana zbyt konserwatywnie. W tej samej księdze jest zamieszczony rysunek ujmujący rozwój konstrukcji i materiałów w perspektywie historycznej (rys. 1). Pokazano na nim konstrukcję „słup – belka” w czasach prehistorycznych, „łuk” stosowany w starożytnym Rzymie, a w czasach nowożytnych: cement portlandzki, żelbet i polimery. Dalszy rozwój przyporządkowano Reflexive Materials Technology (RMT), która jak dotychczas jest koncepcją całkowicie wirtualną (por. rozdz. 6). Ten nadzwyczaj ubogi wizerunek zgadza się z poprzednio zauważonym faktem, że liczba informacji o przyszłości betonu to poniżej pół promila całego zbioru dotyczącego betonu.

4. Ogólne uwarunkowania rozwoju betonu

Beton, jeśli nawet nie jest uznawany za najważniejszy, to na pewno jest najczęściej stosowanym materiałem, który rocznie pochłania 20 mld ton kruszywa i bezpowrotnie 800 mln m³ wody (ok. 5% zużycia wody ogółem), a także 500 mld MJ energii. Równocześnie przemysł cementowy wytwarza 5-7% światowej emisji CO₂. Przyszły rozwój przemysłu zużywającego tyle energii i materiałów nie może być społeczeństwu obojętny. Równocześnie beton stanowi odpowiedź na pod-

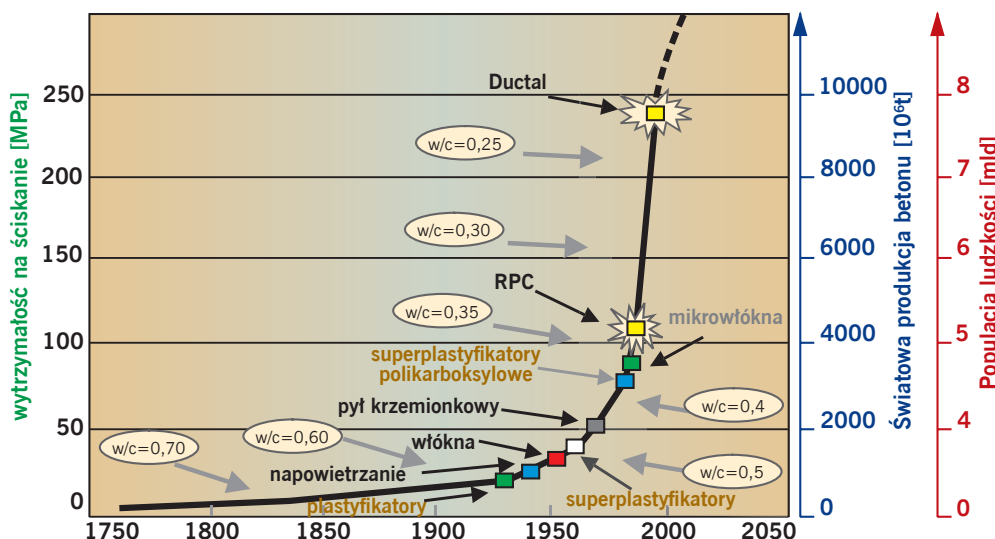
stawowe potrzeby społeczne. W konsekwencji rozwój betonu zostanie podporządkowany rozwojowi zrównoważonemu [21] i wzrosną – przynajmniej w Europie – wymagania odnośnie komfortu użytkowania obiektów budowlanych. Europejska Sieć Instytutów Badawczych Budownictwa¹ sformułowała następujące przesłanie dotyczące rozwoju budownictwa – „zrównoważony i oparty na wiedzy europejski przemysł budowlany, który jest konkurencyjny, innowacyjny, zorientowany rynkowo i odpowiadający potrzebom użytkownika i potrzebom społecznym”. Możemy tu wyróżnić trzy główne czynniki: ograniczenia wynikające z zasad zrównoważonego rozwoju, wyzwania ze strony użytkownika i konkurencji oraz odwołanie się do wiedzy jako podstawy rozwoju.

