

Technologia betonu za progiem XXI wieku

Wprowadzenie

Beton jest obecnie najważniejszym materiałem konstrukcyjnym w budownictwie. Od innych odróżnia go to, że jego właściwości są indywidualnie kształtowane poprzez odpowiedni do stawianych wymagań dobór składników, składu oraz metod wykonania bezpośrednio przez inżynierów budownictwa. Kluczowe znaczenie dla jakości wyrobów, elementów i konstrukcji z betonu ma więc jego technologia, zwłaszcza ze względu na ich różnorodność i wzrost wymagań im stawianych oraz różnorodność stosowanych składników betonu i wprowadzanie nowych ich rodzajów. Pod pojęciem technologia betonu rozumie się wiedzę naukową o kształtowaniu właściwości betonu odpowiednio do wymagań konstrukcyjnych, trwałościowych i ekologicznych uzupełnioną o doświadczenia praktyczne z wykonywania i eksploatacji konstrukcji i wyrobów z betonu. Współcześnie technologię betonu wiąże się z inżynierią materiałową, a więc postrzeganiem materiału (betonu) poprzez cztery aspekty: strukturę, właściwości, technologię i cechy użytkowe. Wiedza w zakresie technologii betonu obejmuje szeroką problematykę, w tym przede wszystkim: (1) wpływ właściwości składników i składu betonu na jego właściwości, (2) metody optymalnego do stawianych wymagań projektowania betonu, (3) metody i środki techniczne produkcji i wykonania betonu przy wytwarzaniu konstrukcji, prefabrykatów i wyrobów z betonu oraz ich wpływ na właściwości betonu, (4) pielęgnacja betonu w zależności od warunków jego dojrzewania i jej wpływ na właściwości betonu, (5) utrzymanie właściwości betonu przez cały okres jego eksploatacji na wymaganym poziomie (diagnostyka i naprawy) oraz (6) wpływ na środowisko składników betonu, betonu i procesów jego wytwarzania. Ważnym aspektem zdobywania wiedzy naukowej i praktycznej w zakresie technologii betonu jest także opracowanie i stosowanie odpowiednich metod badania właściwości betonu, zwłaszcza w aspekcie oceny jego trwałości.

Obserwując historię rozwoju technologii betonu, można stwierdzić, że przebiega ona głównie ewolucyjnie i rzadko występują w niej przełomowe momenty. Takim momentem w latach 70 ubiegłego wieku było wprowadzenie do stosowania superplastyfikatorów, skutkujące możliwością szerokiego kształtowania właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu, w tym uzyskiwania betonów wysokowartościowych. Poza tym zachodzące zmiany miały charakter kumulatywny, tzn. postęp naukowy i techniczny opierał się na stałym rozwoju bazy wiedzy i doświadczenia, osiągnięcie określonego poziomu otwierało możliwości do dalszego wzrostu, a postęp techniczny często nawet nie wymagał pełnej znajomości praw naukowych.

W wyniku tego zmian w technologii nie można przypisać do konkretnych osób, koncepcji czy faktów. Dzięki publikacjom i materiałom z zainicjowanego w 2000 roku cyklu konferencji pod ogólną nazwą DNI BETONU można jednak prześledzić zmiany w technologii betonu, jakie zaszły w XXI wieku, tak w Polsce jak i na świecie.

Technologia betonu wczoraj, na progu nowego millennium

Głównym celem pierwszej konferencji cyklu pod tytułem „Beton na progu nowego millennium” było przedstawienie i ocena betonu jako podstawowego materiału konstrukcyjnego o ogromnym potencjale architektonicznym. Przy tej okazji kompleksowo podsumowano stan wiedzy i doświadczeń praktycznych w zakresie technologii betonu oraz przeanalizowano kierunki, szanse i zagrożenia dalszego jej rozwoju.

Koniec XX wieku to okres szybkiego rozwoju technologii betonu, a jego symbolem stał się najpierw beton wysokiej wytrzymałości, a następnie wysokowartościowy. Dzięki temu realizowane były coraz bardziej skomplikowane konstrukcje, a beton śmiało wkroczył w obszary, gdzie dotychczas nie był stosowany. Wprowadzono do stosowania nowe materiały, w tym zwłaszcza domieszki do betonu oraz pył krzemionkowy. Stymulowało to konieczność prowadzenia intensywnych badań podstawowych i stosowanych w zakresie technologii betonu, a zwłaszcza badań materiałowych umożliwiających racjonalne kształtowanie właściwości betonu w zależności od jego składu i właściwości składników. Ugruntował się wtedy pogląd, że projektowanie betonu należy prowadzić ze względu na wymagania wytrzymałości i trwałości, a trwałość jest pojęciem względnym i należy ją odnosić do konkretnych warunków ekspozycji betonu i przewidywanego czasu użytkowania. W takim podejściu trwałość staje się często parametrem dominującym nad wytrzymałością, gdyż w wielu konstrukcjach narażonych na działanie środowiska wymagania wytrzymałości łatwiej spełnić niż wymagania trwałości. Wcześniej podejście takie nie było oczywiste; wyższą wytrzymałość utożsamiano wprost z wyższą trwałością betonu, rozumianą przy tym w sposób uniwersalny, a postęp w technologii betonu wyrażano poprzez wzrost jego wytrzymałości. Podejście do projektowania betonu z uwzględnieniem wymagań trwałości betonu w konstrukcji znalazło swój wyraz w normie EN 206-1, którą wprowadzono w Europie w 2000 roku, a w Polsce w 2003 roku.

