

# Współczesna technologia betonu i kierunki jej rozwoju w aspektach technicznym, ekonomicznym i ekologicznym

Prof. dr hab. inż. Jacek Gołaszewski, Katedra Inżynierii Procesów Budowlanych i Fizyki Budowli, Politechnika Śląska w Gliwicach

## 1. Wprowadzenie

Beton jest obecnie najważniejszym materiałem konstrukcyjnym w budownictwie. Jego właściwości można łatwo kształtować, dostosowując je do specyficznych wymagań architektonicznych i konstrukcyjnych oraz warunków wykonania i eksploatacji, a przy tym jest materiałem relatywnie tanim i przyjaznym dla środowiska. Beton jest przy tym jedynym materiałem konstrukcyjnym, który jest samodzielnie projektowany i wykonywany przez inżynierów budownictwa. Efektywne stosowanie betonu jest więc ściśle związane z jego technologią i jej rozwojem. W artykule, opracowanym w oparciu o szeroki przegląd literatury (wybrane pozycje [1–19] zestawiono w bibliografii), przedstawiono główne kierunki rozwoju technologii betonu, uwzględniając aspekty techniczne, ekonomiczne oraz, co obecnie szczególnie ważne, ekologiczne, przeanalizowano ich potencjał wdrożeniowy.

## 2. Technologia betonu i główne tendencje jej rozwoju

Technologia betonu zajmuje się problematyką kształtowania struktury i właściwości betonu odpowiednio do wymagań konstrukcyjnych i użytkowych, procesami produkcji betonu i wykonania z niego konstrukcji, elementów i wyrobów oraz ich eksploatacją w zakresie diagnostyki i ewentualnie napraw. Na pierwszy plan wsuwają się następujące zagadnienia:

- wpływ właściwości składników i składu betonu na jego właściwości,
- optymalne do stawianych wymagań projektowanie składu betonu,
- metody i środki techniczne produkcji i wykonania betonu przy wytwarzaniu konstrukcji, prefabrykatów i wyrobów z betonu oraz ich wpływ na właściwości betonu,
- pielęgnacja betonu w zależności od warunków jego dojrzewania i jej wpływ na właściwości betonu,
- utrzymanie właściwości betonu przez cały okres jego eksploatacji na wymaganym poziomie (diagnostyka i naprawy),

- wpływ na środowisko składników betonu, betonu i procesów jego wytwarzania.

Ważnym zadaniem związanym z technologią betonu jest opracowanie odpowiednich metod badania i kontrolowania właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu, zwłaszcza w aspekcie oceny jego trwałości. Postęp w technologii betonu pozwala na coraz lepsze wykorzystanie potencjału i możliwości materiałów wchodzących w skład betonu, skuteczne kształtowanie właściwości betonu w celu spełnienia stawianych mu coraz trudniejszych wymagań oraz wykonywanie betonów w trudnych warunkach technicznych. Stosowane są nowe materiały, betony i technologie.

Jak wiadomo, obecnie największy wpływ na politykę globalną ma idea zrównoważonego rozwoju, która zwłaszcza w krajach rozwiniętych determinuje kierunki rozwoju technicznego we wszystkich ważnych gałęziach gospodarki, w tym oczywiście również w budownictwie. Rozwój technologii betonu jest również stymulowany przede wszystkim przez uwarunkowania ekologiczne wynikające z konieczności spełnienia wymagań zrównoważonego budownictwa oraz uwarunkowania ekonomiczne, w dużej mierze również wynikające z wymagań ekologicznych. Dąży się ku temu, aby:

- beton charakteryzował się dobrze zdefiniowaną użytecznością, a więc składem i właściwościami optymalnie dobranymi ze względu na miejsce i warunki jego wykonania i zastosowania,
- konstrukcje z betonu charakteryzowały się odpowiednią do potrzeb trwałością,
- technologia wykonania betonu i stosowane środki techniczne umożliwiały jednocześnie minimalizację wpływu na środowisko, niską energochłonność, pracochłonność i poprawę warunków pracy, mieszanka betonowa charakteryzowała się odpowiednimi do warunków jej wykonania właściwościami, zwłaszcza urabialnością, dając możliwość prawidłowego i łatwego wykonania wszelkiego rodzaju konstrukcji i elementów betonowych, w różnych warunkach środowiskowych i zwłaszcza konstrukcji o skomplikowanych kształtach i gęstym zbrojeniu,
- koszt wykonania betonu i konstrukcji był możliwie niski.

Beton o dobrze zdefiniowanej użyteczności można uzyskać poprzez równoczesne działania obejmujące:

- dobór jakościowy składników (stosowanie cementów niskoemisyjnych, spoiw alternatywnych, materiałów z recyklingu, materiałów odpadowych, wykorzystanie materiałów dostępnych lokalnie),
- dobór składu (minimalizacja objętości zaczynu i ilości cementu, komponowanie kruszywa o szczelnym uziarnieniu i stosowanie lokalnie dostępnego kruszywa z recyklingu),
- dobór technologii wykonania konstrukcji (prefabrykacja – konstrukcja monolityczna, minimalizacja energochłonności i pracochłonności procesów, skrócenie czasu wykonania konstrukcji).