5. Krzywa rozwoju betonu

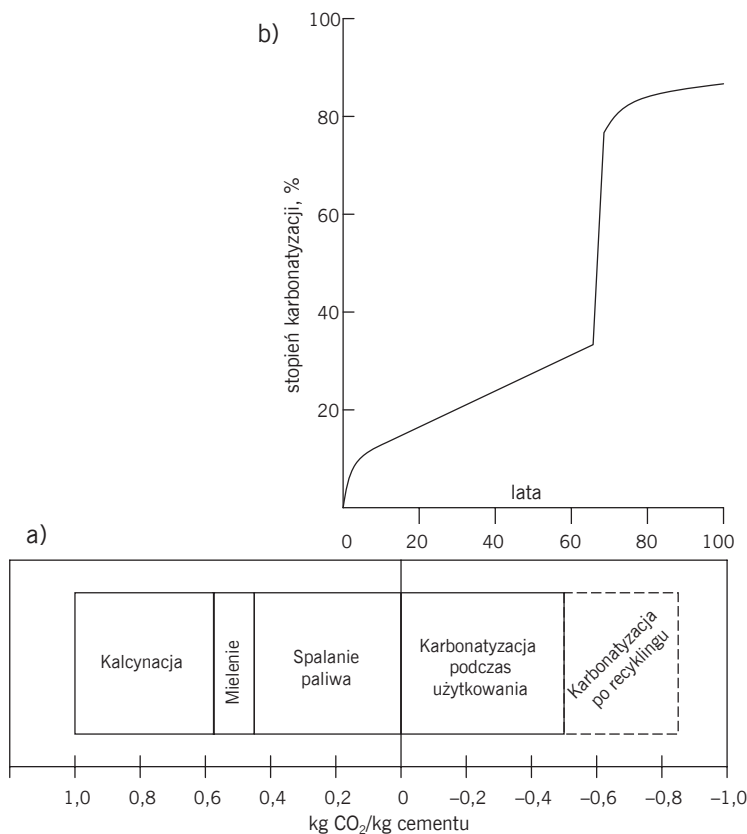
Uogólniona krzywa rozwoju betonu (rys. 2) przedstawia zarówno postęp jakościowy, reprezentowany przez kształtowanie się z biegiem lat wytrzymałości betonu na ściskanie, jak i rozwój ilościowy mierzony wzrostem produkcji betonu oraz unaczynia, iż siłą napędzającą ten proces jest wzrost demograficzny.

Nasuwa się pytanie, czy w przyszłości będzie podobnie? Czy nadal postęp będzie miał charakter eksponencyjny i tak ostro wznoszący się w górę? Czy będzie nadal możliwe opisanie wzrostu ilości-

Rys. 1. Rozwój konstrukcji i materiału zamieszczony w Europejskiej Białej Księdze (pierwsze źródło: C. Owens, Brief Introduction to RMT Technologies, Unistatus, USA)



Rys. 2. Uogólniona krzywa rozwoju betonu



Rys. 3. Bilans emisji CO₂ podczas wytwarzania i użytkowania betonu (a); prognozowany przebieg karbonatyzacji z uwzględnieniem recyklingu (b); źródła: Nordic Project [24][25]

wego i jakościowego tą samą funkcją, czy też rzędne wytrzymałości i wielkości produkcji zaczną się rozdzielać?

Wzrost demograficzny będzie również w przyszłości wywierał znaczny wpływ na rozwój ilościowy betonu; zapewne wystąpi większe zróżnicowanie geograficzne. Już obecnie w Azji wytwarza się ponadczterokrotnie więcej cementu niż w Europie. Starzejąca się Europa będzie rozbudowywała swoją infrastrukturę, remontowała i modernizowała istniejące zasoby.

