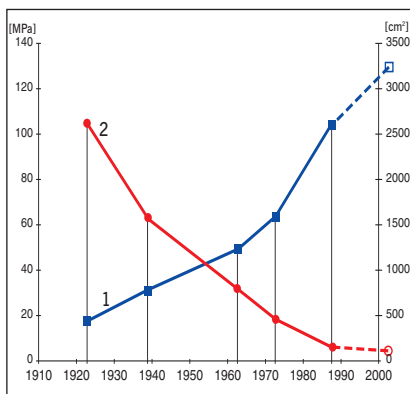


**Nieczęsto zdajemy sobie sprawę, że masa betonu produkowana w przeliczeniu na każdego mieszkańca naszego globu wynosi rocznie blisko 2000 kg i tym samym zużycie to ustępuje jedynie zużyciu wody (wg. CEMBUREAU, 1995). Produkcja betonu jest silnie zróżnicowana w poszczególnych krajach i dotąd znacznie wyższa w krajach rozwiniętych niż ubogich. O ile jednak w tych pierwszych jest to zużycie stabilizujące się, o tyle w krajach rozwijających się stale narasta.**

Ostatnie dwie dekady XX wieku były okresem bardzo znaczącym w dziedzinie betonu. Powszechne wprowadzenie dodatków mineralnych do betonu, a zwłaszcza pyłu krzemionkowego, łącznie z bardzo intensywnym rozwojem chemicznych domieszek o różnym działaniu, było podstawą postępu w technologii betonów wysokowartościowych. Właśnie w roku 1980, za sprawą francuskich badaczy Yves Maliera i Rogera Lacroix, wprowadzono termin „betony wysokowartościowe“, zamiast wcześniej rozpowszechnionego terminu „betony wysokiej wytrzymałości“. Był to początek innego spojrzenia na beton i dość prędko potwierdziły się przewidywania Maliera, że „...wiek betonu, ujmowanego w liczbie pojedynczej już przeminął, a nastąpiła – podobnie jak to było w przeszłości ze stalą – era betonów, zdecydowanie w liczbie mnogiej“. Podobne prognozy stawiało wielu badaczy betonu i jego zastosowań, np. Walther (1987), Mehta (1993), Richard (1996), a w obszernych monografiach przedstawili stan obecny i perspekty-



Rys. 1. Ewolucja norm konstrukcyjnych betonowych na przykładzie Norwegii: 1 – wykres maksymalnych wytrzymałości ujętych w normach od 1923 roku do projektu z 2002 roku; 2 – spadek wymaganego pola powierzchni przekroju krępego stupa betonowego o przykładowej nośności 1000 kN

## Rozwój konstrukcji z betonów nowej generacji

wy Aitcin (1998) [1] i Nawy (2001) [2]. Nie ma wątpliwości, że w istocie celem nie jest uzyskiwanie coraz trwalszego, bardziej wytrzymałego, przyjaznego środowisku czy tańszego betonu, ale efektywnych zastosowań tych nowych rodzajów betonów. Postęp w laboratoriach i prototypowe elementy konstrukcyjne – to jeszcze nie powszechne zastosowania. Wdrażanie betonów wysokowartościowych wcale nie przebiegało szybko; był to proces rozpoczęty pierwszymi zastosowaniami już w końcowych latach 60. za oceanem, a w niektórych krajach europejskich w połowie lat 70. Proces ten nabrał znacznego przyspieszenia w latach 80., kiedy co kilka lat podwajała się wytrzymałość betonów w prototypowych rozwiązaniach, a za tym szły stopniowo coraz powszechniejsze zastosowania w praktyce budowlanej.

Jakie betony możemy zaliczać do nowej generacji, to kwestia dość umowna, ale można chyba bez wątplenia wymienić:

- betony wysokowartościowe (BWW) – od C50 do C100
  - betony bardzo-wysokowartościowe (BBWW) – od C100 do C150
  - betony ultra-wysokowartościowe (BUWW) – powyżej 150 MPa.
- W tej ostatniej grupie najwięcej prób zastosowań dotyczyło betonów z proszków reaktywnych (RPC – Reactive Powder Concrete) o wytrzymałości na ściskanie 200 do 300 MPa, a z mikrowłóknami stalowymi, po specjalnej obróbce cieplno-ciśnieniowej osiągnięto niewiarygodną wytrzymałość, aż 810 MPa
- lekkie betony wysokowartościowe (LBWW) – osiągnięto w obiektach klasy LC55 do LC85, przy gęstości 1850 do 2000 kg/m<sup>3</sup>, a w laboratoriach betony LC100 do LC120
  - betony wysokowartościowe samozagęszczające się – już od klasy C80 włącznie. Spośród wymienionych pięciu grup betonów (ograniczonych tu do betonów cementowych) nietrudno jest wskazać, że najszerze rozpowszechnienie znajdują betony pierwszej i ostatniej grupy. Wiele wskazuje na to, że zastosowania betonów nowych generacji będą rozwijane zarówno w krajach, które przewodziły w ich odkrywaniu, jak też w krajach rozwijających się, gdyż nie wymaga to opanowania jakichś szczególnych procesów technologicznych, a składniki to w 80-90 procentach surowce niemal wszędzie dostępne.

Bardzo nasilone, wielokierunkowe badania

i praktyczne zastosowania betonów wysokowartościowych dowiodły wielokrotnie, że betony o wytrzymałości rzędu 60 MPa mogą być uzyskiwane przez samą domieszkę plastyfikatorów i redukcję stosunku w/c, natomiast wyższe wytrzymałości wymagają co najmniej kombinacji dwóch składników – efektywnych superplastyfikatorów i dodatku pyłów krzemionkowych. Zasady doboru składników większości tych betonów – może poza najbardziej wyrafinowanymi – nie odbiegają istotnie od znanych doświadczalnych metod doboru składu betonów zwykłych, a można jedynie wskazać większą wrażliwość na jakość składników i precyzję dozowania. Relatywna elastyczność w metodach wytwarzania jest kluczowym czynnikiem sukcesu betonu w ogólności, a oczekuje się, że także betonów nowych generacji.

Na rys. 1 przedstawiono rozwój normowych przepisów konstrukcyjnych betonowych w Norwegii, gdzie już w 1974 roku ujęto klasę B60, a norweska norma z roku 1989 była kamieniem milowym w unowocześnieniu konstrukcji betonowych i światowym upowszechnianiu BWW. Podano tam bowiem jako najniższą wytrzymałość betonu konstrukcyjnego 25 MPa, a klasyfikacja sięgnęła 110 MPa. Na tym tle widzimy bardzo zachowawczy charakter polskich przepisów normowych. Według PN-B-03264:1999 klasyfikowany jest beton do B70, natomiast przygotowywana aktualizacja polskiej normy PN-B-03264:2002 cofa się z maksymalną klasą do B60. Będzie to na szereg lat stanowiło barierę nowoczesności w projektowaniu konstrukcji w Polsce.

### Prognozy krótkoterminowe

Na podstawie już obserwowanych tendencji można przewidywać, że będą stosowane betony wysokowartościowe z coraz niższym stosunkiem wody do spoiwa w/s. Choć obecnie najczęściej stosowany jest w mieszankach betonów konstrukcyjnych stosunek w/s w granicach 0,30 do 0,40, to jednak betony wysokowartościowe w najbardziej znanych, wielkich obiektach ostatnich lat (np. najwyższy budynek z betonu Central Plaza w Hongkongu, najwyższy w Europie Commerzbank we Frankfurcie czy sławny prefabrykowany kanadyjski most Konfederacji) miały stosunki w/s w granicach 0,25 do 0,30. Oczywiście towarzyszą temu odpowiednie dodatki i domieszki.

