Nanotechnologie w budownictwie

Poznań, 24.01.2012r.

CUTOB-PZITB

Międzynarodowe Targi Poznańskie

budma

Dr hab. Eur. Inż. Tomasz Z. Błaszczyński
Politechnika Poznańska

CUDOWNY ŚWIAT BETONU

1. Wstęp

Beton to dzisiaj najpowszechniej używany materiał budowlany na świecie (produkcja światowa 7 mld m^3 rocznie, to jest 3 razy więcej niż drewna i 7 razy więcej niż stali rocznie- [1, 2]). Wynaleziony i po raz pierwszy używany w Asyrii, na przemysłową skalę został po raz pierwszy zastosowany w starożytnym Rzymie. Powstawały z niego największe budowle Imperium Rzymskiego. W wiekach średnich zapomniany, został ponownie odkryty w XIX w. Dzisiaj służy do wykonywania drapaczy chmur przeczącym zasadom grawitacji. Składniki do przygotowania „magicznej formuły", jaką jest beton, dostępne są prawie w każdym miejscu na ziemi. Od tego jak zostaną wymieszane i wbudowane, zależy czy będą przyczyną tragedii, czy tryumfu. Powstają z niego budowle małe i ogromne, zwykłe i niepowtarzalne. Ścieżki postępu wyłożone są betonem. Leży on u podłoża największych cywilizacji świata. W związku z tym warto poznać tajemnice tego niezwykłego materiału budowlanego.

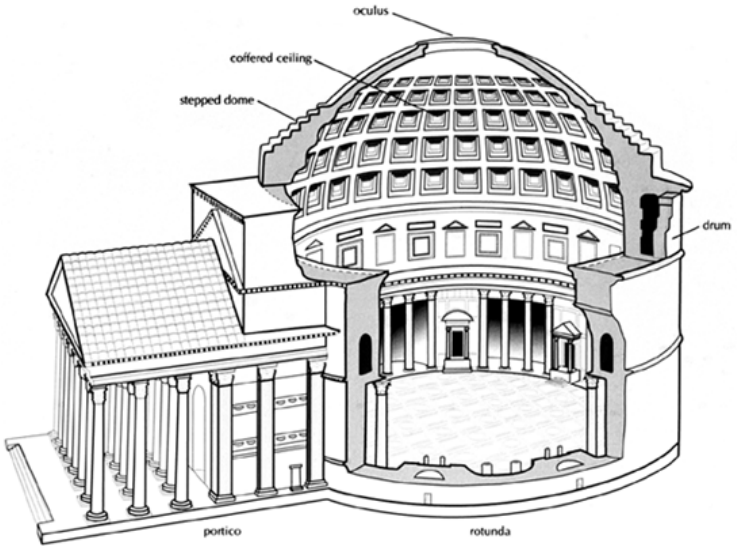
Na początku jest płynny, a kiedy zwiąże staje się twardy jak kamień. Stąd angielska nazwa betonu *concrete*, która pochodzi od łacińskiego słowa *concretus*, czyli zrośnięty. Dzięki tej niezwykłej właściwości jest jednym z najbardziej cenionych budulców. Beton wydaje się nam czymś oczywistym, bo ciągle widzimy go wokół nas, ale w rzeczywistości jest to najbliższy cudownemu ideałowi materiał budowlany, z którym kiedykolwiek mieliśmy do czynienia. Beton jest praktycznie wszędzie, żaden inny budulec nie jest wykorzystywany do tylu różnych celów. Można mu nadać praktycznie każdy kształt. Stanowi podstawę najróżniejszych obiektów budowlanych: super-autostrad, wielkich mostów, kanałów żeglugowych, wielkich tam i najwyższych na świecie drapaczy chmur.

Podstawowe zasady produkcji betonu nie zmieniły się od ponad wieku, ale produkcja i realizacja elementów z betonu nie jest wcale taka prosta. Żeby uzyskać właściwą mieszankę betonową wymagana jest precyzja i bezbłędność. Liczy się odpowiedni dobór składników i

czasu. Przygotowanie betonu przypomina trochę robienie ciasta. Jest wiele przepisów, są różne smaki, kolory i konsystencje, ale jest także wiele sposobów, żeby to ciasto zepsuć. Może się zupełnie nie udać albo może być dalekie od oczekiwanego. Sporządzenie właściwej receptury jest najważniejsze, gdyż konsekwencje błędu mogą mogą być tragiczne.

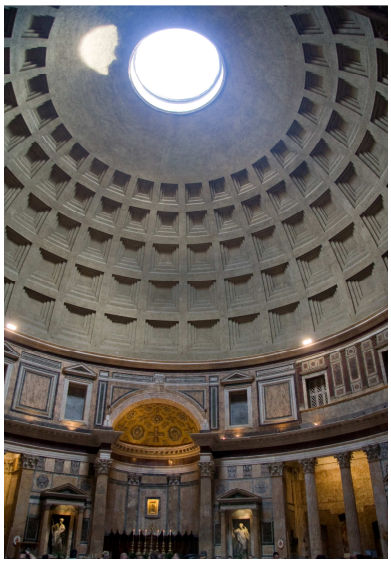
Gdy wbudujemy odpowiedni beton, to stworzone z niego obiekty mogą przetrwać tysiące lat. Panteon wybudowany ok. 125 roku n.e. stoi niewzruszenie w centrum Rzymu już od 1800 lat (Rys. 1). Jest najstarszym na świecie budynkiem pozostającym w ciągłym użytkowaniu. Jego 43 metrowa betonowa kopuła jest największą kopułą ocalałą z czasów starożytnych. Do XV w. była także największą kopułą w Europie Zachodniej (Rys. 2).

Rys. 1. Widok Panteonu w Rzymie.



Rys. 2. Przekrój przez Panteon.

Jej piękno najłatwiej docenić, gdy wejdzie się do środka niepozornego z zewnątrz Panteonu. Oczom zwiedzającego ukazują się bogate ściany, nad którym wznosi się pokryta kasetonami kopuła. Kasetony zmniejszają się ku górze, by podkreślić perspektywę budowli. Prowadzą tym samym oczy zwiedzającego ku znajdującemu się ok. 44 m nad podłogą dziewięciometrowemu otworowi (*oculus*), przez który wpada do wnętrza światło.

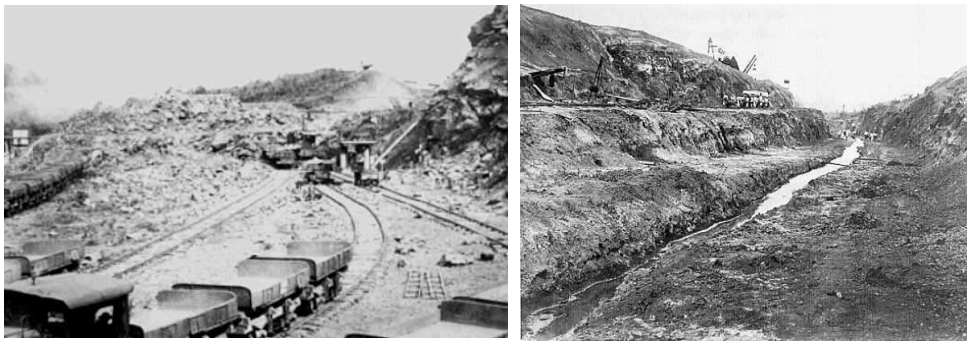


Rys. 2. Widok na kopułę z wnętrza rotundy Panteonu.

Blisko 2000 lat później budowniczowie stanęli przed prawie niewykonalnym zadaniem: jak rozdzielić 2 kontynenty za pomocą betonu, czyli jak stworzyć kanał panamski. Kanał panamski to 200 mln litrów wody, przez które przepływa dzisiaj ponad 12 tys. statków i 4,5 mln kontenerów rocznie. Materiałem za pomocą, którego okiełznano tę masę wody był beton. Jednak początek realizacji kanału nie był taki prosty. 1.02.1881r. hr. Ferdinand de Lesseps (Rys. 4) (twórca kanału sueskiego) rozpoczął budowę kanału panamskiego.

Rys. 4. Hrabia Ferdinand de Lesseps [3].

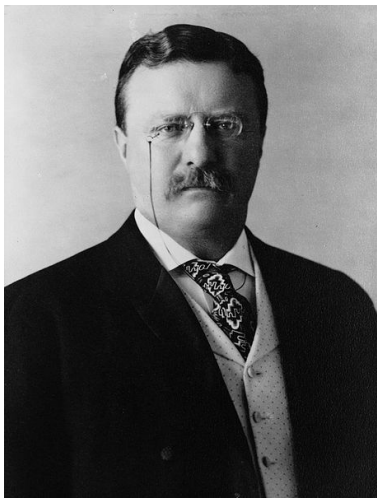
Niestety Lesseps zastosował tę samą koncepcję co w przypadku kanału sueskiego, czyli przekopanie jednolitego kanału na poziomie morza, co w powiązaniu z rumoszowym gruntem i łatwo utleniającymi skałami, znajdującymi się na trasie budowy kanału, doprowadzało do ciągłych osuwisk i katastrof (Rys. 5, 6). Po 8 latach Francuzi przerwali prace.



Rys. 5, 6. Budowa kanału za czasów hr. F. Lessepsa [3].

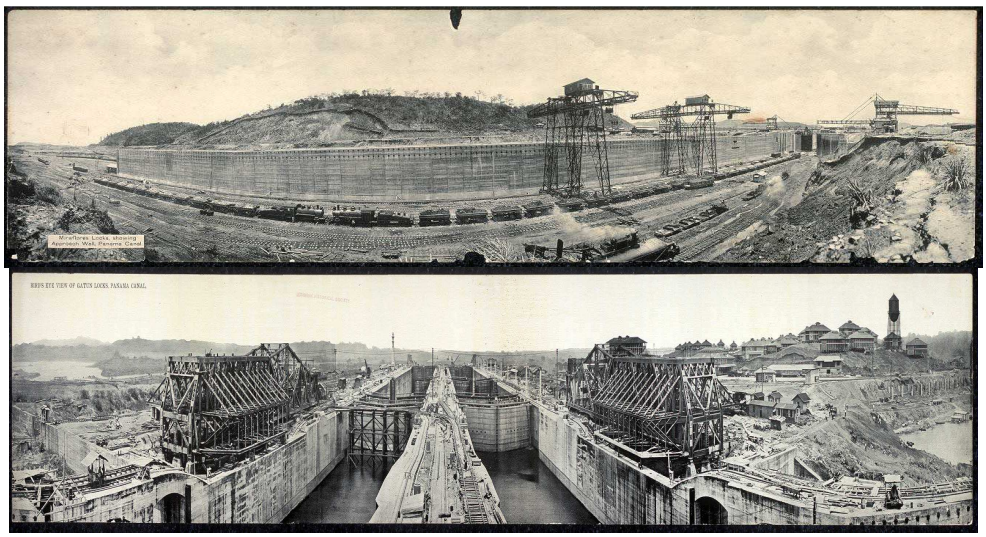
Straty w ludziach też były ogromne, gdyż w wyniku osuwisk ziemi, chorób tropikalnych i wypadków z dynamitem, zginęło 22tys. robotników.

W związku z tym prezydent USA Theodore Roosevelt podjął decyzję, że Stany Zjednoczone przejmą budowę kanału panamskiego i wykonają go same, wyciągając wnioski z porażki Lessepsa (Rys. 7). Uczyniono to w okresie od 1904 do 1914r. przy pomocy szeregu śluz, których obudowy i szczelne wrota wykonano na bazie betonu.



Rys. 7. Prezydent Stanów Zjednoczonych w latach 1901-1909 – Theodore Roosevelt [3].

Przy założonej skali prac i przyjętych terminach bez zastosowania betonu ta budowa byłaby niewykonalna (Rys. 8, 9). Do budowy kanału zużyto 3,5 tys. m^3 betonu. Obiekt ten zmienił całkowicie oblicze świata, a po blisko wieku beton zużyty do budowy kanału panamskiego przetrwał próbę czasu. Żaden inny materiał nie zdałby takiego egzaminu.



Rys. 8, 9. Budowa kanału panamskiego w roku 1913 [3].

A dzisiaj beton podbija nawet niebo. Przykładem tego jest Burj Dubaj najwyższy budynek na świecie, który 17 stycznia 2009r. przekroczył wysokość 818m (Rys. 10).

Rys. 10. Burj Dubaj 2009.

W związku z kryzysem otwarcie Burj Dubaj nastąpiło dopiero 4.01.2010 r., a nie jak planowano 9.09.2009r. Na uroczystości otwarcia, z udziałem 60 tys. uczestników, emir Dubaju szejk Muhammad ibn Raszid al-Maktum ogłosił oficjalną wysokość budynku jako 828 m. W uroczystości otwarcia uczestniczyło 60 tys. gości. Szejk Dubaju w przemówieniu zmienił nazwę wieży na Burj Khalifa, na cześć władcy emiratu Abu Zabi szejka Chalify ibn Zajeda an-Nahajana, będącego jednocześnie prezydentem federacji Zjednoczonych Emiratów Arabskich. Emirat Abu Zabi przyszedł z pomocą Dubajowi, zmagającemu się w końcu 2009r. z trudnościami finansowymi. Ostatecznie do budowy tego obiektu zużyto 330 tys. m^3 betonu najwyższej jakości.