A. Bentur i współautorzy stawiają dyskusyjną tezę, iż po roku 2020 tworzywa cementowe osiągną taką wytrzymałość mechaniczną, że będzie możliwe zmniejszenie przekrojów elementów budowlanych o rząd wielkości i w konsekwencji, jak twierdzą Autorzy [8], zmniejszenie wartości granicznej komfortu cywilizacyjnego do 100 kg cementu per capita rocznie². Dotychczas takich zależności nie obserwowano. Już obecnie – jeżeli to potrzebne

i celowe – jest możliwe otrzymywanie betonów wysokiej wytrzymałości, o $f_c \geq 600$ MPa [22]. Zmniejszenie przekrojów elementów budowlanych o rząd wielkości oznaczałoby przejście z obecnego zakresu 0,1 do 0,3 m na zakres 1–3 cm (!). Spowodowałoby to zmniejszenie zużycia betonu, a w konsekwencji kruszywa do danej konstrukcji – jednakże nie zmniejszenie zużycia cementu. Zawartość cementu w betonach wysokiej wytrzymałości jest ponaddwukrotnie większa, a w betonach o superdużej wytrzymałości (CEMTEC) ponadtrzykrotnie większa niż w betonach zwykłych

Dążeniem zrównoważonego rozwoju jest „zamknięty obieg materiałów” w wyniku całkowitego recyklingu [3]. Doświadczenia z przebudowy Berlina dowodzą [23], iż tak jak po II wojnie światowej „gruzobeton”, tak obecnie możliwy do stosowania jest również „betonobeton”. Beton z rozbiórki nie będzie tworzył nowych hałd odpadów, lecz będzie wykorzystywany w procesie odtwarzania tego materiału i doskonalenia formy powstających z niego elementów. Zrównuje to pod względem odtwarzalności – wielokrotnego użycia – beton ze stalą. Recykling betonu może również wprowadzić korzystne zmiany w bilansie emisji CO₂. Proces rozdrabniania betonu spowoduje znaczne rozwiniecie powierzchni powstającego kruszywa betonowego i w jego wyniku skokowy wzrost intensywności karbonatyzacji (rys. 3).

Kolejne ograniczenie ilościowe może być spowodowane brakiem wody, która jest bezpowrotnie wiązana w fazach zaczynu. Dotychczasowy rozwój technologii betonu pokazuje, że wiązał on się z klasą cementu, a następnie ze zmniejszaniem wskaźnika wodno-cementowego, dzięki stosowaniu różnych upłynniaczy. Ich stosowanie spowodowało zmniejszenie wskaźnika w/c poniżej wartości 0,38, która jeszcze do niedawna uchodziła za graniczną. Można założyć, że w przyszłej technologii betonu wartość ta będzie dążyć do $w/c \approx 0,15$, przyjmując, że niezhydratyzowana część ziaren cementu będzie pełniła rolę mikrowypełniacza. Oszczędność wody netto będzie jednak znacznie mniejsza, a to na skutek zauważonej już tendencji do wzrostu zawartości cementu w betonie. W betonach superwysokiej wytrzymałości (Ductal, Cemtec) w/c jest ponaddwukrotnie niższe, a zawartość cementu ponaddwukrotnie wyższa niż w betonach zwykłych. Czynnikiem w pewnym stopniu fagodującym będzie wykorzystywanie wody z procesów przemysłowych

Literatura

- 1 S. Lem, *Summa technologiae, Interart*, Warszawa 1996
- 2 L. Czarnecki, Założenia systemu rozpoznawania kierunków rozwojowych Inżynierii Materiałów Budowlanych, *Prace Instytutu Techniki Budowlanej*, 2/2005
- 3 Delphi – Study on Development in Science and Technology, www.isi.fraunhofer.de
- 4 A. J. Boyd, S. Mindess, J. P. Skalny (edit.), *Materials Science of Concrete: Cement and Concrete – Trends and Challenges, Special Volume*, Wiley, 2006
- 5 A.M. Brandt, *Development of New Generation of Concretes in Poland (ibid.)*
- 6 *Road Map 2030: The US Concrete Industry Technology Road Map*, Strategic Development Council, USA 2002