Pod koniec XX w. dostępna stała się szersza gama coraz nowocześniejszych materiałów, w tym: cementów o większym stopniu przemiału dających szybszy przyrost wytrzymałości, cementów

przeznaczonych do betonów wysokowartościowych, z dodatkami aktywnymi i odpornych na agresję chemiczną, różnych rodzajów domieszek modyfikujących wybrane właściwości mieszanki betonowej i betonu, w tym nowych generacji superplastyfikatorów znacząco zmniejszających ilość wody, dodatków mineralnych pozwalających zmniejszyć ilość cementu w betonie oraz uzyskać beton o dużej wytrzymałości i szczelności. Wspomniane wyżej intensywne badania materiałowe przyczyniły się do uzyskania wiedzy o roli, mechanizmach i efektach stosowania różnych składników betonu, co pozwalało na racjonalne kształtowanie właściwości betonu w odniesieniu do konkretnych wymagań.

Jak wiadomo, o wytrzymałości i trwałości betonu decydują nie tylko dobre materiały i odpowiednio dobrany skład mieszanki, ale również prawidłowa technologia procesów jego wykonania i pielęgnacji. W tym zakresie dysponowano odpowiednią wiedzą, metodami i środkami technicznymi do produkcji, transportu, układania, zagęszczania i pielęgnacji betonu zarówno w prefabrykacji, jak i na placu budowy. Zdawano sobie sprawę z zagrożeń, jakie płyną dla jakości betonu w wyniku złego wykonania procesów technologicznych. Zwracano jednak powszechnie uwagę, że problemem istotnie wpływającym na wdrażanie nowych generacji betonów i konstrukcji z nich wykonywanych jest poziom wykształcenia pracowników i ich niska świadomość technologiczna. Zauważano w związku z tym, że oprócz działań edukacyjnych i wzmoczonej kontroli potrzebne są działania w celu uzyskania betonów możliwie odpornych na potencjalne błędy w procesach technologicznych, co stanowiło stymulację do opracowania tzw. betonów autotechnologicznych, z których najbardziej znanym rozwiązaniem jest obecnie często stosowany, a wówczas wdrażany beton samozagęszczalny.

Koniec XX w. to narodziny i stopniowe wdrażanie do stosowania idei zrównoważonego rozwoju. Termin ten oznacza taki rozwój, który zaspokaja potrzeby obecne, nie ograniczając możliwości ich zaspokojenia w przyszłości. Sprostanie wyzwaniom zrównoważonego rozwoju w zakresie technologii betonu jest szczególnie ważne. Z jednej strony problemem jest skala stosowania betonu. Wiąże się z nią koszty środowiskowe pozyskiwania surowców, a zwłaszcza produkcji cementu (klinkieru). Z drugiej strony, beton ma ogromny potencjał jako materiał zrównoważony. Nie wywiera negatywnego wpływu na środowisko, konstrukcje z betonu są w zasadzie trwałe, możliwe jest wykorzystanie do betonu materiałów odpadowych i z recyklingu. Już wtedy sygnalizowano potrzebę stosowania analizy cyklu życia (LCA) konstrukcji jako elementu oceny rozwiązań materiałowych i technologicznych. W świetle wykonywanych wtedy analiz, beton w porównaniu do innych materiałów budowlanych jest oceniany jako materiał ekologiczny, jednak o niewyczerpanym potencjale w tym zakresie. Światowe trendy w rozwoju technologii betonu dotarły do Polski z opóźnieniem spowodowanym długotrwałym kryzysem gospodarczym lat 80. i 90.; przez ten czas inwestycje budowlane były ograniczone, co nie sprzyjało wdrażaniu nowoczesnych rozwiązań. Kryzys gospodarczy w połączeniu z kryzysem zaufania społecznego szczególnie mocno uderzył w produkcję prefabrykatów z betonu. Ostatnie lata przed millennium to jednak okres szybkiego nadrobienia straconego dystansu. W tym czasie dysponowaliśmy dobrymi materiałami, w tym cementami i domieszkami, znaczącą wiedzą teoretyczną na temat kształtowania właściwości betonu oraz doświadczeniem w realizacji typowych konstrukcji. Technologia betonu w kraju z pewnym opóźnieniem absorbowwała światowe osiągnięcia technologiczne, w tym zwłaszcza te, związane z wykorzystaniem betonów wysokowartościowych. Na osiągnięcia technologii betonu patrzyliśmy głównie przez pryzmat realizacji zagranicznych. Dominującą tematyką krajowych badań było kształtowanie właściwości betonów wysokowartościowych; w tym badania spoiw cementowych, efektów działania dodatków i domieszek oraz trwałości betonu. Dostrzegane było znaczenie betonu jako materiału ekologicznego, wyrażane głównie poprzez jego trwałość i stosowanie materiałów odpadowych. Badania naukowe były pro-

wadzone zwykle w skali makro, metodami normowymi, w ścisłym nawiązaniu do głównych kierunków badań światowych, jednak z wykorzystaniem krajowej bazy materiałowej i doświadczeń. Pod względem praktycznym istotny problem stanowiły normy i dokumenty odniesienia dotyczące technologii betonu, w dużym stopniu tkwiące korzeniami w realiach technicznych i ekonomicznych lat 70. XX w., co nie ułatwiało wdrażania nowoczesnych rozwiązań. Problemem były również środki techniczne, w dużej części przestarzałe i o znacznym stopniu zużycia, konserwatywne podejście do technologii betonu i budząca niepokój niska świadomość technologiczna producentów i wykonawców betonu. W połączeniu z zastojem inwestycyjnym, wszystko to utrudniało praktyczne stosowanie nowych technologii i rodzajów betonów. W tym miejscu można podać jako przykład poziomu technologicznego fakt, że w tym czasie 70% produkcji betonu towarowego było klasy C20/25 lub niższej.