Do najważniejszych cech betonu należą jego trwałość, wytrzymałość, inercja cieplna, duże walory akustyczne, ochrona przeciwpożarowa i przeciwwodna, a także łatwość jego użycia. Ponadto nie stanowi on zagrożenia dla zdrowia człowieka, jest ekologiczny i może odegrać ogromną rolę w rozwoju budownictwa zrównoważonego.

Nie można by tego wszystkiego osiągnąć, gdyby nie stałe modyfikacje stosowanego betonu. Historia jego modyfikacji jest tak stara jak sam beton. Jednakże dzisiaj w modyfikacjach można już wydzielić 3 główne grupy: konstrukcyjną, użytkową i

ekologiczną. W ich wyniku zwłaszcza w ostatnich latach powstała duża ilość nowych materiałów, które można nazwać betonem, ale które posiadają cechy tak dalece różne, że nawet 10 czy 15 lat temu nie mieściłoby się to w naszej wyobraźni. Druga połowa lat 90-tych obfitowała w modyfikacje konstrukcyjne, a wiek XXI głównie w modyfikacje użytkowe i ekologiczne.

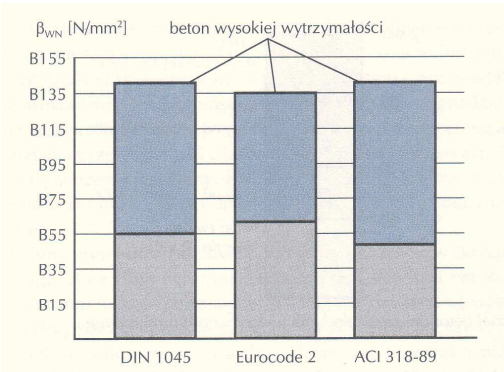
2. Modyfikacje konstrukcyjne

2.1. Betony wysokowartościowe (BWW)

Rozwój gospodarczy, a także szybki rozwój przemysłu w krajach rozwiniętych wpłynęły na zmianę trendów w budownictwie, również w dziedzinie technologii betonowych. Coraz wyższe ceny gruntu w metropoliach wymusiły rozbudowę metrażu „w górę", co wpłynęło na rozwój budownictwa wysokiego i wysokościowego. Również zapotrzebowanie na ropę naftową miało wpływ na poszukiwanie nowych generacji betonów wysokowartościowych. Do początku lat 80-tych wysoką wytrzymałość uzyskiwano przez staranny dobór składników betonu, stosowanych tradycyjnie, takich jak cement, kruszywo, dodatki czy domieszki. Następnym etapem w rozwoju betonu było pojawienie się pyłów krzemionkowych oraz superplastyfikatorów. Działanie to pozwoliło na uzyskanie produktu o znacznie większej wytrzymałości czy mrozoodporności, zmniejszając przy tym nasiąkliwość i wodoprzepuszczalność. Taki układ zmian cech przyczynił się natomiast do znacznego zwiększenia trwałości betonu.

Betony wysokowartościowe (BWW) wywodzą się wprost z betonu zwykłego i stanowią efekt prowadzonych modyfikacji. Podstawowym celem modyfikacji jest redukowanie mankamentów betonu zwykłego. BWW są wykonywane z nowoczesnych cementów o wysokiej jakości. Dodatkowymi wyróżnikami tych betonów są małe wartości stosunku wodno-spoiwowego i nierozłącznie z tym związana konieczność stosowania nowoczesnych domieszek plastyfikujących lub upłynniających. W przypadku betonów o najwyższej wytrzymałości konieczne jest także stosowanie dodatków mineralnych, zwłaszcza pyłu krzemionkowego [4].

Klasyfikację betonu BWW oparto na wytrzymałości charakterystycznej na ściskanie. Większość przepisów przyjmuje początek pomiędzy $f_{ck,cub}$ = 50 – 60 MPa (rys. 11).

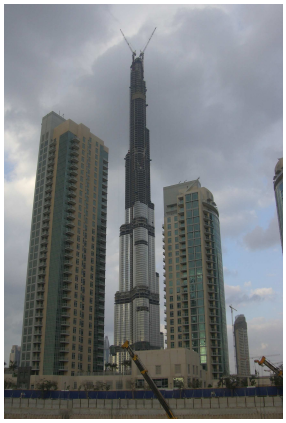


Rys. 11. Kryteria zaliczania betonów do BWW [4].

Według PN-EN 206-1:2003 BWW to betony klasy wyższej niż C50/60. Na bazie BWW powstało wiele ciekawych obiektów, takich jak: most Storebælt (rys. 12), most Öresund (rys. 13) czy najwyższy z mostów Wiadukt Millau (rys. 14), a także takie budynki wysokie jak – Petronas Towers (rys. 15) czy Burj Dubaj, dzisiaj Burj Khalifa (rys. 16).

Rys. 12, 13. Mosty Storebælt i Öresund.

Rys. 14. Wiadukt Millau.

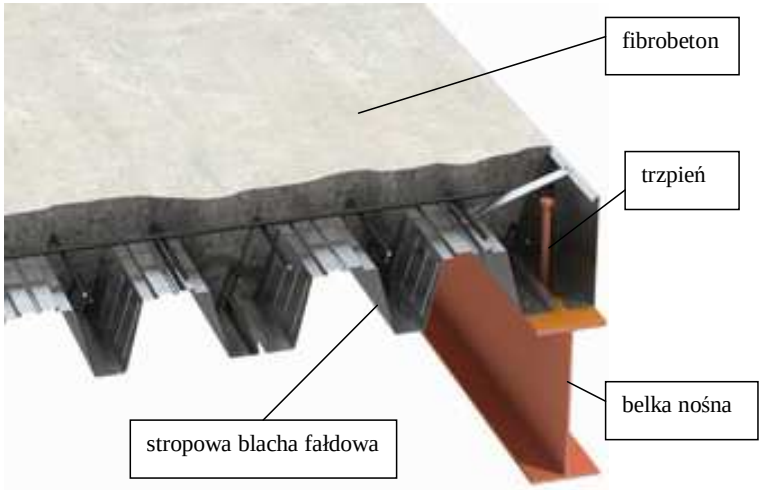


Rys. 15, 16. Petronas Towers i Burj Khalifa.

2.2. Fibrobetony

Fibrobetony należą do obszernego zbioru materiałów kompozytowych powstających w wyniku dodania krótkich włókien do matryc z zapraw cementowych lub betonów, zwykle drobnoziarnistych. Niekiedy do matrycy betonowej są wprowadzane różnego typu domieszki czy dodatki. Jako zbrojenie rozproszone dodawane są włókna stalowe o różnym ukształtowaniu, włókna z tworzyw sztucznych (np. polipropylenu, nylonu lub innych związków), włókna węglowe oraz pochodzenia organicznego [5]. Istotny efekt dodatku włókien obserwuje się w betonach o uziarnieniu do 8 mm i coraz mniejszy w miarę dalszego wzrostu wielkości ziaren kruszywa (nawet pomimo wydłużania włókien) [6]. Najbardziej popularne jest stosowanie włókien stalowych.

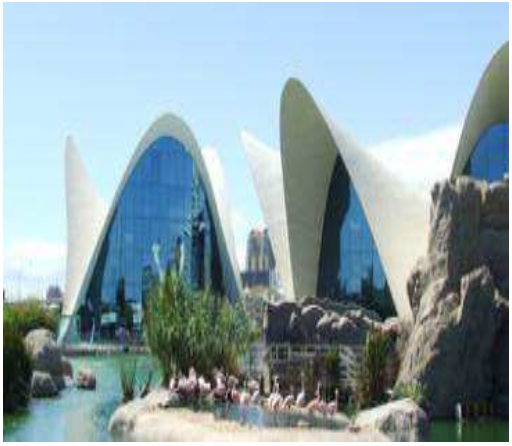
Powszechnie fibrobeton z dodatkiem włókien stalowych jest stosowany do wykonywania posadzek przemysłowych, nawierzchni drogowych i lotniskowych. Z fibrobetonu wykonuje się także fundamenty pod maszyny i inne elementy narażone na obciążenia dynamiczne. Poza tym beton z dodatkiem fibry wykorzystywany jest przy realizowaniu metody betonu natryskowego, na przykład jako obudowa budowli podziemnych lub przy pracach remontowo-naprawczych. Jednocześnie należy zauważyć, że coraz częściej stosuje się fibrobeton jako materiał na elementy konstrukcyjne. Przykładem mogą być najnowsze rozwiązania konstrukcyjne, jakimi są stropy zespolone stalowo-fibrobetonowe (rys. 17) lub elementy zbrojone pochłaniające energię zniszczenia w przypadku obiektów narażonych na oddziaływania sejsmiczne [7].



Rys. 17. Fibrobetonowy strop zespolony.

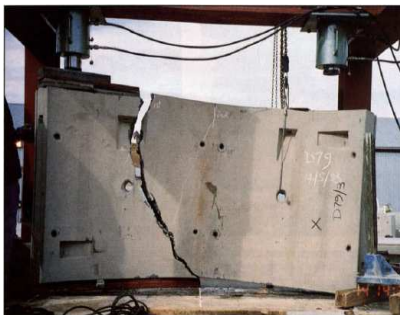
Ciekawym przykładem zastosowania fibrobetonu w budownictwie wodnym jest wierzchnia płyta zapory w Longshua (Chiny), która znajduje się w strefie oddziaływań sejsmicznych [8]. Obiekt ten znajduje się w środowisku na przemian mokrym i suchym, okresowo oddziaływuje na niego duża różnica temperatur (w dzień i w nocy). Część paneli zapory wykonano z betonu zbrojonego tradycyjnie, a cześć z tego samego betonu z

dodatkiem włókien stalowych. Najdłuższy panel z fibrą ma 75 metrów i nie obserwuje się na nim wyraźnych rys nawet po ostatnim trzęsieniu ziemi.



Rys. 18, 19. Powłoki wykonane w Europejskim Parku Oceanograficznym w Walencji.

Innym przykładem zastosowania włókien stalowych w elementach konstrukcyjnych jest cienka struktura powłokowa budynków znajdujących się w Europejskim Parku Oceanograficznym w Walencji. Budowle te są kombinacją betonu zbrojonego tradycyjnie i fibrobetonu (rys. 18, 19). Inne konstrukcje do budowy których, używa się betonu z dodatkiem fibry to tunele, węzły kolejowe, zbiorniki, baseny, konstrukcje odporne na wybuchy, elementy wzmocnienia wzgórz i zboczy, rury i ściany (rys. 20) [9, 10].



Rys. 20. Przykład fibrobetonowego elementu tubingowego badanego w skali naturalnej [10].

Włókna polipropylenowe są najczęściej stosowane jako strukturalne zbrojenie w betonie. Szczególnie ich chropowata powierzchnia zapewnia efektywne zamocowanie i gwarantuje szybkie, trójwymiarowe rozmieszczenie w matrycy betonowej. Włókna te stosowane są w bardzo szerokim zakresie: w prefabrykacji, do betonu monolitycznego, do betonu natryskowego, przy wykonywaniu torów podsuwnicowych, w budownictwie mostowym, w konstrukcjach stropowych, w płytach posadzkowych, przy wykonywaniu pali betonowych, elementów cienkościennych i fundamentów; w konstrukcjach betonowych narażonych na

temperatury pożarowe oraz przy pracach naprawczych i w innych aplikacjach specjalnych. Na podstawie wytycznych dotyczących fibrobetonu można wykazać, że dzięki włóknom tego typu w niektórych płytach, elementach fundamentowych, ścianach i innych konstrukcjach, można wyeliminować częściowo lub całkowicie zbrojenie stalowe. Rys. 21 przedstawia budowę Millenium Tower w Wiedniu, gdzie część stropów i górny taras były realizowane z fibrobetonu na bazie włókien polipropylenowych.

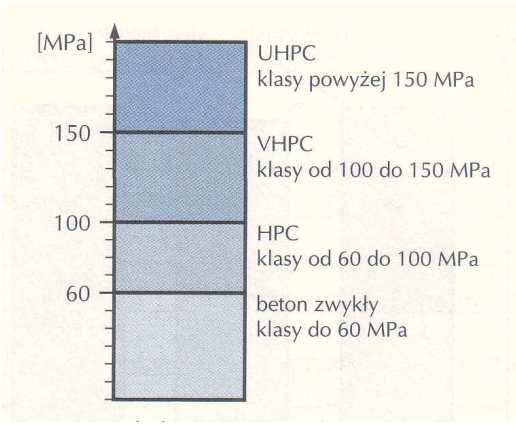
Bardzo dobre efekty uzyskuje się z zastosowania fibrobetonu na bazie włókien polipropylenowych w prefabrykacji betonu architektonicznego, w elementach elewacyjnych (rys. 22).

Rys. 21. Widok na Millenium Tower w Wiedniu w czasie realizacji.

Rys. 22. Prefabrykowane elementy elewacyjne Domu Seniora przy Stadionie Św. Jakuba, Bazylea, Szwajcaria.

