

# Betony inne niż wszystkie



Dr inż. Wioletta Jackiewicz-Rek, Politechnika Warszawska

## 1. Wprowadzenie

Współczesny beton nie jest już trójskładnikową mieszaniną, składająca się z cementu, kruszywa i wody – ważną funkcję, oprócz wymienionych, pełnią w nim również dodatki mineralne i domieszki chemiczne. Odpowiedni dobór jakościowy i ilościowy tych składników pozwala na uzyskanie specjalnych cech mieszanki betonowej i betonu spełniającego wymagania trudnego środowiska pracy konstrukcji. Jednak beton obok funkcji konstrukcyjnej coraz częściej ma również zadanie kształtowania formy architektonicznej budowli. Jako materiał dający ogromne możliwości kształtowania formy i powierzchni, może być również nośnikiem przekazu, który zaskoczy i przykuje uwagę odbiorcy, tak jak np. fotobeton. Poprzez odpowiednie formowanie powierzchni betonowej, wynikającej z jej fakturowej różnorodności i wykorzystanie gry światłocienia, obserwator otrzymuje naturalną iluminację dającą wrażenie obrazu w czarnobiałych kolorach. Gdy dołączymy do tego zastosowanie w składzie betonu cementu zawierającego dodatek nanometrycznego dwutlenku tytanu  $\text{TiO}_2$ , to otrzymamy beton fotokatalityczny zdolny do poprawy jakości powietrza poprzez redukcję stężenia szkodliwych tlenków azotu w powietrzu. Pierwotnym zastosowaniem technologii betonu fotokatalitycznego było wykorzystanie właściwości samooczyszczania się powierzchni betonowych w wyniku procesu fotokatalizy, dopiero później zaobserwowano, iż w wyniku reakcji usuwane są również związki  $\text{NO}_x$  – i tak beton fotokatalityczny został okrzyknięty „pożeraczem smogu”. Wszystkie wymienione rodzaje betonu nie należą do standardowych rozwiązań i betonów zwykłych, a można je sklasyfikować jako betony specjalne, dotychczas nazywane betonami nowej generacji. Celem artykułu jest przybliżenie warunków wdrażania nowych technologii betonu architektonicznego, w tym fotobetonu, betonu fotokatalitycznego, transparentnego oraz betonu z kruszywem luminescencyjnym.

## 2. Beton architektoniczny

Beton architektoniczny, jak żaden inny, wymaga odpowiedniego doboru jakościowego i ilościowego składników, ale również wykonawczej precyzji i staranności w celu odwzorowania założonego projektu i wizji architekta. Wykorzystanie odpowiednich materiałów i zachowanie technologicznych zasad projektowania i wykonywania pozwala wykorzystać efekty synergii i niejednokrotnie stworzyć dzieła architektoniczne niemożliwe do uzyskania z żadnego innego

materiału. Beton architektoniczny (nazywany też licowym, fasadowym, elewacyjnym, czy strukturalnym) jest to taki beton w rozumieniu PN-EN 206 [1], któremu dodatkowo zdefiniowano wymagania odnośnie jakości powierzchni, jaka będzie ekspozowana. Wymagane cechy powierzchni mogą być sklasyfikowane w zależności od potrzeb i zastosowania betonu architektonicznego, w zakresie zadanego rysunku, barwy, faktury, tekstury i kształtu. Według definicji American Concrete Institute [2, 3] beton architektoniczny (*architectural concrete*) to taki beton, który będzie trwale narażony na widok, a zatem wymaga szczególnej troski w doborze składników, produkcji, układania i wykańczania powierzchni w celu uzyskania pożądanego wyglądu architektonicznego. Z definicji wynika, że beton architektoniczny oprócz funkcji konstrukcyjnej, pełni w obiekcie funkcję wizualną, estetyczną. Niesie to za sobą szczególne wymagania odnośnie realizacji – począwszy od szczegółowej specyfikacji wymaganych cech betonu, projektowania właściwości mieszanki betonowej, ogólnie pojętej technologii produkcji i wbudowania, pielęgnacji i kontroli zgodności. W artykule przedstawiono wybrane, najciekawsze rodzaje betonu architektonicznego, którym obok wartości dekoracyjnej zadano dodatkowe funkcje.