Technologia betonu dzisiaj, za progiem nowego millennium

Śledząc tematykę kolejnych edycji konferencji Dni Betonu, można stwierdzić, że początek XXI w. to okres przyspieszonego rozwoju technologii betonu, a do praktyki wdrażane są coraz bardziej zaawansowane materiały, betony i technologie. Coraz większy jest poziom wiedzy materiałowej i technologicznej, co pozwala lepiej wykorzystać posiadane materiały i uzyskać lepszy beton, dobrze dostosowany do rosnących wymagań konstrukcji. Mając do dyspozycji nowoczesne środki techniczne, pozwalała to realizować bardzo skomplikowane, innowacyjne projekty. Betony nowej generacji, wzbudzające duże emocje jeszcze kilka lat temu, są wdrażane do praktyki, stając się stopniowo powszednimi. Znakiem postępu technologicznego może być normowe podejście do betonu wysokiej wytrzymałości. W EN 206-1 z 2000 roku betony klasy wyższej niż C50/60 były wyróżnione jako betony wysokiej wytrzymałości, w EN 206 z 2014 roku nie wykazano już tych jako betonów o szczególnych właściwościach. Zniwelowany został dystans pomiędzy światowym i krajowym poziomem technologii betonu, tak więc nie ma już potrzeby, jak wcześniej, omawiać tych kwestii osobno. Wciąż jednak dość często spotykamy się z wadliwą technologią i zaniechaniami przy wykonywaniu prostych betonów i konstrukcji, a konserwatywny biurokratyczny utrudnia wdrożenie osiągnięć technologii betonu do praktyki.

Początek XXI w. to okres rosnącego wpływu na politykę globalną idei zrównoważonego rozwoju, która obecnie w bardzo znaczącym stopniu kształtuje rozwój techniczny, gospodarczy i cywilizacyjny świata, w tym oczywiście również rozwój technologii betonu. Wytrzymałość na ściskanie betonu nie jest zwykle już eksponowana jako symbol postępu technologicznego, natomiast coraz bardziej istotnym w technologii betonu staje się aspekt ekologiczny. Dążeniem jest beton o dobrze zdefiniowanej użyteczności, a więc właściwościach optymalizowanych do danego zastosowania. Zdecydowanie większą uwagę zwraca się na użyteczność betonu (zwykle wyrażaną jako jego trwałość) i podkreśla się proekologiczne efekty technologii betonu, choć często efekty te nie są jednoznacznie i ilościowo określone. Postulowane jest podejście do projektowania betonu, w którym obok wymagań wytrzymałości i trwałości uwzględnia się wymagania ekologiczne. Determinuje to główne kierunki rozwoju technologii betonu: zwiększenie trwałości betonu, zmniejszenie emisji CO₂ i zużycia pierwotnych materiałów poprzez wykorzystanie do produkcji cementu i betonu różnych materiałów odpadowych i z recyklingu oraz stosowanie technologii przyjaznych środowisku. Coraz większe skomplikowanie konstrukcji betonowych pracujących w złożonych warunkach środowiskowych stawia nowe wyzwania przed projektantami i wykonawcami betonu w zakresie zapewnienia mu wymaganej trwałości. Prowadzone są więc intensywne badania w celu lepszego poznania mechanizmów agresywnego oddziaływania środowiska na beton oraz kształtowania odporności na nie betonu, znacząco zwiększa stan wiedzy w tym zakresie. Wymagania dla trwałości betonu, a w konsekwencji dla jego składników i składu definiuje się na podstawie analizy warunków środowisko-

wych pracy konstrukcji w połączeniu z przewidywanym czasem jej użytkowania. Powstają technologie betonów specjalnych odpornych na działanie środowiska, np. betonów wodoszczelnych czy odpornych na działanie siarczanów. Dąży się do opracowania szybkich metod badania i oceny trwałości betonu w warunkach możliwie adekwatnych do rzeczywistych warunków pracy konstrukcji (w tym z uwzględnieniem jej eksploatacyjnego obciążenia). Zwraca się przy tym większą uwagę na to, że o uzyskaniu trwałej konstrukcji decyduje również technologia wykonania betonu, w tym zwłaszcza jej optymalizacja ze względu na warunki dojrzewania betonu. Potwierdzają to liczne przykłady udanych realizacji skomplikowanych konstrukcji w bardzo trudnych warunkach wykonania.

Intensywnie zwiększa się baza materiałowa betonu. Dzięki temu uzyskuje się większe możliwości w zakresie kształtowania właściwości betonu oraz efekty proekologiczne. Rozwój ten odbywa się poprzez modyfikowanie i doskonalenie dotychczas stosowanych materiałów, zwłaszcza cementów i domieszek, oraz wdrażanie nowych materiałów, zwłaszcza materiałów odpadowych, z recyklingu i nowych generacji domieszek.

Rozwój cementów stymulowany jest przede wszystkim koniecznością zmniejszenia negatywnego wpływu ich produkcji na środowisko. Koncentruje się on na jak najszerszym stosowaniu nieklinkierowych dodatków do cementu, na wdrażaniu nowych rodzajów cementów o nowym składzie oraz produkcji spoiw alternatywnych w stosunku do cementu (klinkieru) portlandzkiego. W kraju uwagę zwraca się na rozszerzenie zakresu stosowanych dodatków mineralnych w oparciu o posiadane zasoby (żużel, kamień wapienny, popioły lotne, w tym wapienne i fluidalne), a także stosowanie cementów z domieszkami, np. cementów napowietrzających beton. Podjęte działania skutkują stosowaniem cementów o coraz większej miakkości, coraz większej zawartości dodatków mineralnych i nowych ich kompozycjach (w tym cementy CEM II i CEM VI o dużej ilości nieklinkierowych składników).

Postęp w zakresie domieszek do betonu jest na tyle istotny dla rozwoju betonu i jego technologii, że zasługuje na osobne potraktowanie. Tutaj należy podkreślić, że stosowanie domieszek stało się działaniem rutynowym i coraz trudniej spotkać beton bez ich dodatku. Istniejące domieszki są stale doskonalone, wprowadzane są nowe ich rodzaje o specyficznych efektach działania (np. domieszki tiksotropowe). Postęp w zakresie chemii polimerów oraz nanotechnologia pozwala na kształtowanie budowy polimerów ze względu na pożądane efekty ich działania w betonie, dzięki czemu dostępne są domieszki o coraz większej efektywności i dopasowane do specyficznych potrzeb i wymagań. Wszystko to rozszerza możliwości technologiczne, ułatwiając prawidłowe wykonanie betonu w coraz trudniejszych warunkach oraz umożliwiając modyfikowanie i kształtowanie struktury betonu w kierunku uzyskania betonu użytecznego oraz betonu o specjalnych właściwościach.