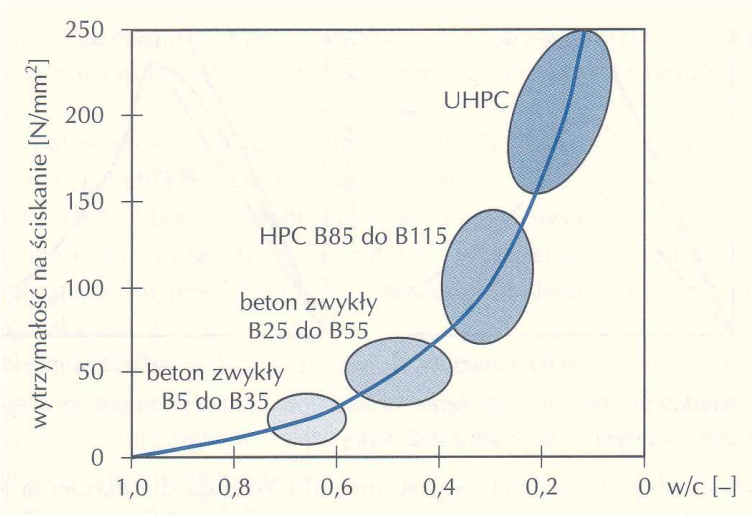
2.3. Betony reaktywne (RPC) i ultrawysokowartościowe (UHPC)

Ze względu na skład tych betonów, w szczególności przez ograniczenie wymiaru maksymalnego ziarna d≤600μm (czasami dopuszcza się 1000 μm [11]), mówi się o betonach z proszkiem reaktywnym (Reactive Powder Concrete – RPC). Często zamiennie jest stosowane określenie betony ultrawysokowytrzymałościowe (Ultra High Performance Concrete – UHSC) [4], czyli betony o $f_{ck,cub}$ > 150 MPa (rys. 23).



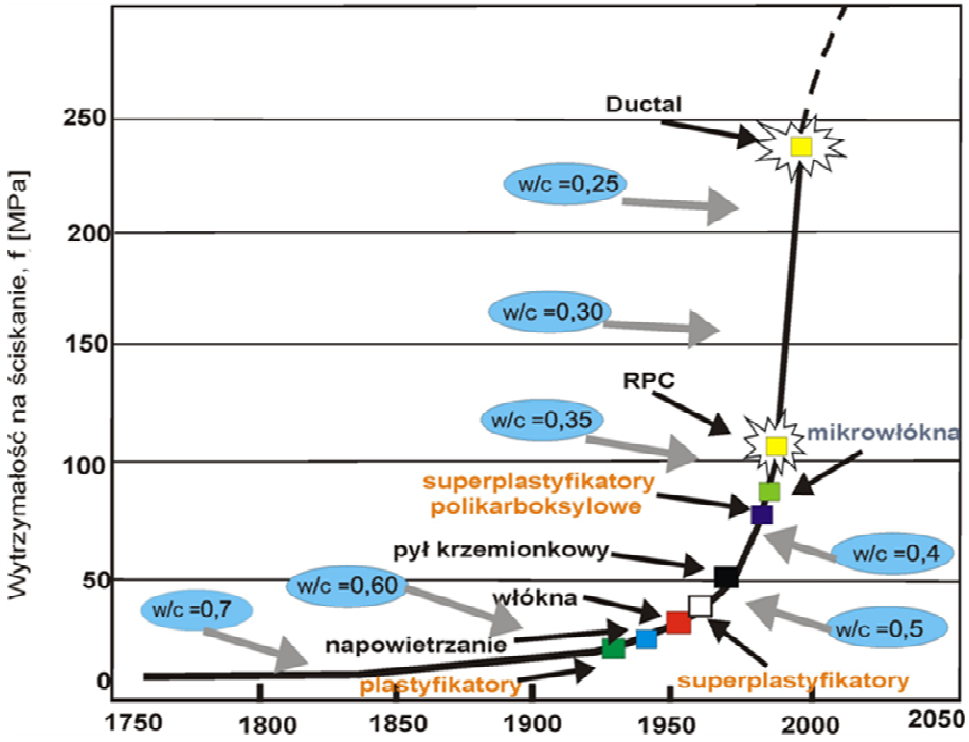
Rys. 23. Podział betonów ze względu na wytrzymałość na ściskanie [4].

Taki beton charakteryzuje wysoka zawartość cementu (ok. 1000 kg/m^3) i pyłu krzemionkowego (200 do 300 kg/m^3), dodatek odpowiedniego superplastyfikatora oraz ekstremalnie niski stosunek w/c (rys. 24).



Rys. 24. Wzrost wytrzymałości na ściskanie w zależności od w/c [4].

Wprowadzenie domieszek upłynniających, które umożliwiły zmniejszenie stosunku wodno-cementowego, spowodowało gwałtowny wzrost uzyskiwanych wytrzymałości. Domieszki, a także dodatki do betonu doprowadziły do transformacji od betonu zwykłego do betonu UHSC (rys. 25).

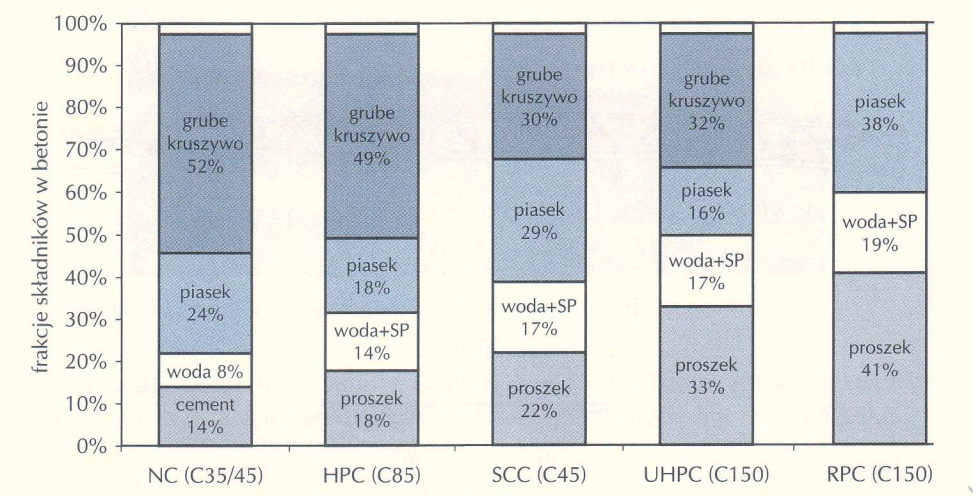


Rys. 25. Krzywa rozwoju betonu [12].

Średnia wielkość grubych cząstek w tym betonie wynosi 200μm. Wyeliminowanie kruszywa grubego i zastąpienie go piaskiem prowadzi do zmniejszenia wielkości mikropęknięć pochodzenia mechanicznego, termicznego i chemicznego, co wywołuje znaczny wzrost wytrzymałości na ściskanie (nawet do 800 MPa) i zginanie (nawet do 150 MPa). Jako zbrojenie w RPC stosuje się mikrowłókna stalowe (o dł. ok. 12-13 mm), a dla udoskonalenia mikrostruktury stwardniałego zaczynu prowadzona jest obróbka cieplno-wilgotnościowa [4, 13, 14, 15].

Ostatnio jednak rozpoczęto prace nad UHPC z kruszywem gruboziarnistym, przy maksymalnym wymiarze ziaren do 8 mm (a nawet do 16 mm) [4, 11, 16, 17]. Użycie grubego kruszywa pozwala nie tylko zmniejszyć objętość zaczynu cementowego, ale także prowadzi do pewnych zmian w procesie mieszania i we właściwościach mechanicznych [16]. Na bazie tych prac okazuje się, że stosując grube kruszywo, można osiągnąć także wytrzymałości na ściskanie przekraczające 150 MPa (rys. 260).

Zastosowanie UHPC ogranicza się właściwie do elementów prefabrykowanych i o stosunkowo małych przekrojach, co związane jest głównie z obróbką cieplną [4].



Rys. 26. Objętość składników w NC (Normal Concrete), HPC, SCC, UHPC i RPC [4].

Dotychczas z laboratoriów wprowadzono na rynek dwa rodzaje RPC/UHPC, tj. BSI i DUCTAL. Trzeba stwierdzić, ze do dzisiaj znacznie większą popularność zdobył DUCTAL. Istotną cechą tego materiału jest fakt, że współczynnik pełzania kształtuje się na poziomie 0,8, a po obróbce termicznej można go poprawić nawet do 0,2. Produkt ten nie ulega skurczowi, ponieważ stosunek w/c jest bardzo niski. Jednak można zaobserwować kurczliwość autogenną, która kształtuje się od 300 do 400 mikroodkształceń. Producenci jednak poradzili sobie z tym problemem, bo po poddaniu go obróbce cieplnej, zjawisko to zanika. DUCTAL cechuje wysoka ognioodporność i trwałość, a to dzięki szczelnej mikrostrukturze. Cecha ta skutkuje dużą odpornością na czynniki korozyjne. Duża wytrzymałość na rozciąganie, a tym samym na zginanie, prowadzi do dobrej wytrzymałości ścinającej, dzięki czemu można zrezygnować ze zbrojenia pasywnego (prętów zbrojeniowych i strzemion), co w dalszej mierze skutkuje zastosowaniem cieńszych przekrojów.

Rys. 27. Wiata dworca kolejowego w Calgary.

Zastosowanie tego produktu jest szerokie. Budowle wymagające wysokiej wytrzymałości mechanicznej, trwałości, a także odpowiednich walorów estetycznych mogą być stworzone dzięki innowacyjnemu produktowi jakim jest DUCTAL. Z ciekawszych obiektów zrealizowanych w DUCTALu należy przytoczyć nową stację autobusową RATP w Thiais (Francja), dworzec kolejowy w Calgary (Kanada) oraz mosty dla pieszych w Sherbrooke (Kanada), Seoulu (Korea) i Sakata Mirai (Japonia), rys. 27-29.

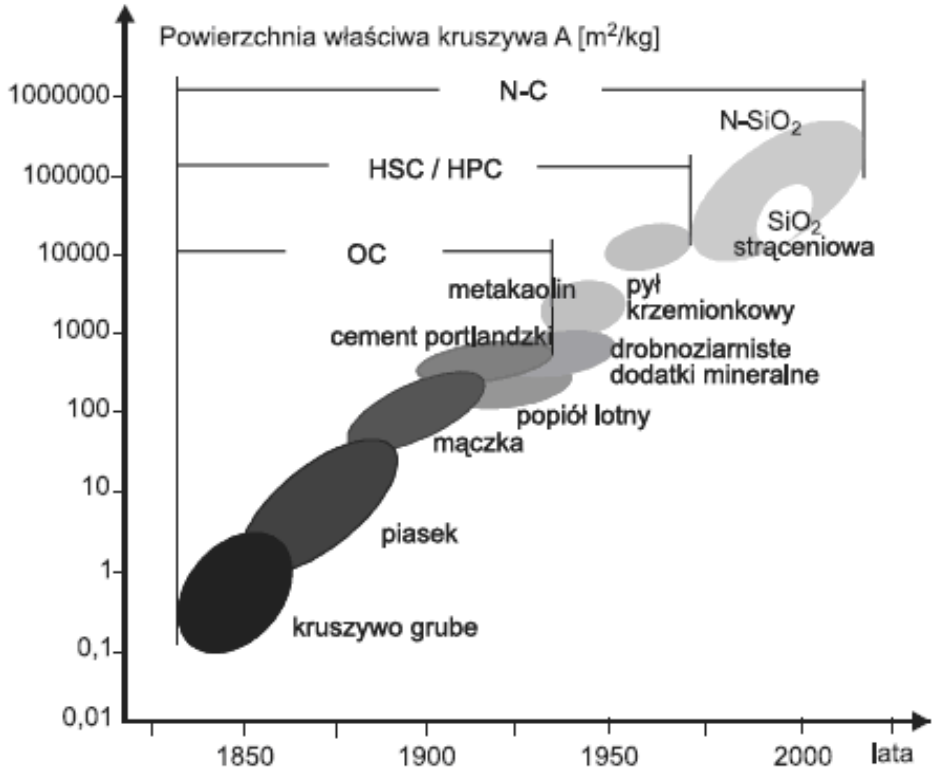
Rys. 28. Most dla pieszych Seonyu w Seoulu.

Rys. 29. Stacja autobusową RATP w Thiais.

2.4. Nano-betony

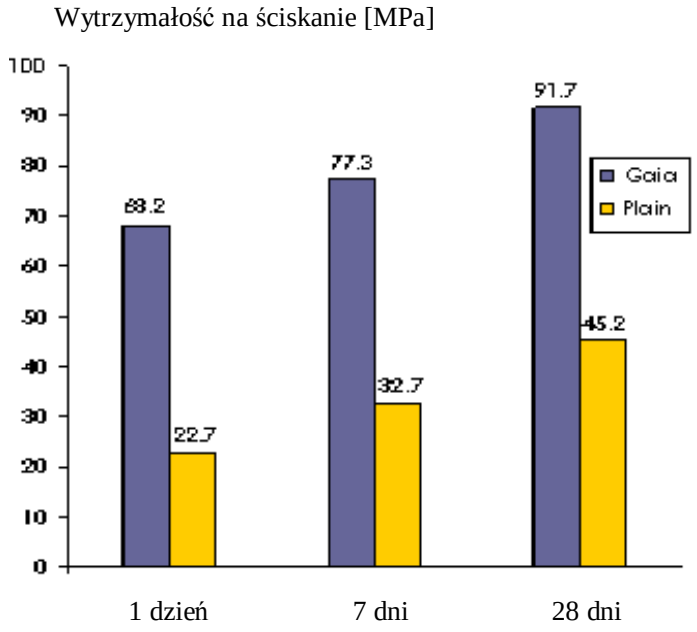
W ostatnich latach obserwuje się znaczny rozwój nanotechnologii, gdyż świat na jej rozwój przeznacza ponad 5 mln euro rocznie [18]. Nanoinżynieria pozwala ująć problemy inżynierskie w sposób ciągły od nano do makro skali i uzasadnia właściwości techniczne materiałów, odwołując się do ich struktury. Nanotechnologia, a zwłaszcza nanomodyfikacja uzasadnia dalszy rozwój technologii betonu [19].