- 7 P. Hewlett, *Przyszłość betonu – istotne trendy i zmiany. Konferencja „Dni Betonu”*, Wiśła 2004
- 8 A. Bentur, A. Katz, S. Mindess, *Przyszłość betonu – wizja i wyzwania*, „Cement, Wapno, Beton”, 2/2006
- 9 W. Kurdowski, *Przyszłość betonu. Konferencja Naukowo-Techniczna „Beton i Prefabrykacja”*, Jadwisin 2006
- 10 L. Czarnecki, *Dlaczego beton ma przyszłość? „Budownictwo, Technologie, Architektura”*, 3/2003
- 11 W. Radomski, *Czy beton ma przyszłość w mostownictwie?*, *ibid.*, 4/2003
- 12 A. Z. Pawłowski, *Budynki wysokie – wzrastająca rola betonu*, *ibid.*, 1/2004
- 13 Z. Jamróży, *Beton tak, ale z uwzględnieniem...*, *ibid.*, 2004

wych, w tym zwłaszcza wody odzyskiwanej podczas wytwarzania betonu.

Powyższe rozważania prowadzą do wniosku, że w aspekcie ilościowym należy oczekiwać pewnego zagięcia krzywej rozwoju (wzrost produkcji) betonu. To spowolnienie będzie raczej łagodne, gdyż czynnik demograficzny będzie nadal wywierał presję „pro-rozwojową”, jednak ze zróżnicowaną intensywnością w różnych regionach świata. Produkowany beton będzie zawierał więcej cementu, z tym że będzie to w coraz mniejszym stopniu cement portlandzki bez dodatków.

Podobne wnioski można wysnuć w odniesieniu do postępu jakościowego, wyrażanego jako wytrzymałość na ściskanie. Racje techniczne i ekonomiczne wskazują raczej na poszukiwanie optimum wytrzymałości niż bicie rekordów w tym zakresie. Generalnie należy oczekiwać przejścia od betonu o wysokiej wytrzymałości do betonu o wysokiej użyteczności: HSC ⇒ HPC³.

6. Użyteczność betonu

W przyszłości w asortymentach produkowanych betonów będzie rosł udział DFP – Defined Performance Concrete [29], czyli betonów o określonej użyteczności, a w dalszej przyszłości Well Defined Performance Concrete. Wyzwaniem pozostaje formułowanie kryteriów użyteczności dla różnych zastosowań, to znaczy zbioru cech i ich wartości decydujących o przydatności w danym zastosowaniu. Beton przyszłości będzie definiowany w oparciu o cechy techniczne, a nie w kategoriach składu. Oznacza to odejście od betonu recepturowego na rzecz betonu projektowanego odnoszącego się do pojęcia „użyteczności” („performance concept”). Nowa norma europejska PN-EN 206-1 stwarza taką możliwość. W tym kontekście beton przyszłości jawi się jako „lepszy beton”; beton o znanych cechach, ale na wyższym poziomie wartości, bądź lepiej dobranych. Stąd w prognozach [6–8] spotyka się wiele określeń w stopniu wyższym: wyższa wytrzymałość, większa szczelność, lepsza urabialność. Stwarza to wrażenie życzeniowe, zwłaszcza że wymagania ekologiczne będą narzucały ograniczenia. A. Bentur i współautorzy [8] stwierdzają wprost: „produkcja betonu dobrej jakości z gorszych surowców⁴ i o mniejszej (?)⁵ zawartości cementu”. W świetle znanego zdania A.M. Neville’a [31], iż „z tych samych składników można otrzymać dobry i zły beton” nie jest