Znakiem szczególnym technologii betonu na początku XXI w. jest dążenie do stosowania materiałów odpadowych z bardzo różnych gałęzi przemysłu i gospodarki oraz z recyklingu. Niektóre z nich są znane i stosowane od lat (np. popioły lotne, żużle), ale ich potencjał wciąż nie jest wyczerpany i mogą być wykorzystane efektywniej. Inne dotychczas były uznawane za nieprzydatne (np. popioły lotne wapienne), ale postęp w zakresie cementów i domieszek do betonu otwiera możliwość ich szerszego stosowania. Stosowanie materiałów odpadowych daje możliwość zmniejszenia zużycia cementu lub kruszywa pochodzenia naturalnego. Jednak często potencjalne korzyści

z ich stosowania do betonu związane są przede wszystkim z możliwością redukcji uciążliwych dla środowiska składników, gdyż beton z nich wykonany z trudem osiąga akceptowalne właściwości. Można przy tym zauważyć, że pomimo licznych badań szersze zastosowanie praktyczne znalazły, jak dotychczas, nieliczne materiały odpadowe. Szczególnie znaczenie dla ochrony środowiska i technologii betonu ma recykling materiałów z rozbiernych konstrukcji. Stosowanie kruszywa z recyklingu, w tym zwłaszcza z konstrukcji betonowych, do produkcji pełnowartościowego betonu staje się kwestią krytyczną. Oprócz sposobu na użycie konstrukcji i wyeliminowanie konieczności składowania odpadu, chroni przed dewastacją obszary, gdzie znajduje się kruszywo, pozwala wykorzystać zasoby lokalne do produkcji materiałów i zmniejszyć obciążenie środowiska uciążliwym transportem kruszywa. Tematyka technologii i właściwości betonu z kruszywem z recyklingu jest jednak problematyczna i wydaje się nie rozwijać z intensywnością, na jaką zasługuje. Wprawdzie kruszywo z recyklingu z betonu jest stosowane z powodzeniem, skala jego zastosowania wciąż nie jest duża.

Nanotechnologia i nanomateriały są jednymi z najważniejszych trendów rozwoju początku XXI w., o trudnym do przecenienia (ale i ocenienia) potencjale technicznym i społecznym. Nie ominęły

one również technologii betonu, nanotechnologia jest np. stosowana w produkcji domieszek. Poza domieszkami, obecnie najczęściej stosowanymi nanomateriałami w betonie są nanocementy umożliwiające uzyskanie betonów samoczyszczących i redukcję NOx oraz nanokrzemionka umożliwiająca uzyskanie betonu o wyjątkowo szczelnej strukturze. W obu przypadkach zakres stosowania praktycznego nie jest jednak znaczący. Prowadzone są również wstępne badania efektów stosowania w betonie różnych nanomateriałów, w tym grafenu i jego pochodnych, wskazujące, że dzięki nim można nadać betonowi zupełnie nowe właściwości konstrukcyjne i architektoniczne, uzyskać możliwość monitoringu stanu betonu w konstrukcji oraz nadać mu zdolności do samonaprawy. Stosowanie nanomateriałów w betonie napotyka jednak szereg barier, z których najważniejsze są koszty, negatywny wpływ na zdrowie i trudności

z uzyskaniem mieszanki betonowej o akceptowalnej urabialności. Technologia produkcji, układania i zagęszczania mieszanki oraz pielęgnacji betonu nie zmienia się istotnie w czasie ostatnich lat. Wzrost jednak znacząco poziom techniczny i możliwości wytwórci betonu (w zakresie układów sterujących, systemów dozowania, kontroli ilości dodawanej wody i ochrony środowiska) oraz sprzętu wykonawców betonu (większa wydajność, trwałość i bezpieczeństwo użytkowania, dostosowanie do różnych betonów, zdalne sterowanie). Dzięki temu z sukcesem, choć nie bez pewnych problemów wdrożono do stosowania bardzo wymagające technologicznie betony wysokowartościowe, architektoniczne i samozagęszczalne. Co ciekawe, wg statystyk ERMCO w kraju wciąż stosunkowo rzadko stosuje się mieszanki betonu towarowego o konsystencji ciekłej (S4 i wyższej) – stanowią one nieco ponad 20% całej produkcji. Jest to wyraźnie mniej niż średnia europejska i może być uznane za przejaw konserwatywnego podejścia do wykonywania betonu oraz trudności w rozwiązaniu problemów technicznych, takich jak np. utrudnione pompowanie czy zwiększone parcie na deskowanie betonów o konsystencji ciekłej. Choć tradycyjna technologia procesów wykonania betonu może być uznana za obojętną dla środowiska, podejmowane są działania w celu minimalizacji jej wpływu na środowisko. Obejmują one stosowanie niskoenergetycznych i niskoemisyjnych środków tech-



foto: Archiwum autora



BRUK-BET®

Studnie Monolityczne

PERFECT 

System PERFECT to najnowsza technologia wytwarzania elementów dennych studni kanalizacyjnych z betonu.