Zaczyn cementowy zawierający hydraty i pory rozpoznawalne w nanoskali stanowi bardzo obiecujący punkt wyjścia do nanomodyfikacji z użyciem niereaktywnych i reaktywnych nonocząsteczek. Dzięki zastosowaniu różnych domieszek upłynniających interwencja technologiczna następuje na coraz niższym poziomie. W związku z tym tendencją modyfikacji jest coraz większe zmniejszanie wielkości ziaren dodatków. Zaobserwować to można analizując zmianę minimalnej wielkość ziarna kruszywa: piasek – 150 000 000 nm, mączka piaskowa - 40 000 000 nm, popiół lotny 5 000 000 nm, pył krzemionkowy – 200 nm, krzemionka strąceniowa – 50 nm, a potem nanokrzemionka – ok. 5 nm (rys. 30), która wyznacza zakres pozyskiwania różnych odmian betonu: beton zwykły, beton wysokiej wytrzymałości oraz nanobetony [18, 19].



Rys. 30. Powierzchnia właściwa kruszywa w zależności od czasu wprowadzania wg. [Sobolev]; OC – beton zwykły, HSC beton wysokiej wytrzymałości; HPC beton wysokiej użyteczności; N-C nanobeton [19].

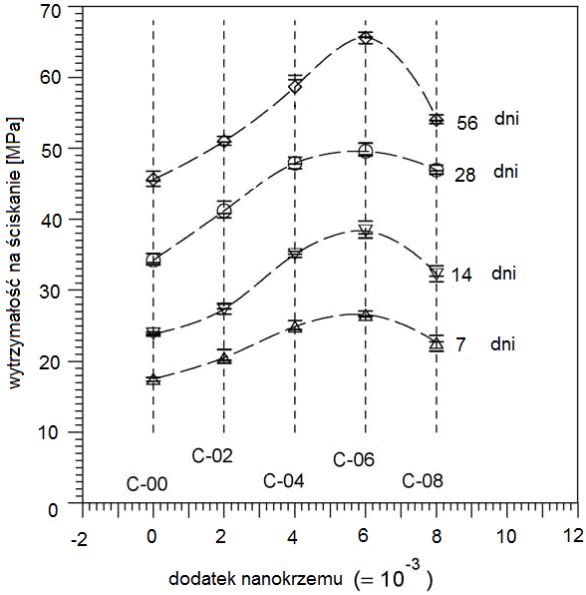
Czarnecki wyróżnia dwa rodzaje modyfikacji: prostą i złożoną [19]. Nanomodyfikacja prosta polega na jednostopniowym wprowadzeniu nanomodyfikatorów do mieszanki betonowej, a nanomodyfikacja złożona jest wielostopniowa. Przykładem nanotechnologii prostej jest modyfikacja Soboleva z Uniwersytetu w Meksyku, który wprowadził do betonu domieszkę Gaia opartą na 1,3% nanokrzemionki [20]. W efekcie modyfikacji otrzymał aż 3-krotne zwiększenie wytrzymałości po 1 dniu w stosunku do betonu świadkowego i 2-krotne zwiększenie wytrzymałości po 7 i 28 dniach (rys. 31).



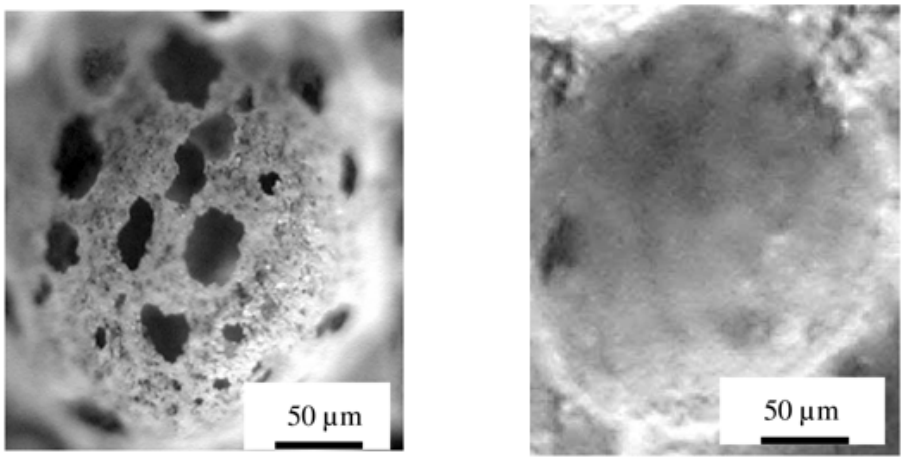
Rys. 31. Zmiana wytrzymałości na ściskanie po dodania superplastyfikatora Gaia [20].

Kolejnym przykładem są przeprowadzone badania nad betonem modyfikowanym nanocząsteczkami krzemu, przy użyciu cementu CEM I 32,5 [21]. Uzyskano wyraźny efekt polepszenia wytrzymałości na ściskanie, gdyż wytrzymałość wzrosła o ok. 40%. Przedstawiono także wartość graniczną nanocząsteczek krzemu, po której wzrost już nie następuje (rys. 32).

Przykładem nanotechnologii złożonej jest wprowadzenie do mieszanki betonowej nanorurek [22]. Do badań użyto substancji o gęstości 0,086 g/cm^3 zawierającej nanorurki o średnicy od 40 do 60 nm wypełnione miedzią. Do utworzenia betonu wybrano cement o gęstości 3,5 g/cm^3, do którego wprowadzono domieszkę zwierającą nanorurki w ilości 0,05% początkowej masy. Z badań wytrzymałościowych betonu modyfikowanego i niemodyfikowanego otrzymano stosunkowo niewielkie zmniejszenie gęstość cementu z domieszką (z 330 kg/m^3 na 309 kg/m^3) przy jednoczesnym zwiększeniu wytrzymałości na ściskanie o 70%, zmniejszeniu uległ również współczynnik przewodnictwa cieplnego o 20%. Zmodyfikowany beton ma także bardziej jednolitą strukturę niż beton zwykły (rys. 33) co jest główną przyczyną wzrostu w/w właściwości fizyczno-mechanicznych.



Rys. 32. Wytrzymałość na ściskanie próbek cementu z różną zawartością nanokrzemu [21].

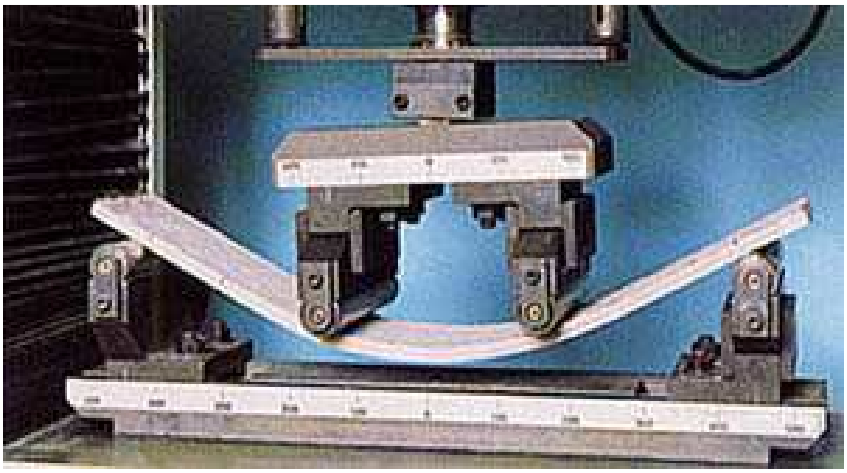


Rys. 33. Struktura badanego cementu portlandzkiego; po lewej próbka bez modyfikacji, po prawej z dodatkiem nanorurek [2].

2.5. Beton elastyczny (ECC)

W 2004 roku zespół naukowców z Uniwersytetu Michigan wynalazł beton elastyczny (bandable concrete). Pracę nad tym materiałem trwały 10 lat. Materiał wynaleziony przez

naukowców z Uniwersytetu Michigan wygląda jak normalny beton, posiada jednak 500 razy większą wytrzymałość na zginanie i jest 40% lżejszy (rys. 34).

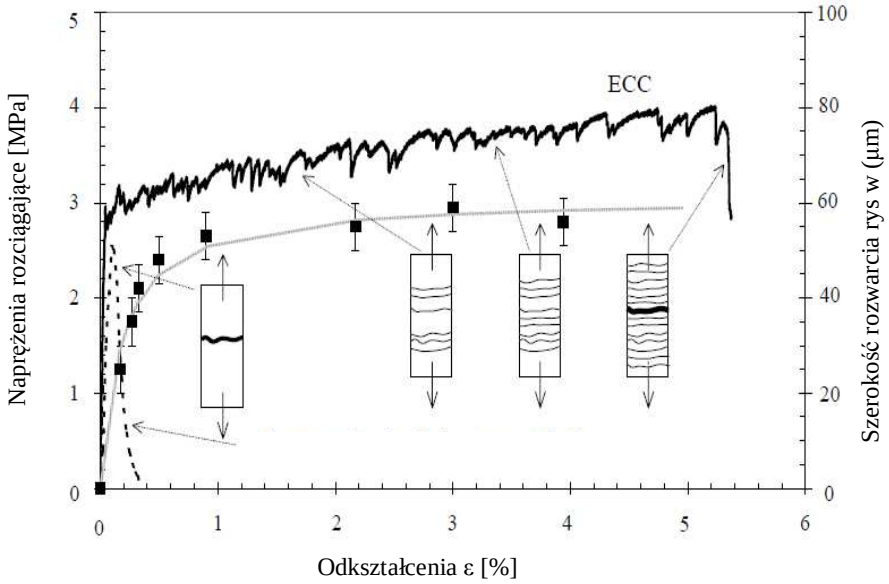


Rys. 34. Próba zginania betonu ECC [23].

Za jego parametry w znacznej mierze odpowiedzialne są mikro włókna polimerowe, które stanowią 2% jego składu. Technologię tą rozwija firma Engineered Cement Composites (ECC), która nowy beton stosowała już w swoich projektach w Japonii, Koreii, Szwajcarii i Australii. W Stanach Zjednoczonych zaczął być już masowo produkowany. Wprowadzenie nowych norm budowlanych i błyskawicznie rosnące koszty ubezpieczenia powodują tendencję do opracowywania nowych materiałów i konstrukcji, które są bardziej odporne na huragany i inne klęski żywiołowe. Jednym z takich wynalazków jest beton elastyczny (ECC), w którym kruszywo gruboziarniste zastąpiono siecią starannie zaprojektowanych i powlekanych włókien polimerowych. Niestandardowe włókna polimerowe sprawiają, że beton może się zginać. Głównym twórcą nowego materiału jest profesor Victor C. Li, z Uniwersytetu Michigan. Opisując szczegółowo ten nowy wynalazek twierdzi, że kluczem do sukcesu tej niestandardowej struktury jest synergiczna praca materiałów. Z powodu dużego obciążenia, początkowa wada materiałowa przekształca się w pęknięcie, które będzie się rozszerzać w ściśle kontrolowany sposób. Pęknięcie będzie o wiele mniejsze od ludzkiego włosa. Obciążenie będzie przenoszone przez włókna poprzeczne do tego pęknięcia. Włókna te, z kolei, przenoszą obciążenie z powrotem na inne części kompozytu. Specjalistyczne włókna polimerowe, stanowiące około 2 procent objętości mieszanki betonowej, mają kluczowe znaczenie dla zwiększenia wytrzymałości. W efekcie, te mikrowłókna, zastępują gruboziarniste kruszywo i działają jak wiązadła, umożliwiające zginanie się betonu. Prof. Li koncentruje się głównie na dwóch typach polimerów, które mają być używane jako włókna: z polialkoholu winylowego (PVA) powlekane w polietylenie o wysokim module Younga oraz powlekane w wysokowytrzymałym polipropylenie [23]. Cechami decydującymi o doborze włókien są wytrzymałość włókna, jego zdolność do zginania i wielkość dopuszczalnego odkształcenia przy zginaniu (rys. 35).

Kluczem do plastyczności nowego materiału betonowego jest powłoka na włóknach z tworzywa sztucznego, umożliwiająca ruch pod obciążeniem. Sposób, w jaki włókno pracuje wewnątrz kompozytu, musi być dokładnie taki, aby spełniał odpowiednie założenia.