Trwałość konstrukcji z betonu uzyskuje się poprzez ich projektowanie z uwzględnieniem przewidywanego czasu użytkowania, optymalizację jakościową i ilościową składu betonu odpowiednio do warunków środowiska i agresywnych czynników w nim występujących. Wymagania dla trwałości betonu, a w konsekwencji dla jego składników i składu definiuje się na podstawie analizy warunków środowiskowych pracy konstrukcji w połączeniu z przewidywanym czasem jej użytkowania. W celu zapewnienia odpowiedniej trwałości betonu projektuje się betony specjalne, np. wysokowartościowe, wodoszczelne czy odporne na działanie siarczanów, o składzie jakościowo i ilościowo optymalizowanym pod kątem przewidywanego działania agresywnego środowiska. Betony takie stosuje się z myślą o bardzo długim użytkowaniu konstrukcji, co wiąże się z koniecznością stosowania dobrych jakościowo i drogich składników oraz dużej ilości cementu. Należy podkreślić, że o uzyskaniu trwałej konstrukcji w dużym stopniu decyduje technologia wykonania betonu, w tym zwłaszcza jej optymalizacja ze względu na warunki dojrzewania betonu.

Choć tradycyjna technologia procesów wykonania betonu może być uznana za obojętną dla środowiska, podejmowane są działania w celu dalszego zmniejszenia jej wpływu na środowisko. Obejmują one stosowanie niskoenergetycznych i niskoemisyjnych środków technicznych, stosowanie mieszanek betonowych o konsystencji możliwie płynnej (o konsystencji S4 i wyższej), rozwiązań technologicznych umożliwiających redukcję odpadu i recykling niezużytej mieszanki oraz stosowanie betonów o specjalnie kształtowanych właściwościach. Przykładami takich betonów mogą być: beton samozagęszczalny czy beton o wysokiej wytrzymałości wczesnej, dzięki którym można zmniejszyć zużycie energii (poprzez wyeliminowanie procesu zagęszczania mieszanki betonowej, ograniczenie procesu obróbki termicznej przy produkcji prefabrykatów) i poprawić warunki pracy (poprzez eliminację wibracji i hałasu).

Rozwój technologii betonu przebiega więc przede wszystkim w kierunku uzyskania betonu o dobrze zdefiniowanej użyteczności, o minimalnym wpływie na środowisko, betonu trwałego i wytrzymałego, ale jednocześnie nie kruchego, łatwego i możliwie samoobsługowego w wykonaniu (betony

samozagęszczalne, samopielęgnujące) i użytkowaniu (betony samoczyszczące, samodiagnostujące, samoleczące) oraz o szczególnych, dodatkowych funkcjonalnościach (betony redukujące zanieczyszczenia, magazynujące ciepło).

### 3. Projektowanie betonu i konstrukcji z betonu

Uzyskanie betonu użytecznego wymaga zmiany obecnego podejścia do jego projektowania. Projektując beton użyteczny, należy kompleksowo uwzględnić 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 całego cyklu życia konkretnej konstrukcji. Beton użyteczny musi więc spełnić warunki, które obecnie są brane pod uwagę przy jego projektowaniu, np. zdolność do recyklingu po zakończeniu użytkowania konstrukcji. Powinno to umożliwić uzyskanie oczekiwanych właściwości użytkowych betonu przy minimalizacji obciążenia środowiska, choć na pewno nie przy minimalizacji kosztów jego wykonania (przede wszystkim ze względu na koszt materiałów, o czym dalej). Podjęto już próby opracowania metod projektowania betonu kompleksowo uwzględniających wymagania technologiczne, wytrzymałości i trwałości, ekonomiczne (np. LCC) i ekologiczne (np. CF) wynikające z analizy cyklu życia (LCA) elementu lub konstrukcji. Barię do skutecznego stosowania tych metod jest jednak brak odpowiednio szczegółowych danych w zakresie oddziaływania na środowisko poszczególnych procesów pozyskania składników betonu, wykonania betonu i konstrukcji oraz eksploatacji betonu w konstrukcji. Problemem jest również projektowanie betonów o odporności dostosowanej do czasu użytkowania betonu w danym środowisku. Dążenie do stosowania materiałów lokalnych, w tym zwłaszcza odpadowych i z recyklingu, musi skutkować większą indywidualizacją składników i składów betonu oraz niepewnością co do jego właściwości, a zwłaszcza trwałości. Projektowanie użytecznego betonu wymaga więc gruntownej wiedzy o składnikach i efektach ich stosowania, pozwalającej w zależności od zmienności ich właściwości zastosować odpowiedni ich rodzaj, ilość i kombinację. Konieczne jest tutaj opracowanie szybkich, prostych i tanich metod badania i oceny właściwości składników i betonu, zwłaszcza trwałości betonu w warunkach możliwie adekwatnych do rzeczywistych warunków pracy konstrukcji (z uwzględnieniem obciążenia eksploatacyjnego).