## 3. Fotobeton

Technologia polega na przeniesieniu fotografii lub grafiki na powierzchnię betonową bez konieczności powierzchniowego nanoszenia farb lub innych materiałów barwiących. Poprzez odpowiednie formowanie powierzchni betonowej i przy wykorzystaniu gry światłocienia na powierzchni można obserwować obraz w czarnobiałych kolorach (lub innych odcieniach przy zastosowaniu pigmentów do betonu). Technika ta pozwala na urozmaiceniu surowej powierzchni betonu, może być również nośnikiem przekazu, który zaskoczy, przykuje uwagę i zostanie zapamiętany na dłużej niż „standardowa” chwila [4].

### 3.1. Pierwsze realizacje z fotobetonu

Fotografia na betonie ma swój początek w prototypowym projekcie biblioteki miejskiej w Lons-Les-Saunier we Francji, w 1986 roku. Wykonano wtedy prefabrykowane płyty elewacyjne z ozdobnymi grafikami. Kolejna realizacja z wykorzystaniem fotobetonu powstała w tym samym regionie, Jura, we Francji. W Centrum Natury i Dzikich Zwierząt rysunki lokalnej zwierzyny przedstawiono nie na prefabrykowanych panelach, lecz na ścianach wykonanych na miejscu

budowy. Jednak beton wykonywany w tej technologii, na miejscu budowy, nadal jest rzadkością – najczęściej stosuje się elementy przygotowane wcześniej w zakładzie prefabrykacji, gdzie lepsza jest kontrola jakości i bardziej powtarzalne warunki niż przy wykonywaniu elewacyjnych robót pionowych na placu budowy.

Najbardziej znaną i spektakularną jest realizacja budynku biblioteki Wyższej Szkoły Technicznej w Eberswalde koło Berlina, gdzie architekci Herzog i de Meuron ozdobili nacie, żelbetowe ściany zewnętrzne, wielokrotnie powielonymi fotografiami Thomasa Ruffa (rys. 1 i 2) umieszczonymi na poziomych pasach szkła i betonu, metodą sitodruku (zwaną „Serilith-Gravur”). W efekcie budynek pokrywa około 1000 prefabrykatów z „nadrukiem”, poukładanych w poziome pasy odpowiadające poszczególnym obrazom. O ile sitodruk na szkło był już wielokrotnie stosowany, o tyle użycie go na powierzchni betonowej stanowiło pomysł architektów, którzy byli twórczymi uczestnikami badań i eksperymentów technicznych nowatorskiej technologii [5].

Innym znanym przykładem wykorzystania techniki fotobetonu jest rozbudowa budynku biblioteki Uniwersytetu Paul Sabatier w Tuluzie (rys. 3), gdzie architekt Milani wykorzystał zdjęcia przedstawiające rozwój lokalnego przemysłu i pokazał główne kierunki naukowe na uniwersytecie. Aby uzyskać zakładany efekt, architekt posłużył się technologią „Photo-Gravur” [6].

### 3.2. Podstawy technologiczne fotobetonu

Fotobeton w technologii zwanej „Serilith-Gravur” (również „Fotolith”) – opracowany przez architektów współpracujących z firmą Pieri – powstaje w wyniku przeniesienia techniki sitodruku dowolnego slajdu lub zdjęcia na folię, którą wykładane jest deskowanie. Chemiczna substancja natryskiwana na folię powoduje, że wierzchnia warstwa zaprawy w miejscach odcisniętego wzoru pozostaje chemicznie niezwiązana i po zdjęciu deskowania można ją wypłukać. Według twórców metoda fotobetonu to – ni mniej, ni więcej, tylko proces wywodzący się z zasady sitodruku, gdzie farba zastąpiona została przez domieszkę opóźniającą wiązanie betonu. Fotografia z postaci analogowej przekształcana jest w numeryczną, a następnie przetwarzana punkt po punkcie w film, służący do produkcji ekranu do sitodruku w wielkości żądanego końcowego „betonowego obrazu”. Następnie matryca powlekana jest powierzchniowym opóźniaczem – opóźniającą farbą (lakierem) płynącą wybiórczo poprzez szkielet otworków na sztywny polistyren o grubości kilku milimetrów, który umieszczany jest w formie. W kontakcie z betonem kropelki opóźniacza lokalnie zapobiegają wiązaniu cementu, który w niezaimpregnowanych miejscach twardnieje normalnie. Po rozformowaniu elementu niezwiązany zaczyn zostaje usunięty mechanicznie za pomocą strumienia wody, dzięki czemu na powierzchni betonu powstaje dwubarwny obraz – jasny kolor tworzy niewypłukana mieszanka, na której powierzchni zachodzi normalny