Jej zaletą jest produkcja dennic o jednolitej, wysokiej klasie betonu z dowolną, indywidualną konfiguracją kinety, uwzględniającą ilość przyłączy, ich średnice, wysokości, kąty, spadki, a także rodzaje stosowanych rur.

www.bruk-bet.pl

Gwarancja
najwyższej
jakości.



nicznych, rozwiązań technologicznych umożliwiających redukcję odpadu i recykling niezużytej mieszanki oraz stosowanie betonów o specjalnie kształtowanych właściwościach. Na przykład: technologia betonu samozagęszczalnego ogranicza tak zużycie energii, jak i poprawia warunki pracy poprzez eliminację wibracji; technologia betonów o wysokiej wytrzymałości wczesnej eliminuje proces obróbki termicznej przy produkcji prefabrykatów sprężonych. Czynione są obiecujące próby uzyskania i wdrożenia eko-betonów, charakteryzujących się m. in. osiaganiem takiej samej wytrzymałości na ściskanie jak beton konwencjonalny, lecz przy mniejszej ilości spoiwa, intensywnym wykorzystaniem materiałów odpadowych i z odzysku oraz niskoenergetycznymi metodami wykonania. Takie betony, choć potencjalnie atrakcyjne, wymagają jeszcze starannych i systematycznych badań, gdyż mała ilość spoiwa przy relatywnie dużym stosunku w/c może skutkować obniżoną trwałością. Należy tutaj zwrócić uwagę, że czynione są pierwsze próby opracowania metod projektowania betonu konstrukcyjnego uwzględniających obok wymagań wytrzymałości i trwałości wymagania ekonomiczne (np. LCC) i ekologiczne (np. CF) wynikające z analizy cyklu życia (LCA) konstrukcji; umożliwiają one minimalizację obciążenia środowiska przez konstrukcję z betonu w trakcie jej życia.

Początek XXI w. w Polsce to okres intensywnych inwestycji budowlanych we wszystkich obszarach, ale zwłaszcza w drogownictwie i infrastrukturze, usługach, przemyśle i energetyce. Wpłynęły one stymulująco na poziom technologiczny producentów i wykonawców betonu. Dorobiliśmy się długiej listy krajowych realizacji konstrukcji z betonu, często spektakularnych na skalę światową, w trakcie których zastosowano innowacyjne rozwiązania w zakresie technologii betonu. Dzięki temu na konferencji Dni Betonu zwiększyła się liczba referatów prezentujących osiągnięcia krajowe, wypierając referaty prezentujące osiągnięcia światowe. Na szczególną uwagę zasługują tutaj betonowania ciągłe konstrukcji masywnych w bardzo trudnych i zmiennych warunkach, realizacje różnorodnych konstrukcji mostowych oraz infrastruktury podziemnej. Szczególnym sukcesem technologii betonu i betonu jest wejście w rynek nawierzchni drogowych, na którym do niedawna niepodzielnie panowały nawierzchnie asfaltowe. Szereg udanych realizacji dróg o skrajnie różnym obciążeniu ruchem wzbudził uznanie i zainteresowanie inwestorów nawierzchniami z betonu; w efekcie GDDKiA planuje budowę znacznej części nowych dróg ekspresowych i autostrad z betonu. Wyraźnie widoczny jest renesans prefabrykacji betonowej, która nie odzyskała swojej pozycji w budownictwie mieszkaniowym, ale znalazła swoje miejsce w pozostałych obszarach budownictwa, zwłaszcza w budownictwie przemysłowym oraz infrastruktury komunikacyjnej i energetycznej. To właśnie prefabrykacja, dzięki sterownym warunkom produkcji i możliwości ścisłej kontroli jakości pozwala na lepsze wykorzystanie potencjału tkwiącego w betonach wysokowartościowych, architektonicznych i samo-

zagęszczalnych. Istotnie poprawiono jakość wykonywanych wyrobów i elementów oraz zmniejszono energochłonność ich produkcji, przez co ich produkcja mniej obciąża środowisko. Dzięki modyfikacjom materiałowym, a zwłaszcza możliwości obniżenia stosunku w/c i stosowaniu cementów szybkowiązujących (a ogólniej stosowaniu betonów wysokowartościowych) w dużym stopniu wyeliminowano konieczność obróbki cieplnej. Beton samozagęszczalny pozwolił na ograniczenie stosowania uciążliwej wibracji, co pozwala na radykalną poprawę warunków pracy. Ze względu na konieczność uzyskania wysokiej wytrzymałości wczesnej coraz częściej sięga się po betony o wytrzymałości 80-100 MPa, a typowa wytrzymałość produkowanych prefabrykatów to 45-60 MPa. Pozwala to na zmniejszenie ciężaru elementów i ilości zbrojenia konstrukcyjnego, co również prowadzi do zmniejszenia innych elementów we wznoszonym obiekcie. Prefabrykacja daje również możliwość stosowania betonów ultrawysokowartościowych oraz z proszków reaktywnych, choć jest ona utrudniona koniecznością energochłonnej produkcji. Wyzwaniem jest zaprojektowanie i wykonanie efektywnych połączeń elementów przenoszących większe obciążenia przy zmniejszeniu powierzchni styku.