Możliwość wykonania betonów o dużej wytrzymałości i odpornych na agresywne oddziaływanie środowiska, nawet w skomplikowanych warunkach technologicznych, pozwala na projektowanie konstrukcji o dużej ilości zbrojenia i skomplikowanych kształtach, a przy tym smuklejszych i lżejszych. Stosowanie takich betonów pozwala również na znaczące zmniejszenie zużycia betonu i stali zbrojeniowej w konstrukcji. Obok korzyści technicznych istotne są również nowe

możliwości w zakresie swobody architektonicznego kształtowania konstrukcji (beton architektoniczny) oraz o dodatkowych funkcjach użytkowych, takich jak magazynowanie energii (betony z materiałem zmiennofazowym akumulującym ciepło) czy usuwanie ze środowiska zanieczyszczeń (betony samoczyszczące). Ma to bardzo pozytywny, choć trudny do wyrażenia w wymiarze ekonomicznym wpływ na środowisko funkcjonowania człowieka.

Projektowanie betonu staje się bardziej skomplikowane, a więc droższe. Są to jednak wydatki jednorazowe, których wpływ na koszt betonu, a zwłaszcza koszt konstrukcji z betonu w kontekście skali jego produkcji i cyklu życia obiektu z niego wykonanego nie jest istotny.

#### 4. Technologia i technika procesów wykonania betonu

Technologia produkcji, układania i zagęszczania mieszanki oraz pielęgnacji betonu nie zmienia się istotnie w czasie ostatnich lat, nie należy się również spodziewać istotnego rozwoju w tym zakresie. Poziom techniczny i możliwości wytwórni betonu (w zakresie układów sterujących, systemów dozowania, kontroli ilości dodawanej wody i ochrony środowiska) oraz sprzętu wykonawców betonu (dostosowanie do różnych rodzajów betonów, wydajność, trwałość i bezpieczeństwo użytkowania, zdalne sterowanie) jest całkowicie wystarczający do wykonywania pełnej gamy betonów, w tym betonów użytecznych i specjalnych, o zindywidualizowanym składzie, ze składników o zmiennych właściwościach oraz uzyskanie powtarzalnych właściwości betonu nawet w trudnych warunkach technologicznych. Beton użyteczny nie jest jednak betonem łatwym do prawidłowego wykonania. Problemem może w tym przypadku być nie poziom techniczny (choć może być konieczna rozbudowa węzłów betoniarskich ze względu na konieczność stosowania większej liczby różnych składników, w tym szczególnie materiałów odpadowych i z recyklingu oraz frakcjonowanych kruszyw), ale brak siły roboczej o odpowiednich kwalifikacjach. Z jednej strony jest to istotny czynnik ryzyka rozwoju technologii betonu, utrudniający wdrożenie nowych rozwiązań. Z drugiej strony jest to czynnik stymulujący dążenie do opracowania i wdrażania betonów autotechnologicznych, takich jak samozagęszczalne czy samopielęgnujące. W związku z brakiem kadr można się spodziewać większej automatyzacji i robotyzacji procesów wykonania betonu, głównie w prefabrykacji.

Obok stosowania betonów użytecznych, głównymi tendencjami rozwojowymi w prefabrykacji są: indywidualizacja projektowania i produkcji prefabrykatów, obniżenie ich ciężaru oraz zwiększenie jakości wykończenia. Dzięki temu wzmacnia się jej pozycja nie tylko w budownictwie przemysłowym oraz infrastruktury komunikacyjnej i energetycznej (gdzie już jest silna), ale otwiera się możliwość większego wykorzystania prefabrykacji w budownictwie mieszkaniowym (dzięki

indywidualizacji projektów, szybkiemu wykonaniu dobrej jakościowo konstrukcji oraz niższemu kosztowi). Prefabrykacja, dzięki sterowanym warunkom produkcji i możliwości ścisłej kontroli jakości, pozwala na lepsze wykorzystanie potencjału wynikającego z modyfikacji materiałowych betonu oraz stosowania betonów specjalnych. Na przykład, beton samozagęszczalny eliminuje konieczność zagęszczania wibracyjnego mieszanki, co pozwala na radykalną poprawę warunków pracy, beton wysokowartościowy dzięki dużej wytrzymałości wczesnej eliminuje konieczność termicznego przyspieszania dojrzewania, co pozwala obniżyć energochłonność produkcji bez zmniejszenia jej wydajności. Stosując betony o wytrzymałości 60–100 MPa, można zmniejszyć ciężar elementów i ilość zbrojenia konstrukcyjnego, co prowadzi do znacznych oszczędności materiałowych (również w wyniku zmniejszenia wymiarów innych elementów we wznoszonym obiekcie). Tylko prefabrykacja daje możliwość stosowania betonów ultrawysokowartościowych oraz z proszków reaktywnych (o wytrzymałości do 250 MPa). Wdrożenie technologii tych betonów jest jednak problematyczne, co wynika zarówno z wysokiego kosztu samego betonu (konieczność stosowania zbrojenia rozproszonego i dużej ilości cementu), jak i z wysokiego kosztu i energochłonności produkcji elementów (konieczna jest autoklawizacja), co generuje koszt elementów trudny do zaakceptowania przez potencjalnych inwestorów. Ważnym aspektem dla rozszerzenia stosowania prefabrykatów jest konieczność wdrożenia systemów ich łączenia pozwalających nie tylko na łatwy montaż, ale również na łatwy demontaż. Przy dużej trwałości prefabrykatów, zwykle znacznie większej niż czas użytkowania budynku czy budowli, da to możliwość wielokrotnego ich wykorzystania. Kwestią wymagającą rozwiązania jest również zaprojektowanie takich połączeń elementów, które będą przenosić większe obciążenia przy zmniejszonej powierzchni styku.