Rys. 1. Fotobeton na elewacji biblioteki Wyższej Szkoły Technicznej w Eberswalde; źródło: fotografia własna

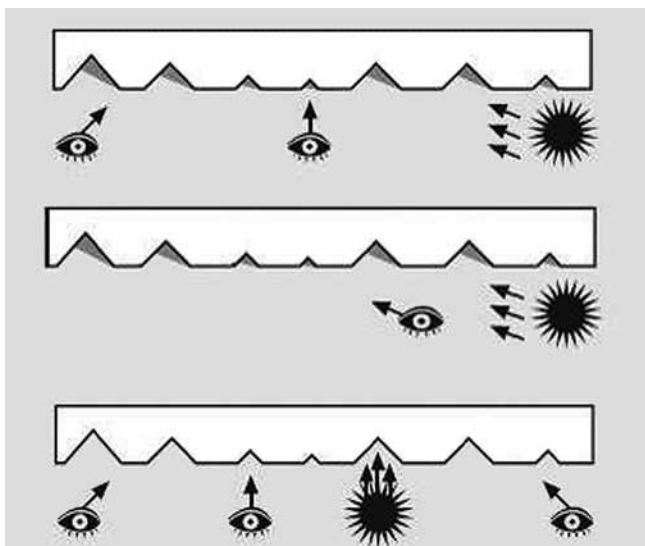


Rys. 2. Fragment elewacji biblioteki w powiększeniu; źródło: fotografia własna



Rys. 3. Fragment elewacji biblioteki Uniwersytetu Paul Sabatier w Tuluzie [7]

proces wiązania, a ciemne miejsca to odkryte w wyniku płukania kruszywo. Czynniki decydującymi o dokładnym odwzorowaniu zdjęcia w tej technologii są między innymi: domieszka opóźniająca wiązanie o odpowiedniej płynności, lepkości i przyczepności; zapobieganie wszelkim drganiom podczas formowania – użyteczna jest tutaj mieszanka



Rys. 4. Kształtowanie się światłocienia [7]



Rys. 5. Stacja metra z panelami z fotobetonu, Norymberga, Niemcy [7]

samozagęszczalna; dobór składników betonu ze względu na pożądaną efekt kolorystyczny (kolor kruszywa, dodatków, cementu). Ważne jest także, aby powierzchnia betonu odznaczała się jak najmniejszą porowatością [5]. Technologia fotografowania („Photo-Gravur”) została opatentowana przez niemiecką firmę Reckli [7]. Polega na komputerowym przetworzeniu dowolnego zdjęcia w trójwymiarowy obraz i przeniesieniu go, za pomocą procesu frezowania, na model formy, wykorzystując w tym celu technologię CNC. Model służy jako podstawa do wykonania matrycy z elastomerów poliuretanowych, którą układa się luźno w formie lub przykleja do deskowania, a następnie dwukrotnie pokrywa środkiem antyadhezyjnym.