to niemożliwe, ale nie jest łatwe. Będzie to wymagało rozwinięcia i udoskonalenia metod projektowania i optymalizacji materiałowej, w tym lepszego poznania i wykorzystania mechanizmów synergicznych (współdziałanie składników). Zwiększy się rola modelowania materiałowego w wirtualnych laboratoriach; „komputerowa inżynieria materiałowa” („computational material science”, CMS [32]) pozwalająca wyjaśniać wyniki eksperymentów i pomagająca planować kolejne. Dotyczy to zwłaszcza relacji mikrostruktura – właściwości (model materiałowy). Po opracowaniu modelu symulacja komputerowa może w części zastępować eksperymenty. Optymalizacja składu może wymuszać konieczność wytwarzania mieszanki betonowej o mniejszych tolerancjach zawartości składników i mniejszej dopuszczalnej zmienności parametrów technologicznych. W odniesieniu do podstawowej masy betonów przyszłości zarysowują się następujące główne tendencje:

– od betonów recepturowych do betonów projektowanych; od „material concept” do „performance concept”

Rys. 4. Transparent concrete, LiTraCon – beton przepuszczający światło słoneczne. Źródło: www.techeblog.com

14 A. Ajdukiewicz, *Beton a rozwój zrównoważony*, *ibid.*, 3/2004

15 A. M. Brandt, *Beton ma przyszłość, ale...*, *ibid.*, 1/2004

16 European Network of Building Research Institutes: *Future Needs for European Construction R&D*, www.enbri.org

17 G. Wegner, *Soft materials and polymers: strategies for future areas of basic materials science*. In *European White Book on Fundamental Research in Materials Science*, Max-Planck-Institut für Metallforschung Stuttgart, Max-Planck-Gesellschaft, Stuttgart 2001

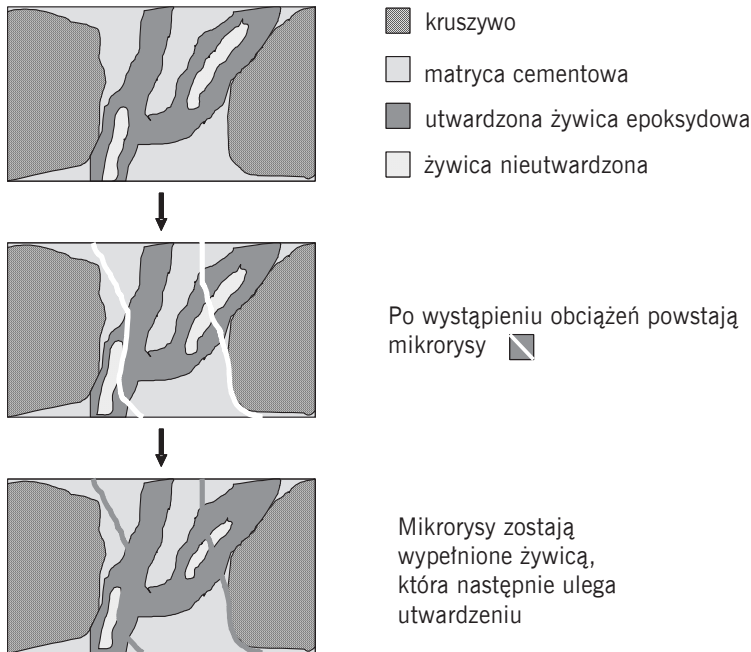
18 L. Czarnecki, *Polymers in Concrete – Personal Reflections on the Edge of the New Century*, *Concrete International*, 8/2005

19 L. Czarnecki, *Przyszłość betonu w warunkach zrównoważonego rozwoju*, *„Materiały Budowlane”*, 11/2006

20 P. Richard, M. H. Cheyrezy, *Reactive Powder Concrete With High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength*, In *„Concrete Technology Past, Present and Future (P. K. Mehta edit.)*, SP-144, American Concrete Institute, 1994

21 M. Maultzsch, *Wykorzystanie przetworzonego gruzu budowlanego – przyczynek do zrównoważonego rozwoju technologii betonu*, Konferencja „Dni Betonu”, Szczyrk 2002

22 C. Nielsen, *Concrete Production – Best Available Technologies*. Seminar „Challenge for Sustainable Construction: the Concrete Approach”, Warszawa 2006