Ze względu na podejście do betonu poprzez LCA mocniej ujawnia się problem utrzymania betonu w konstrukcji i recyklingu betonu po okresie użytkowania konstrukcji. W zasadzie szczytymy się tym, że dobry beton nie wymaga działań związanych z utrzymaniem. Należy jednak zauważyć, że długotrwałe użytkowanie konstrukcji wymaga monitorowania jej stanu, warunków w których pracuje (czy nie ulegają one zmianom) i szybkiego reagowania, gdy wystąpią problemy. W zakresie monitorowania stanu konstrukcji oraz recyklingu betonu prowadzone są badania naukowe oraz dostępne są pierwsze doświadczenia praktyczne. Warunkiem rozwoju technologii betonu jest posiadanie odpowiedniej wiedzy i umiejętne jej przełożenie na zastosowanie praktyczne. Wszystkie ww. obszary technologii betonu są przedmiotem intensywnych badań naukowych, dominują przy tym badania materiałowe. Wyróżnić można dwa główne nurty takich badań. Pierwszy nurt to badania o charakterze poznawczym, ukierunkowane na: (1) identyfikację mechanizmów i efektów działania i współdziałania składników betonu, z dużym naciskiem na materiały odpadowe, domieszki do betonu i spoiwa, (2) identyfikację mechanizmów kształtowania struktury betonu i określenie wpływu mikrostruktury betonu na jego właściwości mechaniczne i odporności na działanie środowiska, (3) efekty stosowania różnych modyfikacji materiałowych i właściwości betonów specjalnych (betony wysokowartościowe i ultrawysokowartościowe, nanomateriały), (4) określenie wpływu czynników materiałowych i technologicznych właściwości betonu oraz (5) poznanie mechanizmów degradacji betonu, szczególnie w złożonych, wieloczynnikowych warunkach odpowiadających warunkom jego eksploatacji. Badania te prowadzone są na poziomie struktury i mikrostruktury betonu i wykonywane zaawansowanymi metodami, w tym również metodami nieniszczącymi (np. tomografia). Do tego nurtu można również włączyć działania związane z opracowaniem i wdrożeniem nowych metod badawczych, zwłaszcza w zakresie trwałości. Problemem wciąż pozostaje, jak implementować wiedzę zdobytą w laboratorium w skali nanostruktury i mikrostruktury betonu do praktyki betonu wykonywanego w skali makro w wytwórni prefabrykatów lub na budowie. Należy zaznaczyć, że praktyczne stosowanie nowych materiałów lub technologii wymaga systematycznych, reprezentatywnych i dobrze udokumentowanych wyników, co w prowadzonych badaniach nie zawsze jest regułą. Drugi nurt to badania stosowane, ukierunkowane na rozwiązanie konkretnych problemów technologicznych, efekty stosowania konkretnych produktów (rozwiązań materiałowych), wdrażanie do stosowania specjalnych rodzajów betonów, np. betonów wysokowartościowych, samozagęszczalnych, fibrobetonów, ekobetonów czy betonów wysokiej użyteczności oraz zaawansowane projektowanie betonu. Badania te dotyczą wybranych właściwości mieszanki betonowej i betonu, z dużym naciskiem na urabialność i trwałość, zwykle wykonywane są na poziomie ma-



foto: Archiwum autora

kro i wzbogacane analizą wybranych zagadnień na poziomie mikro. Badania te wprost odnoszą się do zagadnień praktycznych lub ich wyniki stosunkowo łatwo mogą być wdrożone do praktyki. Badania krajowe wpisują się w główne kierunki rozwoju technologii betonu i kierunki badań prowadzonych na świecie. Postęp wiedzy w zakresie technologii betonu uzyskany w ich wyniku jest znaczący (choć oczywiście wiele kwestii pozostaje niewyjaśnionych), jednak nie zawsze znajduje on satysfakcjonujące przełożenie na praktykę.

Na osobny komentarz zasługują badania materiałów odpadowych. Jest to popularny kierunek badań naukowych, których przełożenie na praktykę jest problematyczne. Badania dotyczą różnych, nieraz nieco egzotycznych materiałów. Z jednej strony są one potrzebne, gdyż przyczyniają się do weryfikacji możliwości stosowania tych odpadów w betonie. Z drugiej strony zauważalny jest brak wnikliwej analizy środowiskowej, ekonomicznej i technicznej możliwości i celowości stosowania odpadów przed rozpoczęciem badań. Zauważalne jest też niedocenianie aspektów technologicznych stosowania tych materiałów, zwłaszcza ich wpływu na urabialność mieszanki betonowej. Wiele badań prowadzonych jest przy tym w wąskim zakresie, niepozwalającym na określenie konsekwencji stosowania materiałów odpadowych dla właściwości, a zwłaszcza trwałości betonu.

Ogólnie można zauważyć, że badania naukowe zdecydowanie częściej koncentrują się na materiałach, betonach czy technologiach specjalnych, których zakres praktycznego stosowania jest ograniczony. Dużo badań dotyczy uzyskania betonów o ekstremalnych właściwościach, a ich znaczenie polega głównie na wyznaczaniu granic możliwości oraz wykazaniu osiągnięcia wysokiego poziomu technologicznego. Choć są to badania potrzebne i inspirujące, to generują czasem zainteresowanie nieproporcjonalnie duże do potencjału aplikacyjnego. Jednocześnie badania naukowe w zbyt małym stopniu podejmują problemy związane z projektowaniem, wykonaniem i trwałością typowych, „zwykłych” betonów. Naukowcy nie zawsze znając wystarczająco dobrze problemy i specyfikę praktyki, zwłaszcza aspekty technologiczne i ekonomiczne, podejmują niejednokrotnie programy badawcze o ograniczonym potencjale wdrożeniowym. Jednak implementacja praktyczna dobrze udokumentowanych osiągnięć naukowych również przebiega z oporami. Niedoceniane są osiągnięcia badawcze o bardzo dużym potencjale aplikacyjnym (beton samozagęszczalny to zaledwie 2% produkcji betonu towarowego). Problemem jest nie tylko tradycyjnie przywoływany konserwatyzm technologiczny producentów i wykonawców betonu. W obszarze świadomości technologicznej w ostatnich latach odnotowano zresztą dużą poprawę. Bariere trudniejszą do pokonania stanowią dokumenty odniesienia, wytyczne i specyfikacje, których twórcy zdają się nie dostrzegać ogromnego postępu w technologii betonu i w rozumieniu prawideł kształtowania właściwości betonu.