W odróżnieniu od metody „fotolith” nie ma konieczności używania mieszanek samozagęszczalnych. Po ułożeniu mieszanki można ją zagęszczać na stole wibracyjnym, co ułatwia odpowietrzenie i pozbycie się porów z powierzchni. Należy jednocześnie pamiętać o odpowiednim dobraniu frakcji kruszywa, tak aby mieszanka betonowa dokładnie wypełniła wszelkie szczeliny i zagłębienia powstałe w wyniku frezowania (np. mieszanki o podwyższonym punkcie piaskowym i maksymalnym wymiarze kruszywa  $D_{max}$  8 mm lub 4 mm). Obraz na powierzchni betonu powstaje na skutek interakcji światła i cienia. Efekt zależy od intensywności i kąta padania światła, a jest bardziej żywy i czytelny dzięki długości cienia rzucanego przez żłobienia. Najlepiej fotografia czytelna jest, kiedy światło pada pod kątem  $45^\circ$ , a obserwator ogląda ją z kierunku przeciwnego lub na wprost obrazu (rys. 4). Kiedy światło pada prostopadłe, obraz jest niewidoczny praktycznie z żadnego kierunku. Wewnątrz pomieszczeń efekt ten można uzyskać, wykorzystując sztuczne oświetlenie. Przy projektowaniu z wykorzystaniem fotobetonu należy zatem pamiętać o odpowiedniej ekspozycji wykonanych elementów do kierunków świata tak, aby przez jak najdłuższą część dnia i w godzinach szczytów komunikacyjnych obraz był widoczny dla obserwatorów.

### 3.3. Przykłady wykorzystania fotobetonu

Można pokusić się o opinię, że nieograniczone są możliwości informacyjne fotobetonu wykonywanego zarówno w monolicie, jak i w prefabrykacji. Wybierając tę technologię jako lico ścian wewnętrznych, zewnętrznych obiektów, elementów mostu, ekranów drogowych, czy też ścian oporowych – można poprzez estetykę przenieść zamierzoną treść i obraz. Technologia fotobetonu daje możliwości nie tylko urozniczenia surowej powierzchni betonu, ale również tworzenia artystycznych obrazów i symbolicznej ekspresji. Wprowadza prawie nieograniczone możliwości prezentacji motywów, czy portretów na powierzchni betonu, stąd wydaje się szczególnie przydatna przy wykończaniu obiektów



Rys. 6. Prefabrykowana płyta z fotobetonu na placu Freidricha Eberta, Heidelberg [7]

użyteczności publicznej, takich jak np. stacje metra (przykładem może być tutaj realizacja z Niemiec, rysunek 5) czy też akcentowaniu historii i przeznaczenia miejsc (rys. 6 i 7). Betonowe płyty z przeniesioną fotografią mogą być wartościowym elementem architektury krajobrazowej i pomnikarskiej jak również nośnikiem informacji, czy krzewienia kultury i historii (rys. 8). Wykorzystane na ekranach dźwiękochłonnych, czy też panelach osłonowych do konstrukcji oporowych z gruntu zbrojonego mogą urozmaicać formę architektoniczną rozwiązań – poprzez wprowadzenie na ich elementy, w prezentowanym na rysunku 9 przypadku – panoramy Warszawy z wizerunkiem Syrenki Warszawskiej i Mostu Świętokrzyskiego [4]. Betonowe panele osłonowe stanowiły projekt elementów wypełniających zestawu do konstrukcji oporowych z gruntu zbrojonego.

#### 4. Beton fotokatalityczny

Innowacyjnym rozwiązaniem mogącym przyczynić się do redukcji stężenia tlenków azotu w zanieczyszczeniach komunikacyjnych w dużych miastach jest stosowanie betonu fotokatalitycznego w rozwiązaniach nawierzchni lub elewacjach budynków. Jednocześnie jest to rozwiązanie pasywne, działające niezależnie od źródeł zasilania.