Technologią, która obecnie uważana jest powszechnie za technologię przyszłości, jest druk 3D. Technologia ta potencjalnie umożliwi za pomocą stosunkowo prostego urządzenia uzyskać element bądź wręcz całą konstrukcję o niemal dowolnym kształcie przy ograniczeniu liczby pracowników oraz znaczącej robotyzacji i automatyzacji procesu. Pod względem materiałowym druk 3D w budownictwie może być realizowany głównie poprzez beton lub materiały betonopodobne o specjalnych właściwościach, posiadające równocześnie zdolność do łatwego ułożenia i do bardzo szybkiego wiązania i przyrostu wytrzymałości. Technologia ta znajduje się obecnie w fazie eksperymentalnej, znane są dość liczne przykłady wykorzystania druku 3D betonu, głównie do wykonania elementów prefabrykowanych lub prostych obiektów. Doświadczenia te wykazały obok wyżej wymienionych korzyści szereg bardzo istotnych barier i problemów, związanych głównie z trudnością wykonania elementów bardziej skomplikowanych niż ściana bez otworów, elementów i konstrukcji zbrojonych, jakością wykończenia powierzchni

oraz zaprojektowaniem betonu do druku o odpowiednich właściwościach. Rozwój technologii druku 3D całych obiektów zdaje się obecnie znajdować w fazie zastoju, wciąż jednak prowadzone są intensywne prace badawczo-rozwojowe wskazujące na celowość jego stosowania w prefabrykacji oraz do wykonania niektórych elementów konstrukcji. Obiecującym kierunkiem jest wykorzystanie w druku 3D fibrobetonów, zwłaszcza w aspekcie ograniczenia stosowania zbrojenia tradycyjnego. Należy przy tym zaznaczyć, że technologia druku 3D nie jest tania. Przeprowadzone analizy wskazują, że koszt wykonania obiektów mieszkalnych w druku 3D nie odbiega lub nawet jest wyższy niż w przypadku technologii tradycyjnych. Wydaje się więc, że w najbliższych dekadach technologia druku 3D będzie stosowana głównie do wykonania nietypowych elementów prefabrykowanych o skomplikowanych kształtach, nie wpływając jednocześnie istotnie na zakres stosowania tradycyjnych technologii i technik betonu.

## 5. Modyfikacje materiałowe betonu

Modyfikacje materiałowe betonu stanowią najbardziej obiecujący kierunek rozwoju technologii betonu, umożliwiając poprawę właściwości betonu przy jednocześnie stosunkowo niewielkich kosztach i z korzyścią dla środowiska. Nie wymagają przy tym istotnej ingerencji w środki techniczne procesów produkcji i wykonania betonu. Modyfikacje materiałowe obejmują: modyfikowanie i doskonalenie dotychczas stosowanych materiałów (zwłaszcza cementów, dodatków do betonu i domieszek), rozwijanie technologii betonów specjalnych (np. samozagęszczalnych, wysokowartościowych, wodoszczelnych, fibrobetonów) oraz opracowywanie i weryfikowanie przydatności nowych materiałów, w tym materiałów odpadowych i z recyklingu.

Rozwój cementów jest ukierunkowany na zmniejszenie negatywnego wpływu ich produkcji na środowisko. Koncentruje się on na jak najszerszym stosowaniu nieklinkierowych dodatków do cementu (efektywne stosowanie w możliwie dużej ilości nieklinkierowych składników, takich jak żużel, kamień wapienny, popioły lotne, w tym wapienne i fluidalne oraz inne składniki w cementach CEM II–CEM VI) oraz na wdrażaniu nowych rodzajów cementów (np. cementy belitowe, cementy siarczanoglinowe CSA). Warto również zauważyć intensywne badania nad geopolimerami, których celem jest zastąpienie nimi cementu portlandzkiego, a w konsekwencji uzyskanie znacznie mniejszego obciążenia środowiska emisją CO<sub>2</sub>. Dotychczas jednak geopolimery nie znalazły zastosowania na szeroką skalę w budownictwie. Bariera są wysokie koszty i trudności technologiczne związane ze stosowaniem aktywatorów, nierekompensowane znacząco lepszymi właściwościami geopolimerów w zakresie typowych zastosowań betonu. Duży koszt oraz ograniczone możliwości produkcji spoiw alternatywnych powoduje, że dominująca pozycja klasycznych cementów powszechnego użytku w technologii betonu nie ulegnie