Ogromnym, milenijnym wyzwaniem dla producentów i wykonawców było wdrożenie do stosowania normy PN-EN 206-1 z jej późniejszymi nowelizacjami. Wprowadziła ona znaczące zmiany w podejściu do jakości betonu i tworzenia warunków do uzyskania trwałej konstrukcji z betonu (także w zakresie zapewnienia prawidłowości procesu produkcji i wbudowania betonu oraz zasad kontroli i kryteriów zgodności z założonymi właściwościami użytkowymi betonu). W zakresie technologii betonu nowością o istotnym znaczeniu dla projektowania betonu były wymagania dotyczące składu betonu wynikające z klas ekspozycji. Poprzez konieczność stosowania betonów wyższych klas o stosunkowo niskim stosunku w/c norma przyczyniła się do wyraźnej poprawy poziomu technologicznego producentów i wykonawców betonu – obecnie 70% betonów towarowych posiada klasę C25/30 lub większą. Norma wprowadziła również możliwość redukcji wymaganej ilości cementu w betonie poprzez stosowanie dodatków mineralnych typu II (współczynnik k), stosowanie wyższego niż wymagany stosunku w/c (efektywny stosunek w/c). Co istotne, poprzez koncepcje równoważnych właściwości użytkowych betonu i koncepcję kombinacji równoważnych właściwości możliwe jest stosowanie betonów o składzie odbiegającym od wymagań normowych

co do zawartości cementu i stosunku w/c oraz możliwość stosowania kombinacji cementu i dodatków mineralnych, które w całości mogą być uwzględnione w wymaganiach dotyczących maksymalnego stosunku w/c i minimalnej zawartości cementu. Umiejętne korzystanie z tych możliwości pozwala na uzyskanie znacznych korzyści ekonomicznych i ekologicznych. Stosowanie w praktyce betonów o specyficznym składzie, w tym ekobetonów; w praktyce jednak ich stosowanie jest wciąż problematyczne.

Technologia betonu jutro, co nas czeka w następnym dziesięcioleciu?

Jest to subiektywne spojrzenie autora na dalszy rozwój technologii betonu, nieodbiegające jednak w swej istocie od wizji prezentowanych w trakcie ostatnich i obecnej edycji konferencji DNI BETONU. Należy przy tym pamiętać, że o kierunkach rozwoju betonu zdecydują przede wszystkim uwarunkowania ekologiczne wynikające z konieczności spełnienia wymagań zrównoważonego rozwoju oraz uwarunkowania ekonomiczne, w dużej mierze determinowane przez politykę ekologiczną. Nie należy jednak oczekiwać gwałtownych zmian. Beton pozostanie najważniejszym materiałem konstrukcyjnym, można się spodziewać dalszego rozszerzenia się zakresu jego stosowania. Rozwój technologii betonu będzie przebiegać ewolucyjnie w kierunku uzyskania betonu zrównoważonego o dobrze zdefiniowanej użyteczności, o minimalnym wpływie na środowisko, betonu trwałego, wytrzymałego, ale nie kruchego, możliwie samoobsługowego w wykonaniu i użytkowaniu (betony samoczyszczące, samodiagnostujące, samoleczące) o szczególnych właściwościach (betony redukujące zanieczyszczenia). W projektowaniu betonu uwzględnić się będzie przede wszystkim wymagania użyteczności konstrukcji, prowadząc je w oparciu o podejście holistyczne, w którym wymagane właściwości betonu wynikają z warunków technicznych, ekonomicznych, ekologicznych i społecznych określonych na podstawie analizy cyklu życia konkretnej konstrukcji. LCA stanie się ważnym, być może decydującym aspektem przy projektowaniu betonu i technologii jego wykonania. Takie podejście umożliwi uzyskanie oczekiwanych efektów użytkowych przy minimalizacji obciążenia środowiska, choć prawdopodobnie nie przy minimalizacji kosztów.

Beton zrównoważony i użyteczny uzyskiwać się będzie poprzez równoczesne działania obejmujące dobór składników (cementy niskoemisyjne, spoiwa alternatywne, materiały z recyklingu, materiały odpadowe, wykorzystanie materiałów dostępnych lokalnie), składu (minimalizacja objętości zaczynu i ilości cementu, komponowanie kruszywa np. ze względu na optymalne uziarnienie bądź uzdatnianie lokalnie dostępnego kruszywa z recyklingu) oraz technologii wykonania konstrukcji (prefabrykacja – konstrukcja monolityczna, minimalizacja energochłonności i pracochłonności procesów, skrócenie czasu wykonania konstrukcji). Wszystko to skutkować będzie coraz większą indywidualizacją składników i składów betonu. Projektowanie użytecznego betonu będzie wymagać więc gruntownej wiedzy o składnikach, pozwalającej w zależności od ich właściwości zastosować odpowiedni ich rodzaj i kombinację oraz opracowania metod pozwalających na szybką ocenę właściwości i przydatności lokalnie dostępnych składników. Beton użyteczny będzie się musiał charakteryzować możliwością łatwego recyklingu po okresie użytkowania konstrukcji. Warto tutaj zasygnalizować kwestię ponownego recy-



foto: Archiwum autora



klingu betonu wykonanego z materiałów odpadowych i z recyklingu – na ile utylizacja materiałów odpadowych i z recyklingu w betonie stanowi jedynie przesunięcie problemu ich zagospodarowania na później? Czy powtórny recykling takiego betonu nie będzie jeszcze bardziej problematyczny?

Należy się spodziewać dalszego rozwoju istniejących materiałów, rozszerzania zakresu ich stosowania i wprowadzania nowych ich rodzajów. Prowadzone będą działania w celu zwiększenia wykorzystania materiałów odpadowych i z recyklingu. O ile w ogólności jest to kierunek słuszny, o tyle można zwrócić uwagę, że nie będzie to zadanie łatwe. Wystarczy fakt, że praktyczna aplikacja materiału nie jest możliwa bez zdobycia gruntownej wiedzy o jego właściwościach i wpływie na beton. Szczególne znaczenie będzie mieć większe wykorzystanie potencjału kruszyw z recyklingu, zauważalny już dzisiaj deficyt kruszyw naturalnych oraz rosnąca ilość likwidowanych konstrukcji wymuszająca będzie ich szersze zastosowanie. Pomimo badań nad spoiwami alternatywnymi dominującym spoiwem pozostaną klasyczne cementy powszechnego użytku. Wzrastać będzie stosowanie cementów z dodatkami mineralnymi (CEM II–CEM VI), choć tutaj problemem może być dostępność dobrej jakości dodatków mineralnych do cementu. Obiecującą koncepcją jest indywidualizacja produkcji cementów o składzie, uziarnieniu i właściwościach dopasowanych do wymagań technologicznych i trwałościowych określonej realizacji. Spodziewać się można również doskonalszych domieszek do betonu, o większej efektywności działania i technologiczności w stosowaniu, podobnie jak w przypadku cementów o indywidualizowanych właściwościach.