Oznacza to, że włókna się nie wysuną. W przeciwnym wypadku nie jest to już kompozyt. Z drugiej strony, włókna nie mogą być związane zbyt mocno. W takim przypadku nie mogłyby się one przesuwać – złamałyby się. W obu przypadkach, nastąpiłby powrót do kruchego materiału, a celem było uzyskanie plastyczności. Włókna są mieszane bezpośrednio z piaskiem i pozostałymi składnikami mieszanki betonowej, dzięki czemu stają się izotropowe, czyli wykazują taką samą wytrzymałość we wszystkich kierunkach, tak samo jak ma to miejsce w przypadku metalu. Materiał zespolony może być wylewany, natryskiwany lub nawet wytłaczany. W rezultacie beton ECC będzie służył ochronie przed klęskami żywiołowymi. Inżynierowie już wykorzystują kompozyty ECC do budowy rdzeni budynków w Japonii, jako zabezpieczenie przeciwko trzęsieniom ziemi. Prof. Li podkreśla także, że ECC pozwala obniżyć koszty, ponieważ w efekcie zużywa się mniejszej ilości tego materiału.



Rys. 35. Typowa zależność σ-ε na rozciąganie dla ECC [23].

W Stanach Zjednoczonych materiał ten wykorzystano w 2007 r. do modernizacji odcinka mostu nad drogą I-94 w stanie Michigan. Płyta z ECC zastępuje złącze kompensacyjne tak, by powstał ciągły pomost (rys. 36). Stwarza ona możliwość rozwiązania niektórych problemów związanych z trwałością pomostów, takich jak np. przedwczesne pękanie. Oczekuje się, że ECC sprawdzi się i być może pozwoli to obniżyć koszty jego wytwarzania, gdy zostanie zdobyte doświadczenie w produkcji na dużą skalę. Beton elastyczny ECC użyto także w takich inwestycjach jak:

- Reppongi Tower w Tokyo (rys. 37),
- Nabeaure Yokohama Tower (rys. 38),
- most Mihara w Hokkaido.

Zastosowania ECC mogą być różne, np. jedna z australijskich firm wytwarza prototypową rurę wykonaną z ECC, aby zastąpić nią rurę wykonaną z żelbetu. Taka rura jest tańsza i bardzie wytrzymała niż rura żelbetowa.

Rys. 36. Renowacja mostu nad drogą I-94 w stanie Michigan.

Rys. 37. Reppongi Tower w Tokio.

Rys. 38. Nabeaure Yokohama Tower.

3. Modyfikacje użytkowe

3.1. Betony SCC

Betony samozagęszczalne zwane pod skrótem SCC (Self Compacting Concrete), to betony upłynnione, o normowym rozpływie od 500 do 700 mm, pozwalające na układanie bez wibrowania nawet przy złożonych kształtach i gęstym zbrojeniu. Przy stosunkowo małej ilości kruszywa i dużej ilości cementu (>600 kg/m^3) zasadnicze znaczenie mają efektywne superplastyfikatory, specjalne domieszki korygujące lepkość i zapobiegające segregacji oraz dodatki popiołów obniżające ciepło hydratacji [4]. Betony te wynaleziono i wprowadzono w Japonii w 1988r. Beton też był wykorzystywany przy realizacji najdłuższego mostu na świecie Akashi Kaikyo (rys. 39).

Rys. 39. Zastosowanie betonu SCC przy realizacji mostu Akashi Kaikyo [13].

Przykładem wprowadzonego na nasz rynek w 2009 r. betonu SCC może być *Agilia*, która zapewnia szczelne wypełnienie deskowania, nawet przy obecności gęstego zbrojenia, jedynie pod wpływem własnego ciężaru z równoczesnym zachowaniem najwyższej jednorodności [2]. Jest niezastąpionym produktem zwłaszcza w przypadku nie możliwości użycia lub wprowadzenia wibratorów i w przypadku dobudowy lub rozbudowy już istniejących, zwłaszcza historycznych czy zabytkowych obiektów i w przypadku przenikania się stali kształtowej i zbrojeniowej. Należy jednak pamiętać o znacznie dokładniejszym uszczelnieniu szalunków niż w przypadku betonu zwykłego, gdyż w innym wypadku nic w nim nie zostanie. Ciekawym obiektem zrealizowanym na bazie betonu *Agilia* jest Georgia Aquarium w stanie Georgia USA (rys. 40).

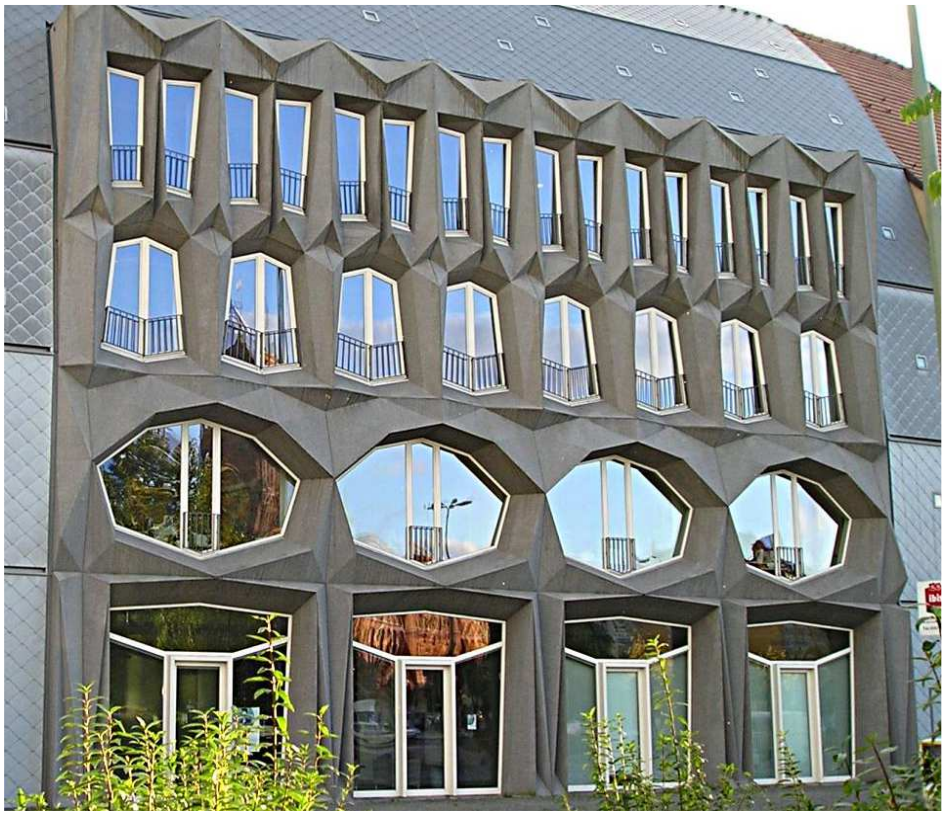
Rys. 40. Georgia Aquarium w Stanie Georgia.

Poniżej przedstawiono przykład zastosowania tego betonu w przypadku przebudowy budynku zabytkowego z przełomu XIX i XX w. w Poznaniu, na terenie najstarszej Gazowni w Polsce, którego stan techniczny i skomplikowane przenikanie się różnych rodzajów stali uniemożliwiało zastosowanie klasycznego betonu (rys. 41, 42).

Rys. 41, 42. Przebudowa budynku zabytkowego z przełomu XIX i XX w. w Poznaniu.

3.2. Betony architektoniczne

Beton architektoniczny jest specjalnym rodzajem betonu SCC, który stosuje się do wykonywania powierzchni zewnętrznych wielkich bloków i płyt ściennych, a także niektórych wyrobów, przy czym posiada on charakter dekoracyjny. Jego dekoracyjność uzyskuje się przez nadanie mu wymaganej faktury zewnętrznej i odpowiedniego koloru, w wyniku doboru odpowiednich składników betonu i obróbki powierzchni. Do typowych składników należą: barwniki, cementy kolorowe, kruszywa kolorowe frakcjonowane. W efekcie otrzymuje się imitację szlachetnych okładzin lub innych efektów przestrzennych (rys. 43).



Rys. 43. Zastosowanie betonu architektonicznego w Berliner Wasserbetriebe w Berlinie.

Przykładem wprowadzonego na nasz rynek w 2009 r. betonu dekoracyjnego może być *Artevia*, która występuje w różnych rodzajach, jako: beton gładki, beton z eksponowanym kruszywem i beton kolorowy. Jako beton dekoracyjny charakteryzuje się różnorodnością barw, wzorów i tekstur, pozwalająca na nieograniczoną kreatywność [2]. Wytrzymałość na ściskanie tego produktu kształtuje się od 20 do 50 MPa. Można osiągnąć prawie każdy odcień, ponieważ jest dostępna podstawowa gama pigmentów. Należy jednak uważać na punkt nasycenia kolorem, po przekroczeniu tej granicy nie dojdzie do polepszenia koloru (rys. 44, 45).

Rys. 44, 45. Przykłady zastosowania *Arterii.*

3.3. *Extensia* i *Chronolia*

W najbliższym czasie na nasz rynek trafią najnowsze osiągnięcia użytkowej modyfikacji betonu jakimi są; *Extensia* i *Chronolia*. Póki co zastosowano je na razie we Francji, Wielkiej Brytanii i USA [2].

Extensia została stworzona do wykonywania poziomych konstrukcji płytowych. Poprzez precyzyjną kontrolę skurczu, beton ten pozwala na wykonanie elementu płytowego o powierzchni do 400 m^2, bez użycia niezbędnego zbrojenia przeciwskurczowego. Posiada on dużą odporność na ścieranie i charakteryzuje się znaczną rysoodpornością.

Chronolia to beton stworzony w celu osiągania jak najszybszego przyrostu wytrzymałości na ściskanie. W przypadku jego zastosowania usunięcie szalunków jest już możliwe po upływie 2 godz. od momentu zabetonowania, co prowadzi do znacznego przyspieszenia wydajności pracy.

3.4. Betony przeźroczyste

Aron Losonczi, 27-letni węgierski architekt, w 2001 roku wpadł na pomysł aby najbardziej popularny materiał budowlany połączyć z włóknami optycznymi i w ten sposób uzyskać nowy rodzaj betonu, mogącego przepuszczać światło (rys. 46). Poprzez zmieszanie betonu o stosunkowo wysokiej jakości z ułożonymi poprzecznie do muru włóknami światłowodowymi (ok. 4%) uzyskuje się beton, który posiada nowe właściwości, który nazwał Litracon. W niedługim czasie po tym wynalazku niemiecki projektant Andreas Bittis prezentuje materiał budowlany o identycznych właściwościach co Litracon, który nazywa Luccon (rys. 47). Oba betony produkowane są w bloczkach o różnych rozmiarach co ułatwia ich montaż [24, 25, 26].Taki mur, nawet o grubości nawet do 20 metrów, jest przezroczysty na tyle, że widać sylwetki ludzi stojących po drugiej stronie wraz z rzeczywistymi kolorami. Włókna szklane nie pogarszają także wytrzymałości betonu, dzięki

czemu prefabrykowane bloki mogą być wykorzystywane także w strukturach pracujących pod obciążeniem. Gęstość omawianego betonu wynosi od: 2100 do 2300 kg/m^3, wytrzymałość na ściskanie 50 MPa, natomiast wytrzymałość na rozciąganie – 7 MPa. Zatem parametry betonu pozostają na wysokim poziomie, podobnie do ceny produktu, która obecnie jest bardzo wysoka (około 700 euro za 1m^2 ściany o grubości 2,5 cm).

Rys. 46. Przykład ściany z betonu Litracon.

Rys. 46. Przykład ściany z betonu Luccon.

Rdzeń włókna szklanego ma wielkość kilku tysięcy nanometrów a więc nie zalicza się do wytworów nanotechnologii. Jednakże jest to bardzo dobry przykład, który obrazuje fakt, że wprowadzanie dodatków o bardzo małych rozmiarach do materiałów diametralnie zmienia lub odkrywa nowe ich właściwości.

Przezroczysty beton może być wykorzystywany jako standardowy materiał budowlany. Można go obrabiać dokładnie tak samo jak zwykły beton (cięcie, kruszenie, rozbijanie). Bardzo często wykorzystuje się go do tworzenia sztuki oraz jako materiał dekoracyjny. Niestety ze względu na konieczność zamawiania określonych rozmiarów bloków nie jest tak rozpowszechniony w przypadku budowli niestandardowych.