##### 4.1. Technologia betonu fotokatalitycznego

Beton fotokatalityczny zawdzięcza swoje specjalne właściwości wbudowanym w jego strukturę cząsteczkom fotokatalizatora, czyli związku, który w wyniku absorpcji promieniowania słonecznego inicjuje reakcję chemiczną lub wpływa na szybkość już zachodzącej reakcji [8]. Najczęściej wykorzystywanym fotokatalizatorem w technologii betonu jest dwutlenek tytanu (IV) w polimorficznej odmianie anatazu. Powszechność stosowania tej odmiany krystalicznej jest spowodowana jej wysoką wydajnością fotokatalityczną, chemiczną stabilnością, brakiem negatywnego wpływu na zdrowie ludzkie oraz relatywnie tanim procesem produkcyjnym [9]. Rzadziej wykorzystywane są inne formy krystaliczne, takie jak: rutyl oraz brukit. W niektórych przypadkach wykorzystuje się mieszanki dwóch lub trzech form krystalicznych jednocześnie w różnych proporcjach (np. anataz-rutyl, 70:30 [9]). W celu zwiększenia efektywności fotokatalizy – fotokatalizator dodawany jest zazwyczaj w postaci cząstek rozdrobnionych do rozmiarów nanometrów. Fotokatalizator może być wprowadzany do struktury betonu jako dodatek do cementu, jako składnik substancji powłotkotwórczych nanoszonych na powierzchnię betonu lub jako składnik środka wykorzystywanego do impregnacji kruszywa. Biorąc pod uwagę to, że zjawisko fotokatalizy zachodzi wyłącznie na powierzchni betonu, betony fotokatalityczne wykonywane są najczęściej dwuwarstwowo, przy założeniu, że fotokatalizator występuje wyłącznie w zewnętrznej warstwie betonu.

Początkowo zastosowanie tej technologii związane było



Rys. 7. Prefabrykowane, barwione w masie płyty betonowe na murze hodowli kaktusów, BLEISWIJK, Holandia [7]



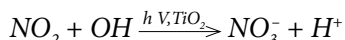
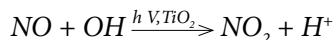
Rys. 8. Betonowa płyta prefabrykowana na bazie matrycy, Hossa Garnizon, Trójmiasto [7]



Rys. 9. Betonowy element wykonany w technologii fotobetonu z panoramą Warszawy wraz z odwzorowanym zdjęciem; źródło: fotografia własna

z uzyskaniem samooczyszczania się powierzchni betonowych w wyniku procesu fotokatalizy, dopiero później zaobserwowano, iż w wyniku reakcji usuwane są również związki  $\text{NO}_x$ . Proces fotokatalizy to reakcja chemiczna polegająca na absorpcji światła przez fotokatalizator, który inicjuje reakcję w obecności światła i nie jest przy tym zużywany

[10]. W opisywanym przykładzie fotokatalizatorem jest nanometryczny  $\text{TiO}_2$  – półprzewodnik, który dzięki absorpcji promieniowania UV inicjuje reakcję chemiczną. W wyniku reakcji na powierzchni betonu powstaje nadtlenek  $\text{O}_2^-$ , który następnie z zawartej w powietrzu wody powoduje wytworzenie rodników hydroksylowych  $\cdot\text{OH}$ , które reagują z tlenkiem oraz dwutlenkiem azotu zawartymi w powietrzu, co można w uproszczony sposób opisać równaniami:

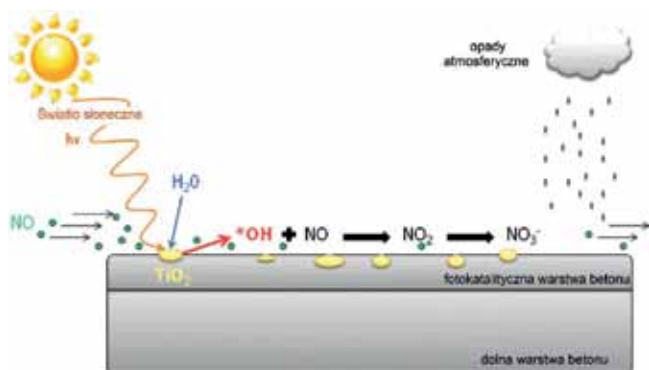


Na powierzchni betonu powstaje  $\text{NO}_3^-$ , który reaguje ze składnikami zaczynu cementowego tworząc sole (azotany), które są neutralizowane i splukiwane przez opady atmosferyczne [11].