Wiele wskazuje, że aspekty środowiskowe będą powodować zmniejszenie wysokiego

obecnie udziału cementów portlandzkich w mieszankach BWW, a coraz większy będzie udział uzupełniających materiałów wiążących i wypełniaczy. Zamiana pewnej ilości cementu portlandzkiego na inne materiały wiążące, zwłaszcza popioły lotne, jest korzystna nie tylko z ekonomicznego punktu widzenia, lecz także prowadzi do korzyści w obszarze reologii mieszanki i łagodzi ujemne skutki wydzielania ciepła hydratacji. Zastąpienie części cementu przez mniej aktywny materiał prowadzi do lepszej kontroli reologii mieszanki BWW, a w konsekwencji do łatwiejszego układania i zagęszczania w różnych warunkach. Jednocześnie trzeba brać pod uwagę, że przyrost wytrzymałości takiego betonu w pierwszej dobie jest wolniejszy, ale ponieważ stosunek w/s może być zmniejszony przy mniejszej ilości wysoko reaktywnego cementu portlandzkiego, ten spadek jest zrekompensowany w dalszym procesie twardnienia. Wreszcie, pewna redukcja ilości cementu i zastąpienie go mniej reaktywnym materiałem prowadzi w większości mieszanek BWW do redukcji niezbędnej domieszki superplastyfikatora potrzebnego do uzyskania odpowiedniej urabialności, a zatem zmniejsza koszty.

Technologia wytwarzania superplastyfikatorów notuje nieprzerwany postęp i podobnie jak dzisiejsze domieszki o tym działaniu są wielokrotnie bardziej skuteczne niż pierwsze plastyfikatory z lat 80., tak i w przyszłości można oczekiwać dalszej poprawy efektywności, zwłaszcza przy lepszym wyjaśnieniu podstawowego działania superplastyfikatorów na ziarna cementu. Zgodnie z obecnymi kierunkami usprawniania superplastyfikatorów, można oczekiwać dalszego ich różnicowania pod względem towarzyszącego działania i skuteczności w czasie. Nie ulega wątpliwości, że ilość superplastyfikatora dodawanego w przyszłości, z uwzględnieniem wymagań urabialności, wytrzymałości czy trwałości, będzie stopniowo malała, dzięki wyższej efektywności działania w określonym przedziale właściwości mieszanki betonowej.

Choć przewidywania rozwoju technologicznego na masową skalę są dość ryzykowne, zwłaszcza że różne czynniki gospodarcze czy nawet polityczne grają tu rolę, można jednak w analogii do wielu dziedzin działalności inżynierskiej przewidywać, że praktyczny rozwój technologii betonów wysokowartościowych będzie jeszcze przez wiele lat wyprzedzać rozwój wiedzy wyjaśniającej obserwowane nowe zjawiska.

Bez większego ryzyka można natomiast postawić prognozę w kwestii – wytrzymałość czy trwałość. Sprawa wydaje się być przesądzona, że głównym motorem postępu i rozwoju rynku w betonach nowych generacji będzie trwałość. Przybliżone oceny do-



Fot. 1. Lekkie konstrukcje hal o siatce słupów do 20 x 40 m: sprężone słupy, dźwigary i płatwie z betonów B70 do B90, wg [3]

konywane dzisiaj pozwalają stwierdzić, że przyczyny wytrzymałościowe skłaniają za ledwie w najwyżej 10 procentach do stosowania BWW w konstrukcjach, natomiast względy trwałościowe wskazują na racjonalność użycia nowych generacji betonów w 25-30 procentach współczesnych zastosowań.

Można oczekiwać, że obydwa te wskaźniki procentowe w przyszłości będą rosły, czyli że nauczymy się lepiej wykorzystywać zarówno walory wytrzymałościowe nowych betonów, jak i ich zdecydowanie większą trwałość.

Nie jest powszechna wiedza, że w przeliczeniu na 1 MPa wytrzymałości betonu na ściskanie w elemencie konstrukcyjnym o określonych wymaganiach, w wypadku zastosowania betonu wysokowartościowego stosuje się zarówno mniej cementu, jak i znacznie mniej kruszywa. Pozostaje więc tylko racjonalnie ten beton wykorzystywać w konstrukcjach.

Betony wysokowartościowe otwarty już obecnie nową erę prefabrykacji. Zmniejszenie przekrojów pozwoliło na radykalne zmniejszenie ciężaru elementów i zwiększenie ich rozpiętości lub długości. Najwyższą efektywność uzyskuje się w konstrukcjach z elementów sprężonych zarówno strunobetonowych (fot. 1 i 2), jak i kablobetonowych (fot. 3). Niewątpliwie będą rozwijane zastosowania także w konstrukcjach monolitycznych, gdzie nie tylko w klasycznych już zastosowaniach – słupach wysokich szkieletów lub dźwigarach mostowych – lecz także w wielu innych elementach, z fundamentami włącznie, w budownictwie miejskim, przemysłowym i komunikacyjnym wykorzystywane będą walory wytrzymałościowe i trwałościowe.