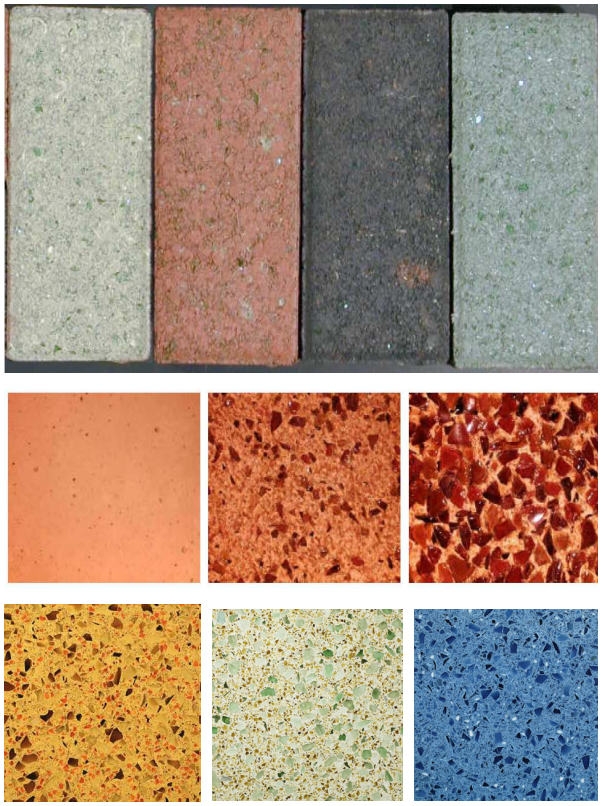
3.5. Szklany beton

Współczesny świat i nauka dążą do jak największego recyclingu materiałów. Przykładem takiego podejścia jest szklany beton, czyli mieszanka odpowiednio przygotowanej stłuczki szklanej wraz ze specjalnie dobranym cementem. Od dekad próbowano zastosować tłuczone szkło jako wypełniacz w mieszance betonowej jednak wysiłki okazały się nadaremne. Istniał szereg problemów, które należało pokonać chcąc stworzyć szklany beton. Największym z nich jest reakcja alkaliczno-krzemionkowa między cementem portlandzkim a stłuczką szklaną, powodująca osłabienie betonu. Była ona przez wieki zagadką niemożliwą do rozwikłania. Jednak w ostatnim czasie naukowcy z Uniwersytetu Columbia zajęli się tą sprawą bliżej. Wiadomo, że wytrzymałość betonu zależy w głównej mierze od powiązania matrycy cementowej z kruszywem. Zamiana chropowatego kruszywa na gładkie kawałki szkła znacznie by osłabiła już stosunkowo niską wytrzymałość betonu. Problem ten można pominąć poprzez zastosowanie odpowiedniej technologii obróbki szkła. Nadal istnieje jednak problem reakcji alkaliczno-krzemionkowej, której meritum wygląda następująco. Krzemionka ze stłuczki szklanej może łączyć się z alkaliami cementu portlandzkiego tworząc żel krzemionkowy. Żel ten pochłania wodę po czym rozszerza się niszcząc strukturę betonu jednocześnie go osłabiając. Kolejnym problemem jest zastosowanie niedostatecznie oczyszczonego szkła zawierającego cukier, który powoduje wydłużenie czasu wiązania betonu i spadek jego końcowej wytrzymałości. Zespół profesora Mayera opracował specjalne metody zapobiegające występowaniu resztkowych ilości cukru oraz reakcji alkaliczno-krzemionkowej m.in. poprzez: dokładne oczyszczenie szklanego kruszywa, tworzenie zasado-odpornego szkła np. przez pokrywanie go cyrkonem, użycie cementu niskozasadowego i odpornego na reakcję alkaliczno–krzemionkową lub zastosowanie niskozasadowych modyfikatorów cementu [27].

Rys. 47. Przykładowe kształty tłuczki szklanej stosowanej do szklanego betonu.

Szkło przed dodaniem do cementu jest myte w wysokiej temperaturze i wysuszone, a następnie wrzucane do specjalnej maszyny bębnowej w celu stępienia krawędzi i nadania żądanego kształtu (rys. 47).

Pomimo skłonności szkła do reakcji w zasadowym środowisku posiada ono również szereg zalet, takich jak: brak absorpcji wody czy własności pucolany, przez co może zastępować zarówno kruszywo jak i cement. Ponadto szkło jest jednym z twardszych znanych nam materiałów (ok. 7 w skali Mohsa), co jest ważnym aspektem przy tworzeniu betonów BWW.



Rys. 48. Przykładowe produkty ze szklanego betonu: kostki brukowe, panele elewacyjne i płytki podłogowe.

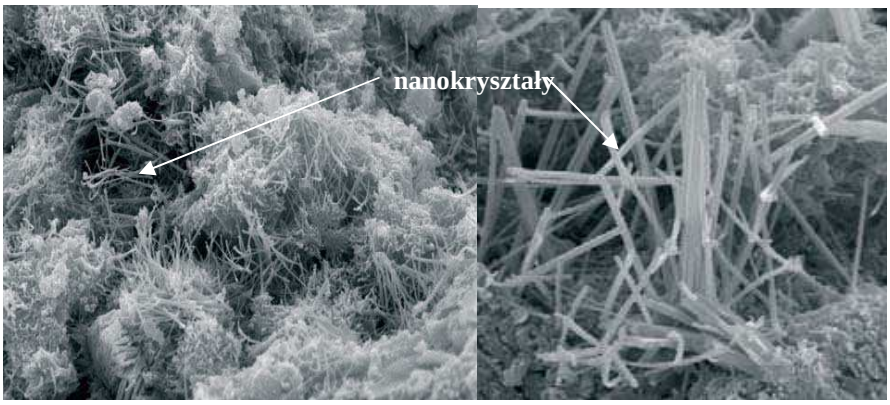
Rozwiązanie to posiada co najmniej dwie zalety, gdyż utylizowane jest szkło (poza tym obróbka do celów budowlanych jest znacznie tańsza od recyclingu spożywczego). Kolejną zaletą jest wytrzymalszy i ciekawszy w wyglądzie produkt, którego kolor, strukturę i fakturę możemy dowolnie zmieniać. Lista produktów ze szklanego betonu jest bardzo długa: bloczki ze szklanego betonu (wzmacniane w razie potrzeby włóknem szklanym), blaty kuchenne bądź łazienkowe, płyty chodnikowe, atrakcyjne posadzki, trwałe stoły ogrodowe, schody, elementy przykominkowe i wreszcie najróżniejsze elementy architektoniczne, od prefabrykowanych płyt ściennych zewnętrznych i wewnętrznych, poprzez ścianki działowe do okładzin ściennych i ławek ogrodowych (rys. 48, 49).

Rys. 49. Blat stołowy wykonany ze szklanego betonu.

3.6. Betony samonaprawialne

Idea samonaprawialności polega na tym, że materiał naprawczy zostaje umieszczony wewnątrz betonu jeszcze zanim nastąpi uszkodzenie, czyli podczas wytwarzania mieszanki betonowej. Kiedy naprężenia wewnętrzne w betonie przekraczają założony poziom, następuje aktywacja materiału naprawczego. Różne metody samonaprawiania różnią się przede wszystkim sposobem tej aktywacji [28].

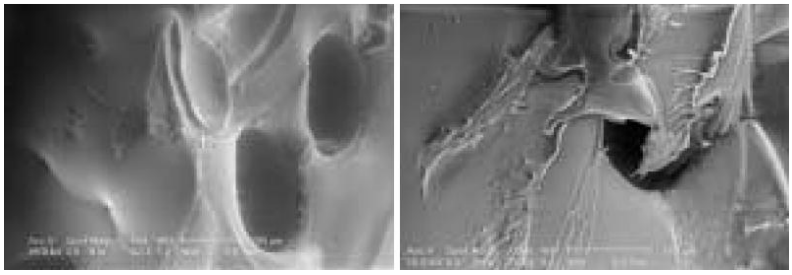
Pierwszym przykładem jest metoda samonaprawy na bazie reakcji chemicznych. Polega ona na wypełnianiu powstałych rys w betonie przy pomocy reakcji wolnego wapna i wody w efekcie czego powstają miliony krystalicznych włókien. Wzrastające włókna wypełniają pory kapilarne powodując zmniejszenie ich średnicy, blokując transport wody do wnętrza betonu. Wykorzystując ten fakt opatentowana została domieszka do betonu o właściwościach *samonaprawialnych* Betocrete-C17(BV), która jest płynną substancją wprowadzaną do mieszanki betonowej w ilości 2-3% masy cementu [29]. Oprócz zwężenia porów kapilarnych domieszkowanego betonu obserwuje się wypełnianie mikrorys pod wpływem wody. Wypełnienie stanowią nanokryształy, które stają się integralną częścią betonu, nie obniżając jego wytrzymałości w miejscach pęknięć (rys. 50).



Rys. 50. Widok betonu z dodatkiem Betocrete-C-17(BV); po lewej powiększenie 5 000x po prawej 10 000x [29].

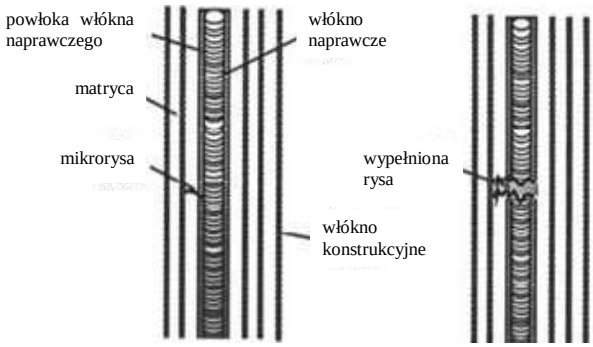
Kolejnym przykładem jest metoda samonaprawy przy pomocy mikrokapsuł z żywicą epoksydową. Tradycyjne kompozyty polimerowo-cementowe, w których dodatek polimeru tworzy osobną ciągłą fazę wymaga stosowania utwardzacza, który jest dodatkowym składnikiem kompozytu, stanowi to utrudnienie przy ich wytwarzaniu. Duża reaktywność grup epoksydowych w łańcuchach nieutwardzonej żywicy powoduje, że w pewnych warunkach i w pewnym zakresie możliwe jest sieciowanie polimeru bez utwardzacza, jedynym warunkiem jest obecność czynnika katalitycznego. Okazało się, że tym czynnikiem może być wodorotlenek wapnia obecny w zaczynie cementowym [28].

Y. Ohama zaproponował koncepcję betonu samonaprawialnego z mikrokapsułkami z żywicą epoksydową do samoiniekcji rys powstałych przy przeciążeniu elementu. W mieszance betonowej przez intensywne mieszanie rozprowadza się żywicę epoksydową. W przypadku zarysowania żywica uwalnia się z kapsuły stykając się z powierzchnią utworzonej rysy, a pod wpływem alkalicznego środowiska utwardza się, konsolidując rysę (rys. 51). Wypełnione rysy stają się integralną częścią betonu i nie pogarszają jego parametrów wytrzymałościowych [1, 18, 28].

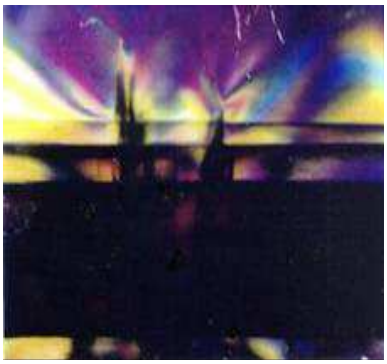


Rys. 51. Uwalnianie środka naprawczego z pękniętych kapsułek [28]

Kolejną metodę z użyciem mikrokapsuł zaproponowała Carolyn M. Dry z University of Illinois [30, 31]. Opiera się ona na umieszczaniu środka naprawczego w kruchych włóknach, które następnie dodaje się do mieszanki betonowej jako składnik zbrojenia rozproszonego. Przekroczenie odpowiedniego naprężenia powoduje pęknięcie włókna, czego efektem jest uwolnienie się środka naprawczego do powstałej mikrorysy i jej scalenie (rys. 52, 53).

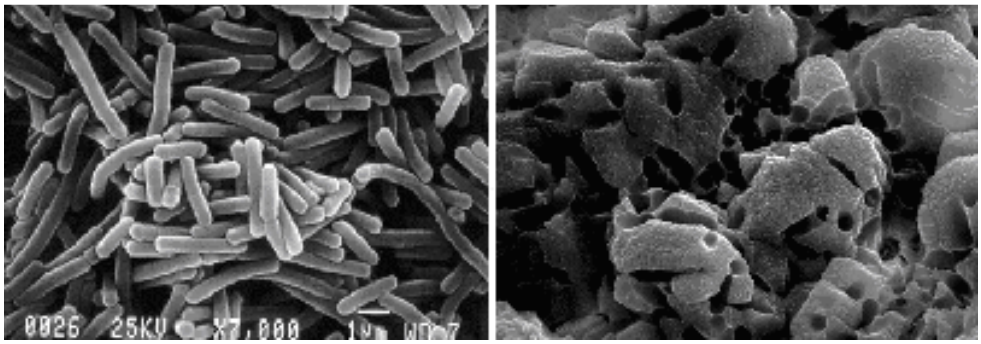


Rys. 52. Schemat mechanizmu samonaprawczego wg Carolyn M. Dry [30]



Rys. 53. Zdjęcie mikroskopowe uwalniającego się środka naprawczego do matrycy [30]

Ciekawą propozycją jest także zastosowanie bakterii do samonaprawy betonu. Nanomodyfikatory „vivoaktywne”, czyli bakterie Bacillus Pasteurii, osadzone w rysie mogą ja konsolidować. Bakterie te pod wpływem środowiska zewnętrznego, z którym stykają się w momencie wystąpienia rysy wytrącają węglan wapnia ($CaCO_3$), aż do momentu wypełnienia nim rysy (rys. 54). Ostatecznie całe komórki przybierają formę krystaliczną. Przy odpowiednio dobranej zawartości materiału mikrobiologicznego obserwuje się znaczny wzrost wytrzymałości betonu na ściskanie (nawet do 80%). Kolejną zaletą tego rozwiązania jest jego ekologiczność, bakteriobeton nie wpływa negatywnie na środowisko i nie jest szkodliwy dla organizmów żywych. Wadą natomiast jest tutaj wąski zakres efektywności działania bakterii. Niewłaściwy dobór stężenia biomasy w betonie może powodować nawet skutki odwrotne do zamierzonych. Ponadto optymalne działanie Bacillus Pasteurii wykazuje tylko dla pH=10, natomiast alkaliczność betonu w miarę upływu czasu maleje, co sprawia, że paradoksalnie zdolność samonaprawiania obniża się po pewnym czasie [1, 18, 28].