Rys. 5. Samonaprawialny beton epoxy-cementowy wg Y. Ohamy [41]

- od betonów do „zapraw konstrukcyjnych”; upowszechnienie betonów wysokiej wytrzymałości umożliwi zmniejszenie przekrojów elementów budowlanych i w konsekwencji zmniejszenie maksymalnego ziarna kruszywa; betony superwysokiej wytrzymałości (RPC)⁶ ze względów technologicznych (maksimum gęstości⁷, minimum porów, poprawa jednorodności) zawierają kruszywa o maksymalnym wymiarze ziarna 0,3 mm [22]
- od betonów z kruszywa do „betonów z betonu” (recykling).

Beton przyszłości to „lepszy beton” z niekoniecznie lepszych surowców. W odniesieniu do całej tej grupy betonów powszechnego stosowania proponuje się – w Europejskiej Białej Księdze [19] – dalszy postęp przez wprowadzenie Reflexive Material Technology, RMT. Twórcą RMT jest amerykański wynalazca C.R. Owens. Idea metody polega na uzyskaniu w tworzywie takiej struktury porów, która pozwoliłaby na maksymalne wykorzystanie wytrzymałości materiału (w danym schemacie obciążeń), równocześnie czyniąc materiał lżejszym. Mikrostruktura materiału miałaby „mikrokonstrukcję ramową” – równomiernie obciążoną. Autor koncepcji legitymuje się trzema patentami amerykańskimi

(US Pat.: 5 615 528, 5 816 009, 6 767 619) zastrzegającymi kształt geometryczny mikrostruktur („stress steering structure”). Brak jednakże wskazań, jak je uzyskać.

Należy oczekiwać dalszego rozwoju „betonów samoobsługowych”, obok już rozpowszechnionych betonów samozagęszczonych i będących w trakcie opracowywania samozmywalnych i samonaprawialnych (por. rozdz. 7), powstaną kolejne odmiany. Kontynuowane będą prace nad zwiększeniem wytrzymałości na rozciąganie w relacji do wytrzymałości na ściskanie. Już obecnie większość betonów wysokiej wytrzymałości zawiera dodatek włókien, a betony superwytrzymałe nawet do kilkuset kilogramów w 1 m³ [6]. Od kilku lat⁸ są prowadzone prace nad „textile concrete”, betonami zbrojonymi tkaninami szklanymi, węglowymi i aramidowymi. Są to tworzywa o wysokiej wytrzymałości właściwej i odznaczające się pewną ciągliwością (ductility). Mogą być stosowane na przykład jako ściany osłonowe o grubości 10-30 mm [34]. Interesujący przykład betonu funkcjonalnego, dokumentujący potencjalne możliwości (nieoczekiwane!), zawarte w betonie, stanowi beton przeświecający – przepuszczający światło słoneczne (LiTraCon – Light-Transparent Concrete, Aachen). Jest to beton [35] z rozproszonymi włóknami optycznymi o różnej średnicy, umożliwiającą przepuszczanie światła przez bloki o grubości nawet kilkudziesięciu centymetrów (rys. 4). Jako nowe wymaganie podstawowe wobec materiałów konstrukcyjnych coraz częściej jest wymieniane „survivability” – zdolność przetrwania w przypadku ataku terrorystycznego, bądź katastrofy żywiołowej.

7. Nanocement i nanobeton

Zaczyn cementowy zawierający hydraty i pory rozpoznawalne w nanoskali stanowi bardzo obiecujący punkt wyjścia do nanomodyfikacji [37] z użyciem niereaktywnych i reaktywnych nanocząstek. Kilka punktów szczególnych na krzywej rozwoju betonu (por. rys. 2) wskazuje na duży potencjał modyfikacyjny. Jest to:

- wprowadzanie do mieszanki betonowej pyłu krzemionkowego i mikrowłókien
 - RPC (Reactive Powder Concrete) – beton z proszków reaktywnych
 - Ductal – ultrawysokowartościowy fibrobeton.
- Dotychczasowy rozwój technologii betonu pokazu-