Trzeba podkreślić, że coraz szerzej wprowadzane zasady zrównoważonego rozwoju do budownictwa wymagają zmiany podejścia do stosowania materiałów i metod wznoszenia, a przede wszystkim rachunku

ekonomicznego rozciągniętego na cały okres użytkowania budynku (określenie skrótowe LCA – Life Cycle Analysis lub LCC – Life Cycle Cost).

Wnioski z tych nowoczesnych analiz będą stymulowały „rynek trwałości” w budownictwie, a w konstrukcjach betonowych w szczególności. Betony wysokowartościowe stają się istotnym środkiem do celu w wypełnianiu wymagań określanych skrótowo 3xE, czyli Ekonomia + Energia + Ekologia.

### Prognozy długoterminowe

Na dłuższą metę prognozowanie rozwoju technologii betonu i rozwoju konstrukcji z betonu ma oczywiście charakter bardziej ogólny. Najbardziej potocznie to określając – przewiduje się, że beton będzie silnie ewoluował od materiału o niskim zaawansowaniu technologicznym (low-tech) do grupy materiałów zaawansowanych (high-tech). Będzie to obejmować nie tylko dobór składników i inne obszary ściśle technologiczne, ale i metody badania właściwości materiału, a także precyzyjniejsze metody projektowania konstrukcji betonowych.

Dosyć zgodne są przewidywania w odniesieniu do ewolucji w składzie cementów portlandzkich, polegającej na rosnącym udziale belitu. Uważa się, że cementy będą zawierać więcej C2S i mniej C3S oraz zapewne więcej C4AF niż C3A. Udział C3A nie będzie potrzebny do pobudzenia wczesnej wytrzymałości betonu.

Jednocześnie, betony wysokowartościowe będą wykonywane jako bardziej stabilne co do właściwości, czyli mniej wrażliwe na zmienność jakości cementu i superplastyfikatora, a także na wpływ temperatury otoczenia. Oczekuje się także ograniczenia wpływów niekorzystnych dla konstrukcji, czyli zmniejszenia skurczu, pęcznienia i intensywności wydzielania ciepła hydratacji.

Udoskonalenia technologii układania i za-





Fot. 2. Szkielety budynków przemysłowych i parkingów – do 20 m szerokości, bez wewnętrznych podpór

gęszczenia betonu, a więc betony samozagęszczające się, różne formy prasowania i próżniowania lub betonowania w formach selektywnie przepuszczalnych, pozwolą na usprawnienia realizacyjne, ale przede wszystkim na dalszą poprawę jakościową konstrukcji z betonu, w tym zwłaszcza ich trwałości.

Przechodzenie na szersze zastosowanie betonów BBWW lub BUWW z rozproszonym zbrojeniem pozwoli na zdecydowane zmniejszenie grubości elementów, zwłaszcza płytowych i powłokowych. Wynika to nie tylko z wytrzymałości betonu, ale także z możliwości rezygnacji z tradycyjnego zbrojenia, a w konsekwencji z grubej otuliny wymaganej przy jego stosowaniu. Prowadzi to do zupełnie nowej jakości konstruowania elementów z betonu. Gotowe suche mieszanki fibrobetonów (np. Ductal) pozwolą wyeliminować okazje do błędów technologicznych, przy zachowaniu stosunkowo prostych zasad technologii przygotowania mieszanek i betonowania. Nowe generacje betonów wymagają intensywnych badań, sięgających coraz głębiej w mikrostrukturę, a nawet nanostrukturę materiału, aby innowacje były świadome i konkretnie ukierunkowane. Stanowi to wielkie wyzwanie dla nauki.

Także bieżąca kontrola jakości we wszystkich fazach produkcji i stosowania betonu musi sięgać po nowe procedury. Już bowiem z chwilą upowszechniania BWW i sięgania po BBWW stwierdzono, że dotychczasowe metody badań, począwszy od podstawowego badania wytrzymałości na ściskanie, są niewygodne, a nawet prowadzące do błędnej oceny. Początek tym wątpliwościom dał gwałtowny charakter zniszczenia próbek, charakterystyczny dla materiałów bardzo kruchych, a także bardzo duża wrażliwość na sposób przekazania siły w maszynach wytrzymałościowych. Wysokie wytrzymałości sprawiły także, że rozrzuty wyników związane z

różną techniką badania sięgały znacznych wartości. Powstał zatem problem ujednoczenia sposobu badania, tak aby ich przebieg był bezpieczny dla obsługi laboratoryjnej, a wyniki z różnych ośrodków były lepiej porównywalne. Podobne zmiany są konieczne w badaniach mieszanki betonowej i innych właściwości betonu stwardniałego.