Proces fotokatalizy (rys. 10) zależy od jakości powierzchni betonowej (ilości zastosowanego cementu z  $\text{TiO}_2$  w elemencie betonowym, sposobu wykończenia powierzchni), natężenia promieniowania UV, stężenia  $\text{NO}_x$  w powietrzu, wilgotności względnej i temperatury powietrza. Wraz ze wzrostem temperatury proces jest efektywniejszy, natomiast wyższa wilgotność względna powietrza powoduje obniżenie konwersji. Optymalne warunki procesu fotokatalizy to gorące, letnie dni z wysoką temperaturą powyżej  $25^\circ\text{C}$ , niewielką prędkością wiatru i niską wilgotnością powietrza. Najbardziej istotnymi czynnikami materiałowymi są: rodzaj wykorzystanego fotokatalizatora, jego ilość w objętości betonu, sposób aplikacji (powłokowo, impregnacja kruszywa lub razem ze spoiwem) oraz rodzaj obróbki powierzchniowej betonu.

#### 4.2. Przykłady realizacji

Pierwsze realizacje z betonu fotokatalitycznego miały miejsce na początku XXI wieku. Jako pilotażową nawierzchnię wykonano 10 000  $\text{m}^2$  pasów parkingowych z dwuwarstwowej kostki betonowej, wzdłuż drogi w Antwerpii (2004–2005 r.). Po 5 latach zbadano trwałość właściwości fotokatalitycznych wbudowanej kostki, wyjmując kolejne elementy

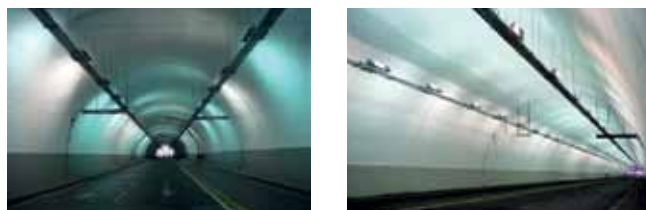


**Rys. 10.** Mechanizm oczyszczania powietrza ze szkodliwych związków azotu przez beton fotokatalityczny [12]

z użytkowanej nawierzchni [13]. Badania in situ potwierdziły redukcję stężenia tlenków azotu przy budowie drogi „Den Hoek 3” w 2011 r., w okolicach Antwerpii. Zastosowano tam technologię nawierzchni dwuwarstwowej z wykorzystaniem cementu z dodatkiem dwutlenku tytanu w technologii odkrytego kruszywa w górnej warstwie, zaś dolna warstwa konstrukcyjna została wykonana z betonu z kruszywem betonowym z recyklingu [13]. Z kolei badania przy ulicy w Bergamo wykonanej (2006–2007 r.) z dwuwarstwowej kostki brukowej z betonu fotokatalitycznego wykazały, iż wartości redukcji tlenków azotu mogą sięgać nawet 60% w porównaniu z pozostawionym odcinkiem drogi asfaltowej. Również w Polsce zostały wykonane pierwsze chodniki i drogi rowerowe z fotokatalitycznej kostki brukowej, między innymi w Zielonej Górze, Nowej Soli, Choruli, Boguchwale, ale nie były tam prowadzone pomiary jakości powietrza w celu potwierdzenia możliwości redukcji zanieczyszczeń w ich otoczeniu. Kompleksowy program badań towarzyszący wdrożeniu antysmogowego chodnika przy Rondzie Daszyńskiego w Warszawie w 2018 r. potwierdził między innymi mniejsze zanieczyszczenie tlenkami azotu, o nawet 30% w pobliżu nowej nawierzchni z betonu fotokatalitycznego. Obiecujące wyniki pomiarów przyczyniły się do projektu kolejnych realizacji w Warszawie.