zmianie. Czynnikiem istotnie wpływającym na koszt cementu będzie przy tym polityka klimatyczna i koszt emisji CO<sub>2</sub>. Problemem staje się również dostępność dobrej jakości nieklinkierowych składników cementu. W obliczu mniejszej podaży i wzrostu kosztu najważniejszych dodatków do cementu – żużla wielkopieczowego S i popiołów lotnych krzemionkowych V – podejmowane są intensywne działania w kierunku wdrożenia alternatywnych składników nieklinkierowych o zbliżonych właściwościach, np. popiołów lotnych wapiennych W, prażonych glin kaolinitowych czy efektywniejsze wykorzystanie dostępnych dodatków nieaktywnych, np. kamienia wapiennego. Obiecującą koncepcją jest indywidualizacja produkcji cementów o składzie, uziarnieniu i właściwościach dopasowanych do wymagań technologicznych i trwałościowych określonej realizacji, w tym cementów z domieszkami, np. cementów napowietrzających beton. Takie cementy można optymalizować ze względu na specyficzne wymagania danej realizacji, uzyskując korzyści ekonomiczne i ekologiczne. Możliwości techniczne takiej produkcji cementów już istnieją, wymagana jest jednak rozbudowa możliwości technicznych składowania wielu składników cementu o różnych właściwościach.

Kluczowym dla rozwoju betonu i jego technologii jest postęp w zakresie domieszek do betonu. Istniejące domieszki są stale doskonalone, wprowadzane są nowe rodzaje o specyficznych efektach działania (np. domieszki tiksotropowe, przeciwskurczowe). Postęp w zakresie chemii polimerów oraz nanotechnologia pozwalają 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. Co warto zauważyć, powszechne stosowanie domieszek sprawia, że ich koszt utrzymuje się na stosunkowo niskim poziomie i zwykle nie wpływa istotnie na koszt betonu.

Kierunkiem rozwoju technologii betonu o strategicznym znaczeniu jest stosowanie jako składników w betonie materiałów odpadowych pochodzących z różnych gałęzi przemysłu i gospodarki oraz materiałów z recyklingu. Jest to przy tym jedna z podstawowych koncepcji utylizacji odpadów, nieraz bardzo egzotycznych czy nawet kontrowersyjnych, w tym odpadów uznawanych za szkodliwe. Stosowanie materiałów odpadowych i z recyklingu, obok bezpośrednich korzyści środowiskowych związanych z ich utylizacją, daje możliwość zmniejszenia zużycia cementu i/lub naturalnego kruszywa. Szczególne znaczenie ma recykling materiałów z rozbieranych konstrukcji. Stosowanie kruszywa z recyklingu, w tym zwłaszcza z rozbiórki konstrukcji betonowych do produkcji pełnowartościowego betonu staje się koniecznością. Z jednej strony zauważalny jest bowiem deficyt kruszyw naturalnych,

w tym szczególnie piasku. Z drugiej strony jest to sposób na utylizację konstrukcji i wyeliminowanie konieczności składowania dużych ilości odpadu, pozwalający wykorzystać zasoby lokalne do produkcji betonu i zmniejszyć obciążenie środowiska transportem, zarówno odpadu, jak i kruszywa. Jak dotąd szersze zastosowanie praktyczne w technologii betonu znalazły tylko nieliczne materiały odpadowe i z recyklingu. Są to przede wszystkim znane i stosowane od lat wzmiankowane wcześniej popioły lotne ze spalania węgla kamiennego, żużel wielkopiecowy, pył krzemionkowy, które są stosowane jako składniki cementu lub dodatki do betonu typu II. Ich potencjał techniczny wciąż nie jest wyczerpany i mogą być wykorzystane efektywniej. W przypadku tych materiałów problemem jest jednak, ze względu na ograniczenie rozwoju energetyki opartej na spalaniu węgla oraz produkcji stali, malejąca ich dostępność i znacząco rosnący koszt, co istotnie wpływa na koszt cementu i betonu. Do betonu stosowane są również kruszywa z recyklingu, w tym zwłaszcza pochodzące z recyklingu betonu, jednak na dużo mniejszą, niż wynikałoby to z możliwości, skalę. Problemem są tutaj: wysoki koszt produkcji kruszywa z recyklingu, zwykle większy niż koszt kruszywa naturalnego, gorsza od kruszyw naturalnych i trudniejsza do kontroli jakość kruszywa z recyklingu, problemy technologiczne z wykonaniem betonu z kruszywem z recyklingu oraz gorsze właściwości betonu z kruszywem z recyklingu.

Działania w celu zwiększenia wykorzystania materiałów odpadowych i z recyklingu są obecnie intensyfikowane na różnych poziomach, należy się więc spodziewać rozszerzania zakresu ich stosowania i wprowadzania nowych ich rodzajów. W najbliższym czasie będzie to dotyczyć, obok kruszyw z recyklingu betonu takich materiałów, które są już pozytywnie i gruntownie zweryfikowane w zakresie możliwości stosowania do betonu, jednak z różnych względów uważane są za mniej przydatne i stosunkowo rzadko stosowane (np. dostępne w dużych ilościach popioły różnego pochodzenia, w tym popioły lotne wapienne, zużyte piaski formierskie, kruszywa z recyklingu ceramiki, metakaoliny, zeolity). Należy zaznaczyć, że o ile stosowanie materiałów odpadowych i z recyklingu do betonu jest kierunkiem słusznym i rozwojowym, o tyle jego wdrożenie na szeroką skalę nie będzie zadaniem łatwym. Praktyczna aplikacja jakiegokolwiek materiału w betonie nie jest możliwa bez zdobycia gruntownej wiedzy o jego właściwościach i wpływie na właściwości betonu. Z licznych badań efektów stosowania różnych materiałów odpadowych i z recyklingu wypływają wnioski, że charakteryzują się one dużą zmiennością właściwości, często są dostępne tylko lokalnie i w ograniczonej ilości, nie spełniają wielu wymagań stawianych obecnie składnikom betonu, nie wpływają pozytywnie na właściwości betonu, co więcej beton z nich wykonany z trudem osiąga akceptowalne właściwości. Tak więc potencjalne korzyści z ich stosowania do betonu związane są przede wszystkim z możliwością redukcji uciążliwych dla środowiska składników. Często możliwość