Obszary zastosowań w toku upowszechniania betonów nowych generacji obejmą zapewne wszystkie dotychczasowe obszary stosowania żelbetu i betonu sprężonego. Dla betonów sięgających grup BWW i BBWW podaje się najczęściej następujące elementy konstrukcji:

- nawierzchnie dróg i lotnisk
- płyty i dźwigary główne mostów
- dźwigary stropów i dachów dużych rozpiętości
- posadzki przemysłowe
- słupy budynków wysokich i budynków przemysłowych
- słupy zespolone formowane w rurach stalowych
- cienkie płyty dachowe i stropowe oraz powłoki
- wirowane rury i słupy energetyczne lub telekomunikacyjne

oraz częściowo pozakonstrukcyjne zastosowania:

- panele elewacyjne
- meble parkowe i ogrodowe
- poręcze i ogrodzenia.

Zastosowania betonów klasyfikowanych jako BUWW (od 200 MPa) mają za wzór sławną kładkę w Sherbrooke w Kanadzie. Podawane są jednak pewne obszary szczególne, gdzie w najbliższej przyszłości należy oczekiwać wdrożeń:

- elementy o wymaganej szczególnej odporności na ścieranie, uderzenia lub wybuchy
- drzwi ognioodporne lub inne ruchome zabezpieczenia
- osłony do transportu lub składowania szczególnych odpadów
- zbiorniki o specjalnych zastosowaniach
- łożyska mostów, zakotwienia i bloki końcowe odpowiedzialnych elementów sprężonych
- elementy obiektów miejskich, przemysłowych i komunikacyjnych, wymagające szczególnej redukcji przekrojów lub narażone na wyjątkowe wpływy mechaniczne lub chemiczne

- formy i tory naciągowe w wytwórniach prefabrykatów.

### Podsumowanie

Rozwój technologii betonów i efektywność zastosowań konstrukcyjnych betonów nowych generacji są współcześnie badane i oceniane znacznie bardziej globalnie niż – jak do niedawna – przez pryzmat kosztorysu budowlanego. Ocena kompleksowa obejmuje wszystkie etapy – od pozyskiwania lub produkcji składników (środowisko, energia), przez problemy produkcyjne mieszanek betonowych i ich reologii, przez najpełniej rozpoznane korzyści wytrzymałościowe i redukcję zużycia materiałów, aż do oceny trwałości i kosztów utrzymania, a nawet rozbiórki i recyklingu.

O ile zastosowania BWW i samozagęszczającego się BWW to już dzień dzisiejszy w wielu krajach, o tyle zastosowania najwyższych jakościowo betonów (BBWW i BUWW) nie będą zapewne zbyt powszechne. Są to jednak materiały do szczególnie odpowiedzialnych lub technicznie zaawansowanych elementów konstrukcji, o wyjątkowych wymaganiach w zakresie wytrzymałości lub trwałości.

Betony nowych generacji otwarty bardzo duże obszary badawcze zarówno w badaniach podstawowych – dotyczące fizyko-chemii procesów i struktury materiału, jak i na polu praktycznej technologii betonu. Powstały także nowe jakościowo możliwości w projektowaniu konstrukcji z betonu, których pełnych efektów nie sposób jeszcze przewidzieć.

prof. Andrzej Ajdukiewicz  
Politechnika Śląska

### Literatura

- [1] Aitcin P.-C.: *High-Performance Concrete*. E&FN SPON, London 1998, s. 591
- [2] Nawy E. G.: *Fundamentals of High-Performance Concrete*. J. Wiley, New York-Toronto 2001, s. 441
- [3] *Materiały informacyjne Ergon Real Estate Poland*.



Fot. 3. Belki kablabetonowe z betonu B60 w ramowym moście zespolonym (projekt polskich inżynierów zrealizowany w Austrii)