Rys. 54. Mikrostruktura Bacillus Pasteurii; po lewej przed wytrąceniem węglanu wapnia; po prawej po wytrąceniu $CaCO_3$.

W 2009 roku zespół naukowców z Uniwersytetu Michigan również od kierunkiem prof. Li zaproponował modyfikację betonu ECC w celu jego samonaprawialności (self-healing concrete). Powstały beton samonaprawczy jest w stanie sam się naprawiać, bez potrzeby

interwencji z zewnątrz. Potrzebne są tylko woda i dwutlenek węgla. Jest to możliwe dzięki temu, że wykorzystując technologię betonu elastycznego, w nowym materiale zamiast dużych uszkodzeń tworzą się małe mikrorysy, przez co łatwiej je naprawić [32].

Zjawisko to w obrazowy sposób opisuje sam prof. Victor Li : *To jest tak jak masz małe zacięcie na ręce. Twój organizm może wtedy sam wyleczyć to zacięcie. Gdy masz duże przecięcie, organizm nie jest w stanie tego zrobić i potrzebne jest szycie* (rys. 55).

Rys. 55. Prof. V. Li prezentujący swój samonaprawialny beton.

W trakcie prowadzonych badań, nowy rodzaj betonu odzyskiwał całkowitą wytrzymałość pierwotną po wcześniejszym wywołaniu w nim odkształcenia przy rozciąganiu o wartości 3% (rys. 35). Wynika z tego, że materiał ten może być uszkodzony, lecz nadal bezpiecznie może spełniać swoją funkcję. W związku z tym, iż zamiast jednego dużego uszkodzenia powstaje wiele mikrorys. Podczas doświadczeń na Uniwersytecie w Michigan średnie rysy miały szerokość 60 μm. Prof. Li ocenił, że w ten sposób mogą być naprawione wszystkie rysy o rozwartości <150μm. Self-healing concrete jest bardziej plastyczny niż zwykły beton, co sprawia że przyjmuje właściwości, które posiada metal. Zamiast łamać się, beton się wygina, dzięki specjalnym polimerowym włóknom. Szczególnie jest to przydatne w terenach sejsmicznych, gdzie następuje intensywne dynamiczne obciążenie betonu, które w przypadku betonu sztywnego prowadzi do zniszczenia.

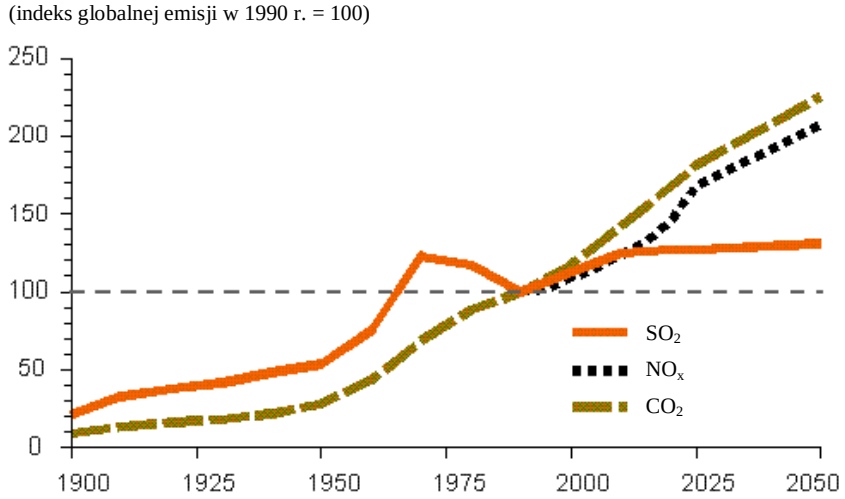
Rys. 56. Samozaleczanie się rysy w betonie poprzez krystalizację $CaCO_3$ [28].

Zasada, którą wykorzystuje prof. Li jest połączenie cech nowego betonu ECC z klasyczną reakcją karbonatyzacji. W odpowiednich warunkach na skutek reakcji wodorotlenku wapnia z atmosferycznym dwutlenkiem węgla w betonie może zachodzić proces „samozaleczania" rys, tzn. ich wypełniania $CaCO_3$ (rys. 56). W celu osiągnięcia jak najlepszych rezultatów do reakcja tej potrzebna jest wilgoć, może być również z otoczenia lub wprowadzona niezależnie. W efekcie nowy beton nie tylko, że nie musi być naprawiany ani usuwany, ale jeszcze oczyszcza środowisko z powodującego efekt cieplarniany CO_2.

4. Ekomodyfikacje

4.1. Beton fotokatalityczny

Po raz pierwszy w historii ludzkości, człowiek zmienia klimat Ziemi poprzez emisje do atmosfery gazów zwiększających efekt cieplarniany. Główną ich przyczyną jest dramatyczne zwiększenie zużycia paliw kopalnych (węgiel, ropa i gaz), jakie nastąpiło od czasu Rewolucji Przemysłowej. Dzięki intensywnym badaniom w zakresie klimatologii wiadomo już, że antropogeniczne emisje gazów cieplarnianych znacząco przyczyniły się do zmian klimatu obserwowanych w ciągu ostatnich 30-50 lat. Niestety nadal ich przyrost jest znaczący (rys. 57).



Rys. 57. Scenariusze emisji dwutlenku siarki, tlenków azotu i dwutlenku węgla w porównaniu do roku 1990 (Źródło: UNEP GRID Arendal).

Fotokataliza to zjawisko umożliwiające reakcje chemiczne lub przyspieszające ich przebieg pod wpływem światła. Produkty fotokatalityczne wykorzystują ten proces do utleniania zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych zawartych w powietrzu i osadzonych na powierzchniach elementów budowlanych. Szkodliwe substancje są przekształcone w nieszkodliwe azotany i węglany. Proces fotokatalizy zachodzi nie tylko przy bezpośrednim naświetleniu, lecz również przy świetle odbitym. W związku z tym, że

na powierzchniach budowli osadzają się zanieczyszczenia i rozwijają mikroorganizmy, to produkty fotokatalityczne rozkładają je powstrzymując osadzanie brudu i ułatwiają wymywanie go (rys. 58). Produkty fotokatalityczne efektywnie i w sposób ciągły eliminują trujące zanieczyszczenia gazowe z otaczającego nas powietrza, co polepsza jakość życia i zmniejsza zapadalność na choroby cywilizacyjne [33].

Rys. 58. Przebieg zjawiska fotokatalizy na terenach zurbanizowanych.

Technologia betonu fotokatalitycznego opiera się na zastosowaniu nanocząsteczek TiO_2, który wykazuje właściwości fotokatalityczne oraz hydrofilowe. Na powierzchni betonu zawierającego nanokrystaliczny dwutlenek tytanu tworzą się rodniki wodorotlenowe OH^- o silnych właściwościach utleniających, które utleniają i rozkładają różnego rodzaju zabrudzenia organiczne (tłuszcze, oleje, spaliny, bakterie, gazy zapachowe). Dzięki zastosowaniu tego typu betonu. obniżeniu ulega ilość tlenków azotu i siarki. Podczas naświetlania promieniami ultrafioletowymi (UV) szkodliwe tlenki azotu NO_x przechodzą w jony azotanowe NO_3^-. Jony azotanowe reagują z wodą deszczową i tworzą kwas azotowy, który jest neutralizowany na powierzchni betonu i spłukiwany przez opady deszczu (rys. 58). Podobne procesy zachodzą w przypadku tlenków siarki. Z przeprowadzonych badań wynika, że poziom szkodliwych tlenków siarki czy azotu może być zredukowany nawet do 80% [34].

Dwutlenek tytanu może być stosowany we wszystkich rodzajach betonu, a jego dodanie nie ma żadnego wpływu na jego pozostałe właściwości [35]. Beton samoczyszczący został zastosowany po raz pierwszy w roku 2003 do budowy Kościoła Dives in Misericordia Tor Tre Teste w Rzymie (rys. 59, 60) i biurowca Policji w Bordeaux (rys. 61, 62). Z ciekawszych realizacji, gdzie zastosowano elewacyjne elementy z użyciem betonu fotokatalitycznego, należy zwrócić uwagę na budynek Commodore w Ostendzie, który został zrealizowany w 2005 r. (rys. 63, 64).

Rys. 59, 60. Kościół Dives in Misericordia Tor Tre Teste w Rzymie.

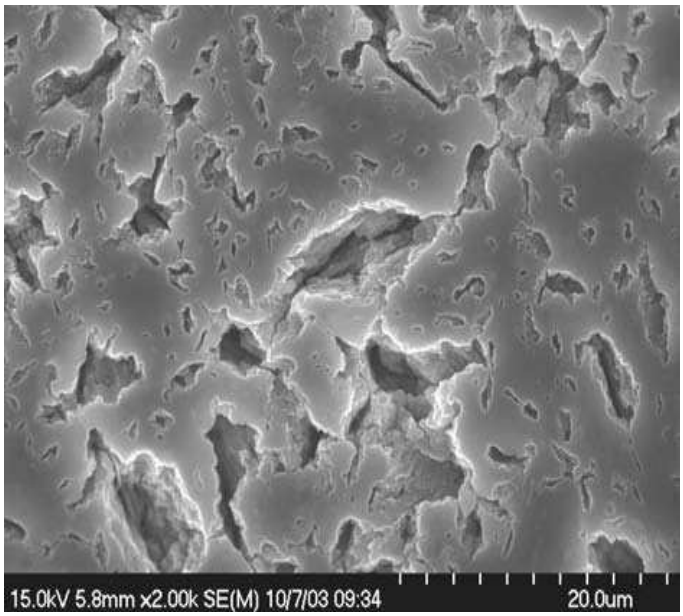
Rys. 61, 62. Biurowiec Policji w Bordeaux.

Rys. 63, 64. Budynek Commodore w Ostendzie.

4.2. Beton geopolimerowy

Produkcja każdej tony cementu wprowadza do atmosfery tonę CO_2. Globalna produkcja cementu portlandzkiego wprowadza do atmosfery ok. 1,6 miliarda ton CO_2, co daje ok. 7% rocznej globalnej ilości CO_2 emitowanej do atmosfery [36, 37; 38]. W roku 2010 światowa produkcja cementu portlandzkiego powinna przekroczyć 2 mld ton rocznie, co oznacza oddanie w 2010 roku do atmosfery 2 mld ton CO_2, czyli że przemysł cementowy odpowiedzialny będzie za ok. 10% antropogenicznej emisji CO_2. Według różnych szacunków, synteza geopolimerów pochłania 2-3 razy mniej energii, niż cementu portlandzkiego oraz powoduje wydzielenie 4-8 razy mniejszej ilości CO_2. W związku z tym proponenci zastosowania cementów geopolimerowych widzą w nich sposób na istotne zmniejszenie obciążenia środowiska. W związku z tym od wielu lat poszukuje się zastępczych i „zdrowszych" spoiw do produkcji betonu.

Twórcą geopolimerów jest Prof. Joseph Davidovits, który założył Instytut Geopolimerów w Saint-Quentin we Francji. Davidovits wprowadził termin „geopolimer" w 1978 r. na oznaczenie mineralnego polimeru powstającego na bazie geochemii [39]. Geopolimer to polimer glinokrzemianu powstały na drodze syntetycznej z syntezy krzemu (S_i) i aluminium (Al), pozyskiwanych geologicznie z minerałów. Skład chemiczny geopolimeru jest podobny do składu zeolitu, ale ujawnia jednak amorficzną mikrostrukturę [40]. Geoploimery składaja się z długich łańcuchów – kopolimerów glinokrzemu i glinu oraz stabilizujących je kationów metali, najczęściej sodu, potasu, litu lub wapnia, a także związanej wody. Oprócz dobrze zdefiniowanych łańcuchów polimerycznych, występują w nich z reguły różne przemieszane fazy: tlenek krzemu, nieprzereagowany substrat glinokrzemianowy oraz niekiedy wykrystalizowane glinokrzemiany typu zeolitu (rys. 65).