stosowania materiałów odpadowych i recyklingu do betonu wymaga ich wcześniejszego uzdatniania, co wiąże się z dodatkowymi, dużymi kosztami i trudnym do oceny obciążeniem środowiska. Reasumując, w efekcie stosowania tych materiałów nie należy więc oczekiwać redukcji kosztu betonu czy kosztu konstrukcji w cyklu jej życia. Trzeba tutaj podkreślić, że w zdecydowanej większości przypadków propozycjom stosowania różnych materiałów do betonu towarzyszy brak wnikliwej analizy środowiskowej, ekonomicznej i technicznej możliwości i celowości ich stosowania w betonie. Zauważalne jest też niedocenianie aspektów technicznych i technologicznych stosowania tych materiałów.

Nanotechnologia i nanomateriały są najważniejszymi trendami rozwoju początku XXI w., o trudnym do przecenienia (ale i ocenienia) potencjale technicznym i społecznym. Nie ominęły one również technologii betonu, nanotechnologia jest np. powszechnie stosowana w produkcji nowych rodzajów domieszek do betonu i doskonaleniu istniejących. Poza domieszkami, obecnie najczęściej stosowanymi nanomateriałami w betonie są nanocementy umożliwiające uzyskanie betonów samoczyszczących i redukcję  $\text{NO}_x$  (Tiocem) oraz nanokrzemionka umożliwiająca uzyskanie betonu o wyjątkowo szczelnej strukturze. W obu przypadkach zakres ich stosowania praktycznego jest jednak marginalny, głównie ze względu na bardzo wysoki koszt przy jednocześnie problematycznej użyteczności. Prowadzone są badania efektów stosowania w betonie różnych nanomateriałów, w tym grafenu i jego pochodnych, wskazujące, że dzięki nim można nadać betonowi 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: ich bardzo wysokie koszty, negatywny wpływ na zdrowie i trudności z uzyskaniem mieszanki betonowej o akceptowalnej urabialności. W związku z tym wydaje się, że w dającej się przewidzieć przyszłości praktyczna aplikacja nanomateriałów bezpośrednio w betonie będzie bardzo ograniczona, choć nanotechnologia będzie stanowić ważny element modyfikacji składników betonu (nanocementy, domieszki i dodatki).

Obecne uregulowania normowe, poprzez koncepcję równoważnych właściwości użytkowych betonu i koncepcję kombinacji równoważnych właściwości, umożliwiają projektowanie i stosowanie betonów o składzie istotnie odbiegającym od wymagań co do rodzaju i ilości składników. Dotyczy to zwłaszcza wymogów minimalnej zawartości cementu, maksymalnego stosunku  $w/c$  oraz kombinacji cementu i dodatków mineralnych, które mogą być uwzględnione w tych wymaganiach. W takim przypadku konieczne jest zweryfikowanie, czy właściwości betonu, zwłaszcza te związane z odpornością na oddziaływanie środowiska, są równoważne z właściwościami betonu referencyjnego, o składzie zgodnym z wymaganiami dotyczącymi danej klasy ekspozycji. Umiejętne korzystanie z tych możliwości pozwala na uzyskanie korzyści

ekonomicznych i ekologicznych, a zwłaszcza stosowanie w praktyce betonów o specyficznym składzie i składnikach. Dotyczy to zwłaszcza betonów niskoemisyjnych (ang. *green concrete*) oraz betonów autotechnologicznych. Betony niskoemisyjne charakteryzują się przede wszystkim: przy mniejszej ilości spoiwa osiąganiem takiej samej wytrzymałości i trwałości jak beton konwencjonalny, 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. Rozwój betonów autotechnologicznych skupia się na kwestiach pielęgnacji, zwłaszcza zakresie zmniejszenia ryzyka powstawania uszkodzeń betonu w początkowym okresie dojrzewania betonu, w wyniku naprężeń termicznych i skurczowych. W tym celu wykorzystuje się różne rozwiązania materiałowe, stosując obok cementów o niskim ciepłe hydratacji domieszki przeciwskurczowe, materiały ekspansywne, gromadzące ciepło (materiały zmiennofazowe PCM) i materiały gromadzące wodę. Koszt takich betonów jest większy, jednak dzięki poprawie trwałości konstrukcji korzyści ekonomiczne w cyklu życia mogą być znaczące. W niektórych przypadkach można również ograniczyć czy wręcz wyeliminować zbrojenie przeciwskurczowe w konstrukcji, co bezpośrednio zmniejsza jej koszt.