23 M. Glavind, *Properties for RTD Identified by Eco-Serve and ECTP, Focus Area „Materials”, ibid.*
 24 A. C. Aitcin: *High-Performance Concrete, E & FN Spon, 1998*
 25 L. Kucharska, A. M. Brandt, *Betony o wysokiej wartości: skład, technologia i właściwości mechaniczne, „Inżynieria i Budownictwo”, 9/1993*
 26 L. Czarnecki i in., *Beton według normy PN-EN 206-1 – komentarz, Polski Cement, Kraków 2004*
 27 J. Walraven, *From High Strength, through High Performance, to Defined Performance Concrete, Conference „High Strength / High Performance Concrete”, Lipsk 2002*
 28 Dyrektywa Europejska 89/106/EWG z dn. 1998-12-21

29 A. M. Neville, *Właściwości betonu, Polski Cement, Kraków 2000*
 30 E. Garboczi, *The Past, Present and Future of the Computational Materials Science, www.ciks.cbt.nist.gov/~garbocz*
 31 C. R. Owens, *Design and Fabrication of Optimized Porous Structures Using Reflexive Material Technology. 45th International SAMPE Symposium, 2000*
 32 *First International RILEM Conference on Textile reinforced Concrete, RWTH Aachen, 2006*
 33 *Concrete Nation: Bright Future for Ancient Materials, „Science News Online”, 1/2005*
 34 L. Czarnecki, *Nanotechnologia wyzwaniem inżynierii materiałów budowlanych, „Inżynieria i Budownictwo”, 9/2006*

je, że równocześnie ze zmniejszaniem wskaźnika wodno-cementowego (por. rys. 2) dzięki stosowaniu różnych upłynniaczy, następowała interwencja technologiczna na coraz subtelniejszym poziomie. Koncepcja betonu z mikrokapsułkami wypełnionymi żywicą epoksydową to idea betonu samonaprawialnego według Y. Ohamy i współpracowników [41]. W mieszance betonowej przez intensywne mieszanie rozprowadza się żywicę epoksydową. W przypadku zarysowania betonu żywica z kapsuły uwalnia się i stykając się z powierzchniami utworzonej rysy, pod wpływem alkalicznego środowiska utwardza się (rys. 5), konsolidując rysy. Jako nanomodifikator „vivo-aktywny” mogą być potraktowane bakterie *Bacillus pasteurii*, które osadzone w rysie leczą beton (rys. 6), wytrącając węglan wapnia [42].

W przypadku betonów polimerowo-cementowych, ze względu na znaczny koszt polimeru, bardzo ważne jest jego racjonalne rozmieszczenie w betonie (rys. 7). Temu służy nanomonitoring [43]. W tej samej grupie zagadnień można rozważać badania nad modelem przemiany perkolacyjnej, rozumianym jako przejście „nieciągłość – ciągłość” podczas formowania sieci polimerowej w betonie [44].

8. Podsumowanie

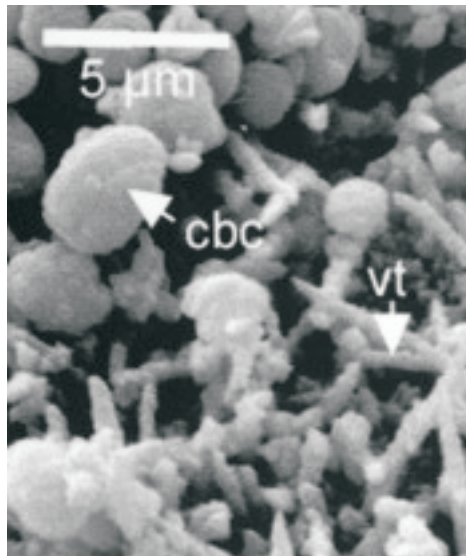
Beton przyszłości będzie betonem opartym na wiedzy. Jedną z najważniejszych gwarancji przyszłości betonu są kadry badaczy i inżynierów, które związały swój los z postępem w betonie. Powinna zostać opracowana holistyczna koncepcja inżynierii materiałowej betonu, zaadresowana równocześnie do badań, do praktyki i do edukacji w tym zakresie. Powinno to doprowadzić do opracowania krajowej strategii badań związanych z technologią betonu, wpisujących się zarazem w strategię globalną.