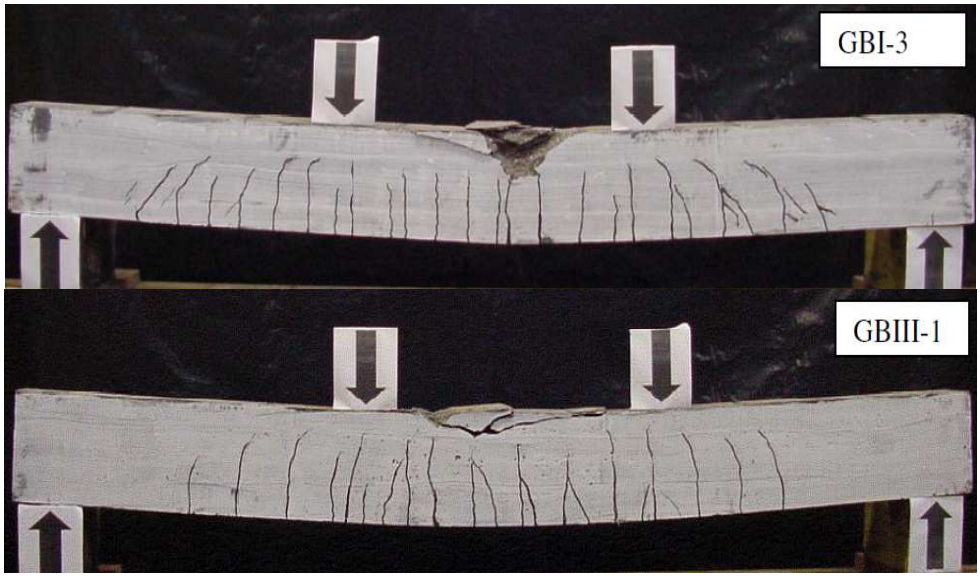
Rys. 65. Typowa struktura polerowanego geopolimeru (100% KOH) [41].

Większość metod syntezy geopolimerów sprowadza się do jednego procesu: rozdrobniony i wysuszony materiał pucolanowy (metakaolin lub popiół lotny) mieszany jest z wodnym roztworem odpowiedniego krzemianu (np. krzemianu sodu lub potasu) z dodatkiem silnej zasady - z reguły stężonego wodorotlenku sodu lub potasu. Powstająca pasta zachowuje się podobnie, jak cement - zastyga do twardej masy w przeciągu kilku godzin.

Alternatywną metodą przygotowania geopolimerów jest wypalanie materiału pucolanowego z wodorotlenkiem metalu do uzyskania jednorodnego proszku, który bardzo dobrze wiąże wodę - podobnie, jak cement portlandzki. Metoda ta jest jednakże problematyczna ze względu na dużo gorsze własności mechaniczne powstałego materiału [42]. Jeszcze inna, niedawno zaproponowana metoda jest podobna do tradycyjnej syntezy z zastosowaniem metakaolinu, roztworu krzemianu i wodorotlenku, dodatkowo używana jest jednak krzemionka koloidalna. Pozwala to na zredukowanie zużycia pucolany oraz zwiększenie zawartości krzemu w geopolimerze poza maksymalną wartość osiągalną w tradycyjnych metodach preparatywnych [43].

Betony geopolimerowe posiadają wysoką wytrzymałość na ściskanie, bardzo mały skurcz i małe pełzanie i dają wspaniałą odporność na korozję kwasową i siarczanową [44, 45]. Niektórzy badacze stwierdzili również, że beton ten jest także odporny na korozję węglanową i posiada bardzo wysoką odporność ogniową [46], a także wysoką odporność na promieniowanie UV [47].

Najszersze i najciekawsze badania żelbetowych elementów (belki, słupy) z geopolimeru przeprowadzono na Curtin University of Technology w Australii w roku 2006 [48]. Zarówno dla belek jak i dla słupów otrzymano wyniki zbliżone do elementów żelbetowych z betonu na cemencie portlandzkim (rys. 66, 67).



Rys. 66. Przykładowe zniszczenia belek żelbetowych z betonu geopolimerowego [48].

Rys. 67. Przykładowe zniszczenia słupów żelbetowych z betonu geopolimerowego [48].

W praktyce zastosowanie betonów geopolimerowych jest jeszcze bardzo ograniczone ze względu na ich wyższą cenę, na którą decydujący wpływ ma zastosowanie relatywnie dużych ilości wodorotlenku sodu oraz wodnych roztworów krzemianów.

5. Podsumowanie

Kiedyś uznany za zimny i nieprzyjazny dzisiaj dzięki nowym rozwiązaniom zmienia swoje oblicze. Materiał, który był kiedyś zwykłym budulcem staje się dziś elementem najnowocześniejszych projektów. Przyszłość betonu nie zna granic i jest on materiałem, który nieustannie odkrywamy na nowo. Dzięki najnowocześniejszym technologiom beton może być teraz stosowany już bez zbrojenia, w technologii samozagęszczania się, bez rys i pęknięć, o wysokich walorach estetycznych i najwyższej jakości. Beton może być lżejszy, bezpieczniejszy, bardziej elastyczny i wytrzymały (zarówno na ściskanie, zginanie, jak i rozciąganie). Stał się materiałem nie tylko przyjaznym dla środowiska, ale także to środowisko leczącym. Beton stale przystosowuje się do zachodzących przemian naszego świata i stanowi podwalinę naszej przyszłości. Może w niedługim czasie zbliży się do pomysłu Augustyna Otegui, czyli będzie stanowić element nie przegrody zewnętrznej, a „skóry" budynku, taką jaką dzisiaj jest w swoim zamyśle Nano – Vent Skin. Powłoka, która oprócz właściwości samonaprawczych posiada również możliwości wykorzystania energii słonecznej i wiatrowej, a także będzie wyłapywać i zużywać CO_2 i NO_x.

Piśmiennictwo

[1] Czarnecki L.: *Przyszłość betonu w warunkach zrównoważonego rozwoju*. „Materiały budowlane", nr 11/2006, str. 22 – 24.

[2] Burzyńska K.: *Beton w budownictwie zrównoważonym*. „Builder", No 11/2008, str. 43-46.

[3] Keller U.: *The building of The Panama Canal in Historic photographs*. ,,Dover Publication Inc." New York 1983.

[4] Jasiczak J., Wdowska A., Rudnicki T.: *Betony ultrawysokowartościowe*. ,,Polski Cement". Kraków 2008.

[5] Radomski W., *Światowe tendencje rozwojowe technologii betonu*. „Przegląd Budowlany" Nr 8−9/1995.

[6] Jasiczak J., Mikołajczak P.: *Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami*. ,Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 1997.

[7] Curtis J.P., Hills D.A., Cook M.D., Haskins P.J., Wood A.D., Fenwick A., House J.: *The effect of fibre cross-sectional shape upon shock dissipation by fibrous composites, with potential application to insensitive munitions*. Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering – COMPDYN 2007, Crete, Greece, 2007.

[8] Vitt, G.: *Crack control with combined reinforcement: From theory into practice*. "Concrete Engineering International" No 4/2005, str. 39-41.

[9] Bychkov, E.: *Concrete reinforcement: Modern reinforced concrete products in Russia,Concrete.* "Engineering International" No 1/2007, str. 20.

10] Walis S.: *Steel fibre developments in South Africa*. "Tunels & Tunelling" No 3/1995, str. 22-24.

[11] Fehling E., Schmidt M., Teichmann T., Bunje K., Bornemann R., Middendorf B.: *Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC)*. Kasel University Press, Kassel 2005.

[12] Czarnecki L.: *Domieszki do betonu – Możliwości i ograniczenia*. „Cement Polski: Budownictwo, Technologie, Architektura", Zeszyt Specjalny: Domieszki do betonu, 2003, str. 4-6.

[13] Aïtcin P-C.: *Trwały wysokowartościowy beton – sztuka i wiedza*. Konferencja Dni Betonu – Tradycja i nowoczesność, Szczyrk 2002, str. 7-36.

[14] Kaszyńska M.: BWW: *Możliwości, cechy, zastosowani*. XVII Ogólnopolska Konferencja „Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji", Ustroń 2002.

[15] Ma J., Orgass M.: *Comparative Investigations on Ultra-High Performance Concrete with and without Coarse Aggregates*. „LANCER" No. 9/2004, str. 245-256.

[16] Ma J.: *Experimental Investigations for the Production of Ultra-High Strength Concrete*. „LANCER", No. 6/2001, str. 215-228.

[17] Orgass M., Klug Y.: Steel Fibre Reinforced Ultra-High Strength Concretes. LANCER, No. 9/2004, str. 233-244.

[18] Czarnecki L.: *Nanotechnologia - wyzwaniem inżynierii materiałów budowlanych.* „Inżynieria i Budownictwo", nr 9/2006, str. 465 – 469.

[19] Czarnecki L.: *Czy nanotechnologia to przyszłość betonu*. „Materiały budowlane", nr 11/2007, str. 4 – 5.

[20] Sobolev K. and Ferrada-Gutiérrez M.: *How nanotechnology can change the Concrete World. Part 2.* "American Ceramic Society Bulletin" No. 11/2005, str. 16-19.

[21] Shih J-Y., Chang T-P., Hsiao T-C.: *Effect of nanosilica on characterization of Portland cement composite.* „Materials Science and Engineering" No 1-2/2006, str. 266–274.
[22] Yakovlev G., Keriene J., Gailius A., Girniene I.: *Cement Based Foam Concrete Reinforced by Carbon Nanotubes.* „Materials science" No 2/2006, str. 147 – 151.
[23] Li V.C: *On Engineered Cementitious Composities (ECC) – A review of the material and its applications*. „Journal of Advanced Concrete Technology" No 3/2003, str. 215-230.
[24] Chmielewski J.: *Przeźroczysty beton.* „Młody technik", nr 9/2004, str. 20.
[25] Mehl R.: *Transparent concrete causing a sensation.* „BFT", No 3/2005, str. 66 – 69.
[26] Kahn J.: *Nanotechnology.* „National Geographic", czerwiec 2006.
[27] Jin, W., Meyer, C. and Baxter, S.: *Glascrete – Concrete With Glass Aggregate*. „ACI Materials Journal", March-April 2000.
[28] Czarnecki L., Łukowski P.: *Betony i zaprawy samonaprawialne – krok ku inteligentnym materiałom naprawczym*. „Materiały budowlane", nr 2/2008, str. 2 – 4.
[29] Leyser R., Oleksik M.: „Betocrete C-17 (BV)". Cement Polski: Budownictwo, Technologie, Architektura, numer marzec-kwiecień 2007, s. 30.
[30] Dry, C. M., Sottos N.: *Passive Smart Self-Repair in Polymer Matrix Composite Material.* Proceedings Conference on Smart Structures and Materials, vol. 1588, SPIE 2/1/93.
[31] Dry, Carolyn M.: *Self-Repairing, Reinforced Matrix Materials*. U.S. Patent # U.S. 6,261,360,B1.
[32] Yang Y., Lepech D.M., Yang E., Li V.C.: *Autogenous healing of engineered cementitious composite under wet-dry cycles*. "Cement and Concrete Research" vol. 39/2009, str. 382-390.
[33] Błaszczyński T., Mueller J., Ilski M.: *Zjawisko fotokatalizy w budownictwie ogólnym i drogowym*. IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Nowoczesne technologie w budownictwie drogowym" Poznań, 3-4 września 2009.
[34] Danielewska K., Pszczółkowska A., Górecki T.: *Nanotechnologia w budownictwie.* „Materiały budowlane" nr 2/2007, str. 46-47.
[35] Kaszuba S.: *Nowoczesne kierunki w technologii betonu*, prezentacja, Betotech Sp. Z.o.o. Heidelberg Cement Group, wykłady otwarte, Akademia Górniczo Hutnicza 2007.
[36] Metha, P. K. *Reducing the environmental impact of concrete*. „ACI Concrete International" No10/2001, str. 61-66.
[37] Malhotra, V. M. *Making concrete 'greener' with fly ash*. „ACI Concrete International" vol. 21/1999, str. 61-66.
[38] Malhotra, V. M.: *Introduction: Sustainable development and concrete technology, ACI Board Task Group on Sustainable Development*. „ACI Concrete International" No7/2002, str. 22.
[39] Davidovits, J.: *Soft Mineralurgy and Geopolymers*. Proceeding of Geopolymer 88 International Conference, the Université de Technologie, Compiègne, France, 1988.
[40] Davidovits, J.: *Chemistry of geopolymer systems, terminology*. Proceedings of Geopolymer '99 International Conferences, France, 1999.
[41] Kriven W. M., Bell J. L., Gordon M., Mallicoat S.: *Microstructure and Microchemistry of Fully Reacted Geopolymers and Geopolymer Matrix Composites*. „Ceramic Transactions" vol. 153/2003 227-252.

[42] Koloušek D., Brus J., Urbanova M., Andertova J., Hulinsky V., Vorel J.: *Preparation, structure and hydrothermal stability of alternative (sodium silicate-free) geopolymers*. „Journal of Material Science" No 22/2007, str. 9267-9275.
[43] Singh P.S., Bastow T., Trigg M.: *Outstanding problems posed by nonpolymeric particulates in the synthesis of a well-structured geopolymeric material*. „Cement and Concrete Research", No 10/2004, str. 1943-1947.
[44] Hardjito, D. and Rangan, B. V.: *Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-based Geopolymer Concrete*. Research Report GC-1, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia, 2005.
[45] `Wallah, S.E. and Rangan, B.V.: *Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Long-Term Properties*. Research Report GC2, Faculty of Engineering. Curtin University of Technology, Perth, Australia, 2006.
[46] Cheng, T. W. and Chiu J.P.: *Fire-resistant Geopolymer Produced by Granulated Blast Furnace Slag*. „Minerals Engineering" No 3/2003, str. 205-210.
[47] Balaguru, P N, Kurtz, S, & Rudolph, J.: *Geopolymer for Repair and Rehabilitation of Reinforced Concrete Beams*. The State University of New Jersey Rutgers, Geopolymer Institute, research Report No 5, 1997.
[48] Sumajouw M. D.J., Rangan B. V.: *Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: reinforced beams and columns*. Research Report GC 3, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia, 2006.