## 6. Użytkowanie i rozbiórka konstrukcji

Zaletą dobrze zaprojektowanego i wykonanego betonu jest to, że konstrukcja z niego wykonana nie wymaga działań związanych z jej utrzymaniem i nie generuje dodatkowych kosztów podczas jej użytkowania. Należy jednak zauważyć, że długotrwałe użytkowanie konstrukcji wymaga monitorowania jej stanu, warunków, w których pracuje (zwłaszcza czy nie ulegają one zmianom) i szybkiego reagowania wtedy, gdy wystąpią problemy. W przypadku wystąpienia uszkodzeń naprawa konstrukcji betonowej jest bowiem problematyczna i generuje duże koszty. Obecnie prowadzi się działania w celu opracowania i wdrożenia systemów monitoringu stanu konstrukcji z betonu, postępu jego starzenia, rozwiązań umożliwiających diagnostykę betonu oraz bardziej efektywnych systemów naprawczych, przy czym szczególnym rozwiązaniem w tym zakresie jest technologia betonów samoleczących. Kompleksowe stosowanie wyżej wymienionych rozwiązań może pozwolić w dalszej przyszłości na uzyskanie bezobsługowej konstrukcji z betonu, choć wiąże się to bez wątpienia z większym kosztem jej wykonania. W zakresie monitorowania stanu konstrukcji i technologii betonów samoleczących prowadzone są badania oraz dostępne są pierwsze doświadczenia głównie w skali laboratoryjnej. Na tej podstawie trudno jednoznacznie ocenić perspektywy praktycznego stosowania takich rozwiązań, zwłaszcza w aspekcie ich skuteczności w dłuższym okresie eksploatacji konstrukcji. Bez wątpienia są to rozwiązania drogie,

których efektywne zastosowanie wiąże się z koniecznością dobrego zidentyfikowania potencjalnych zagrożeń dla konstrukcji. Głównym sposobem recyklingu konstrukcji z betonu będzie ich kruszenie i wykorzystywanie jako kruszywa do wykonania nowego betonu. Uwagę należy jednak zwrócić na możliwości, jakie otwiera prefabrykacja w postaci możliwości wielokrotnego wykorzystania całych elementów prefabrykowanych. Takie rozwiązanie wydaje się uzasadnione ekonomicznie i środowiskowo, wymaga jednak zaprojektowania odpowiednich połączeń. Warto tutaj zasignalizować kwestię ponownego recyklingu 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?

## 7. Podsumowanie

Omówione w artykule kierunki rozwoju technologii betonu uwzględniające wymagania techniczne i ekologiczne niosą ze sobą znaczny potencjał wzrostu kosztu betonu i jego wykonania. Należy przy tym jednak zaznaczyć, że koszt betonu nie powinien być oceniany tylko przez pryzmat kosztów materiałów czy technologii, a na podstawie analizy kosztu całego cyklu życia (LCA) konstrukcji czy elementu z niego wykonanego. Stosowanie nowych technologii umożliwia projektowanie mniej materiałochłonnych, a tym samym mniej kosztownych konstrukcji betonowych, obniżenie pracochłonności i energochłonności ich wykonania, skrócenie czasu ich realizacji oraz dzięki lepszej odporności betonu na agresywne oddziaływanie środowiska dłuższy okres użytkowania konstrukcji bez konieczności wykonywania remontów. Bardzo istotny jest proekologiczny aspekt nowych technologii betonu, a zwłaszcza rozszerzenie możliwości wykorzystania w produkcji betonu różnych materiałów odpadowych i z recyklingu.

Warunkiem rozwoju technologii betonu jest umiejętne przełożenie wiedzy na zastosowanie praktyczne. Wszystkie wyżej wymienione obszary technologii betonu są przedmiotem intensywnych poznawczych badań naukowych oraz badań stosowanych, wprost odnoszących się do zagadnień praktycznych lub których wyniki stosunkowo łatwo mogą być wdrożone do praktyki. Problemem wciąż pozostaje to, 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 podkreślić, że praktyczne stosowanie nowych materiałów lub technologii wymaga systematycznych, reprezentatywnych i dobrze udokumentowanych wyników, co w prowadzonych badaniach nie zawsze jest regułą. Wdrożeniu nowych technologii betonu musi towarzyszyć wzrost kwalifikacji projektantów i wykonawców. Konieczne jest wdrożenie skutecznego systemu kształcenia

technologicznego, ponieważ wykonywanie betonu o właściwościach kształtowanych w skali mikro, poddanego podczas dojrzewania oddziaływaniu bardzo złożonych układów różnorodnych obciążeń wymaga od inżynierów nie tylko doświadczenia, ale również zrozumienia zasad kształtowania właściwości betonu, a od wykonawców dużo większej świadomości technologicznej.