Jak już wspomniano wcześniej, nanotechnologia stanowi potencjalnie bardzo obiecujący kierunek rozwoju technologii betonu, ograniczony obecnie ze względu na kwestie ekonomiczne, zdrowotne oraz techniczne. W związku z tym wydaje się, że co najmniej w najbliższej przyszłości praktyczna aplikacja nanomateriałów bezpośrednio w betonie będzie bardzo ograniczona, choć nanotechnologia będzie stanowić ważny element modyfikacji składników betonu (nanocementy, domieszki i dodatki).

Beton użyteczny, ze względu na specyfikę składu i stosowanych składników, nie będzie betonem łatwym do wykonania, pomimo to nie należy się spodziewać istotnych zmian w zakresie technologii wykonania elementów i konstrukcji z betonu. Problemem może być brak wykwalifikowanej siły roboczej. Z jednej strony jest to czynnik ryzyka, z drugiej czynnik stymulujący wdrażanie istniejących technologii, takich jak betonu samozagęszczalnego, generujący większe zainteresowanie rozwojem prefabrykacji z betonu oraz stymulujący rozwój betonów autotechnologicznych. W dalszej perspektywie można się spodziewać większej automatyzacji i robotyzacji procesów wykonania betonu. Doty-

czyć to będzie w pierwszej kolejności prefabrykacji, ale dotrze również na plac budowy. W prefabrykacji można się spodziewać indywidualizacji produkcji prefabrykatów, obniżenia ich ciężaru oraz zwiększenia jakości wykończenia, co może zwiększyć zainteresowanie prefabrykacją w budownictwie mieszkaniowym.

Technologią, która obecnie budzi duże zainteresowanie i nadzieje, jest druk 3D betonu. Jest to technologia potencjalnie atrakcyjna, gdyż umożliwi za pomocą stosunkowo prostego urządzenia uzyskać element bądź wręcz całą konstrukcję o niemal dowolnym kształcie. Potencjał tej technologii w budownictwie może być realizowany głównie poprzez beton lub materiały betonopodobne o specjalnych właściwościach, obejmujących w sobie zdolność do łatwego ułożenia i do szybkiego wiązania i przyrostu wytrzymałości. Technologia ta znajduje się obecnie w fazie eksperymentalnej, znane są dość liczne przykłady wykorzystania druku 3D do wykonania elementów lub prostych obiektów z betonu. Doświadczenia te wykazały, obok korzyści, szereg bardzo istotnych problemów związanych również z technologią betonu do druku. Druk 3D zdaje się obecnie wchodzić w fazę pewnego rozczarowania, wciąż jednak prowadzone są intensywne prace badawczo-rozwojowe wskazujące na możliwość jego stosowania w prefabrykacji oraz do wykonania niektórych elementów konstrukcji. Wydaje się więc, że technologia ta znajdzie swoje miejsce w praktyce, nie wpływając jednocześnie na zakres stosowania tradycyjnych technologii.

W kwestii utrzymania i napraw konstrukcji betonowych konieczne jest opracowanie i wdrożenie systemów monitoringu stanu konstrukcji z betonu, starzenia betonu, rozwiązań umożliwiających diagnostykę betonu, bardziej efektywnych systemów naprawczych oraz technologii betonów samoleczących. Kompleksowe stosowanie takich rozwiązań może pozwolić w dalszej przyszłości na uzyskanie bezobsługowej konstrukcji z betonu.

Oczekiwać należy dalszego wzmocnienia więzi praktyki z nauką, zarówno w zakresie rozwiązywania bieżących problemów, wdrażania nowych rozwiązań, jak i wyznaczania kierunków badań o potencjale aplikacyjnym. Wzrastać również muszą kwalifikacje wykonujących beton, tak by ich poziom nadążał za postępem w technologii. Konieczne jest wypracowanie skutecznego systemu kształcenia, gdyż wykonywanie betonu o właściwościach kształtowanych w skali mikro, poddanego podczas dojrzewania oddziaływaniu bardzo złożonych układów różnorodnych obciążeń, wymaga od inżynierów nie tylko doświadczenia, ale odpowiedniej wiedzy, a od robotników dużo większej świadomości technologicznej.

Konferencja DNI BETONU od samego początku jawi się jako miejsce wymiany informacji w zakresie szeroko pojętego budownictwa z betonu i propagowania ogromnego potencjału tego materiału. Każda kolejna jej edycja stanowi nieocenione źródło wiedzy o dorobku poprzednich lat, możliwościach i problemach technologii betonu, jej osiągnięciach i kierunkach rozwoju. Dzięki temu powstała platforma łącząca przemysł, projektantów, wykonawców i naukowców, umożliwiająca prezentację doświadczeń praktycznych, rozważań teoretycznych i badań naukowych, stymulując rozwój technologii betonu tak, aby beton był materiałem na miarę swoich czasów – bezpiecznym, trwałym, ekonomicznym i przyjaznym dla środowiska, spełniającym oczekiwania i potrzeby społeczeństwa XXI wieku. Analiza kompleksowa wszystkich edycji DNI BETONU ukazuje obraz zmian w technologii betonu w ujęciu ogólnym, ale co szczególnie ważne, korzystnych zmian zachodzących w kraju. W dużym stopniu są one efektem synergii wynikającej z edukacyjnej misji konferencji DNI BETONU. Taką też misję konferencja będzie kontynuować w przyszłości, prezentując najnowsze osiągnięcia technologii betonu oraz wskazując potencjalne kierunki jej rozwoju, łącząc tradycję z przyszłością.

prof. Jacek Gołaszewski
Wydział Budownictwa Politechniki Śląskiej