prof. dr hab. inż. Lech Czarnecki
Politechnika Warszawska
prof. dr hab. inż. Wiesław Kurdowski
Instytut Mineralnych Materiałów Budowlanych,
Kraków

Przypisy

- 1 wśród 21 zrzeszonych instytutów Polskę reprezentuje Instytut Techniki Budowlanej
- 2 obecnie przyjmuje się 300 kg, a w krajach bogatych 500 kg cementu per capita rocznie [11]

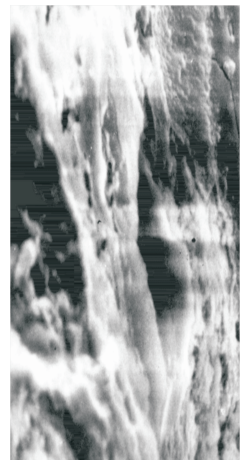
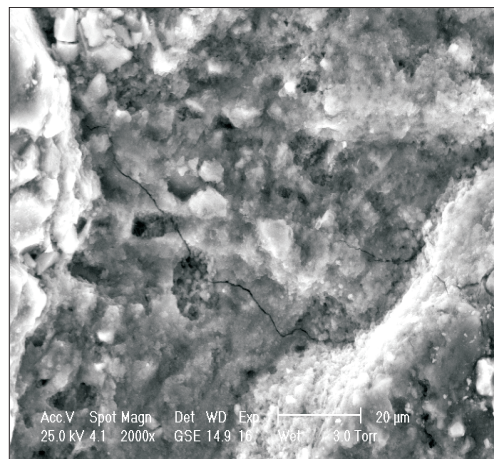
- 35 K. Sobolev, M. Ferrada-Gutierrez, *How nanotechnology can change the concrete world, Part 2*, „American Ceramic Society Bulletin”, 11/2005
- 36 A. Porro, *Nanoscience and nanotechnology in construction materials. 2nd Symposium on Nanotechnology in Construction Materials, Labein 2005*
- 37 A. Ćwirzeń, *Self-compacting ultra high strength concrete: nanotubes in concrete*, Politechnika Warszawska, Warszawa 2006
- 38 T. Katsuhata, Y. Ohama, K. Demura, *Investigation of microcracks self-repair function of polymer-modified mortars using epoxy resin without hardeners. 10th International Congress on Polymers in Concrete, Hawaii, USA 2001*
- 39 C. Rodriguez-Navarro, M. Rodriguez-Gallego, K. Ben



Rys. 6. Komórki bakterii *Bacillus pasteurii* (cbc) w strukturze betonu [42]

- 4 HSC, High Strength Concrete – beton wysokiej wytrzymałości (BWW), [26], HPC, High Performance Concrete – beton wysokiej użyteczności (BWU), [27]
- 4 w tym również materiałów odpadowych
- 5 wstawka cytującego
- 6 RPC – Reactive Powder Concrete
- 7 również maksymalizacja powierzchni wewnętrznej i wzrost zawartości cementu
- 8 zapoczątkowane w Niemczech w 1999 r.; w 2002 r. został utworzony komitet RILEM TC 201 TRC, „Textile Reinforced Concrete”

Rys. 7. Mostkowanie rys w betonie przez polimer; zarysowana matryca cementowa (z lewej), mostkujący efekt oddziaływania polimeru (z prawej)



- 40 L. Czarnecki, H. Schorn, *Nanomonitoring of polymer-cement concrete microstructure*, Konferencja „Dni Betonu”, Szczyrk 2002
- 41 P. Łukowski, *Continuity threshold of the polymer phase in polymer-cement composites. Archives of Civil Engineering (w druku)*