Wdrożenie praktyczne nawet dobrze udokumentowanych rozwiązań materiałowych i technologicznych często przebiega z oporami. Problem w mniejszym stopniu stanowi konserwatyzm projektantów konstrukcji oraz producentów i wykonawców betonu, bo w obszarze świadomości technologicznej odnotowano dużą poprawę. Bariery trudniejszą do pokonania stanowią dokumenty odniesienia, wytyczne i specyfikacje, których twórcy często zdają się nie dostrzegać postępu wiedzy w zakresie szeroko rozumianej technologii betonu.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Adamczewski G., Woyciechowski P., Prefabrykacja – jakość, trwałość, różnorodność, Stowarzyszenie Producentów Betonów Warszawa, październik 2014
- [2] Czarnecki L., Nanotechnologia w budownictwie, Przegląd Budowlany 1/2011
- [3] Dębska D., Szweda Z., Utrzymanie i monitoring konstrukcji żelbetonowych w aspekcie zagrożeń korozyjnych, XXXIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji 2018, tom III, str. 535–589
- [4] Giergiczny Z., Fly ash and slag Cement and Concrete Research vol. 124/2019
- [5] Giergiczny Z., Cementy i dodatki w składzie betonu, XXXIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji 2018, tom I, str. 305–346
- [6] Gołaszewski J., Domieszki do betonu. Efekty działania, ocena i badania efektywności, stosowanie, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2017
- [7] Hager I., Golonka A., Putanowicz R., 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction? Procedia Engineering, 2016
- [8] Horszczaruk E., Sikora P., Łukowski P., Zastosowanie nanomateriałów do wytwarzania betonu zdolnego do autodekacji uszkodzeń: stan obecny i perspektywy. Application of nanomaterials in production of self-sensing concretes: contemporary developments and prospects, Archives of Civil Engineering tom LXII, 3/2016
- [9] Hsino M., Paślowski J., Materiały zmienno fazowe jako modyfikator betonu dojrzewającego w klimacie gorącym i suchym, Izolacje 2/2014
- [10] Jackiewicz-Rek W., Betony inne niż wszystkie, Przegląd budowlany 2/2020
- [11] Jaworski M., Zastosowanie materiałów zmienno fazowych (PCM) do zwiększenia bezwładności cieplnej budynków, www.izolacje.cpm.pl, 2009
- [12] Latawiec R., Woyciechowski P., Kowalski K. J., Sustainable concrete performance-CO<sub>2</sub>-emission, Environments – MDPI, tom 5, 2/2018
- [13] Łukowski P., Modyfikacja materiałowa betonu, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2016
- [14] Łukowski P., Adamczewski G., Samozaleczanie i samonaprawa betonu, Inżynieria i Budownictwo 8/2017
- [15] Łukowski P., Nowoczesne technologie zabezpieczeń strukturalnych i powierzchniowych betonu przed korozją, XXXIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji 2018, tom II, str. 463–508
- [16] Runkiewicz L., Szulc J., Sieczkowski J., Ewolucja budownictwa prefabrykowanego w Polsce, Przegląd Budowlany 10/2020
- [17] Szwabowski J., Gołaszewski J., Technologia betonów samozagęszczalnych, Polski Cement, Kraków, 2010, str. 160
- [18] Trzaska M., Trzaska Z., Nanomateriały w budownictwie i architekturze, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2019
- [19] Zybura A., Śliwka A., Projektowanie konstrukcji żelbetonowych z uwzględnieniem trwałości. XXXIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji 2018, tom III, str. 1–48



WIELKOPOLSKA  
OKRĘGOWA  
IZBA  
INŻYNIERÓW  
BUDOWNICTWA



CUTOB  
PZITB  
POZNAŃ



ZACHODNIOPOMORSKA  
OKRĘGOWA  
IZBA INŻYNIERÓW  
BUDOWNICTWA

## XVIII Konferencja Naukowo-Techniczna WAŁCZ 2021 REWITALIZACJA – Podtopienia

### „Katastrofalne skutki związane z ulewnymi deszczami”

oraz

### XXIII Warsztaty Nadzoru Inwestycyjnego 9-11.09.2021 Centralny Ośrodek Sportu w Wałczu

Zapraszamy do udziału w XVIII Konferencji Naukowo-Technicznej.

Zamierzeniem organizatorów jest, aby konferencja była okazją do wymiany poglądów i doświadczeń przedstawicieli różnych środowisk. Interdyscyplinarny charakter konferencji pozwoli na wypracowanie efektywnych metod działań wspierających procesy rewitalizacyjne. Konferencji towarzyszyć będzie prezentacja badań, praktyk, materiałów wspierających ten proces w wymiarze społecznym, przestrzennym, technicznym i gospodarczym.

Konferencja odbędzie w formie hybrydowej, czyli obecność osobista, jak i za pośrednictwem platformy internetowej.

Z powodu pandemii organizatorzy zastrzegają sobie możliwość zmian formy przeprowadzenia konferencji lub odwołanie jej, zapewniając zwrot dokonanych wpłat.

**Kontakt do organizatorów:** Konferencja Naukowo-Techniczna – CUTOB-PZITB w Poznaniu  
a.piatkowski@cutobpoznan.pl <http://cutob-poznan.pl>/tel. 570 655 103

**Warsztaty Nadzoru Inwestycyjnego** – zbgmiew.augustyniak@gmail.com, tel. 602 118 472