W 2011 r. powłoka z fotokatalitycznych materiałów cementowych została zastosowana podczas renowacji na ścianach bocznych i na suficie tunelu drogowego Leopolda II w Brukseli. Do aktywacji reakcji fotokatalizy zostało wykorzystane specjalne oświetlenie emitujące światło UV. Podobne rozwiązanie zastosowano do aktywacji mechanizmu fotokatalizy w tunelu drogowym Umberto I w Rzymie, o długości 350 m (2007 r.), gdzie do renowacji zastosowano farby cementowe fotokatalityczne nanoszone metodą natrysku – szarą do wysokości 1,80 m i białą powyżej (rys. 11). Wyniki kampanii pomiarowej pomiarów stężenia tlenków azotu wykazały redukcję  $\text{NO}$  o 25% i  $\text{NO}_2$  o 19% [14].

Zastosowanie materiałów fotokatalitycznych w tunelach jest szczególnie przydatne w kontekście dodatkowego atutu tej technologii, tj. możliwości redukcji zanieczyszczeń powietrza, również tych osiadających na powierzchniach. Samoczyszczenie powierzchni betonowych wynika z właściwości fotokatalitycznych oraz superhydrofilowych nanokrystalicznego ditlenku tytanu. Jednym z najbardziej znanych przykładów wykorzystania betonu samoczyszczącego jest kościół Dives in Misericordia w Rzymie (2003 r., rys. 12). Bryła



**Rys. 11.** Tunel drogowy Umberto I w Rzymie z fotokatalityczną powłoką [15]

kościół przypominająca statek z trzema żaglami o wysokości 26 m została wykonana przy użyciu białego betonu z cementem z  $\text{TiO}_2$ . Prowadzone pomiary fotometryczne na tym obiekcie potwierdzają, że elewacja kościoła pozostaje nadal biała, mimo upływu lat. Podobnie jak pawilon włoski zaprojektowany w pracowni NEMESI na EXPO 2015 w Mediolanie (rys. 13) z białą fasadą z betonu fotokatalitycznego o powierzchni 9000 m<sup>2</sup>, wykonaną z 900 płyt betonowych [8].

## 5. Beton transparentny

Beton transparentny jest kompozytem mieszanki betonowej i światłowodów, dzięki którym uzyskuje właściwości światłoprzepuszczalności przy zachowaniu właściwości betonu. Istnieje kilka sposobów produkcji betonu przezroczystego, jednak przeważnie beton stanowi około 95% objętości matrycy w której „wtopione” jest około 5% światłowodów. Stosowane są różne światłowody, czyli elastyczne, przezroczyste włókna wykonane z wysokiej jakości wytłaczanego szkła lub tworzywa sztucznego o różnej średnicy.

### 5.1. Technologia i zastosowania

Beton transparentny został po raz pierwszy wymieniony w kanadyjskim patencie z 1935 roku, ale dopiero w 1999 roku Bill Price z Uniwersytetu w Houston stworzył pierwszą próbkę przezroczystego betonu. W 2001 roku węgierski architekt Aron Lasonczy pokazał beton architektoniczny o dużej wytrzymałości i przezroczystości. Dzięki scaleniu betonu z odpowiednio ukierunkowanymi światłowodami możliwe było stworzenie półprzezroczystej ściany, przez którą można dostrzec kontury osób i obiektów znajdujących się z drugiej strony przy odpowiednim oświetleniu (rys. 14). Kompozyt nazwano LiTraCon od angielskich słów Light Transmitting Concrete. Beton ten składa się z 96% betonu i 4% włókien optycznych, ma gęstość objętościową od 2100 do 2400 kg/m<sup>3</sup>, wytrzymałość na ściskanie 50 MPa oraz na zginanie – 7 MPa. Firma Losonczy produkuje z betonu transparentnego bloczki oraz elementy wyposażenie domu, np. lampy oraz biżuterię.

Firma Italcementi Group opracowała materiał specjalnie na potrzeby budowy budynku z przezroczystymi ścianami na World Expo w Shanghaju w 2010 r. (rys. 16). Efekt ten uzyskano dzięki zastosowaniu przezroczystych płyt polimerowych z PMMA, które mają zdolność przepuszczania światła i są znacznie tańsze od światłowodów. W tej technologii produkowane są przezroczyste panele o wymiarach 100x50 cm i grubości 5 cm i masie 50 kg, w której znajduje się 50 otworów, co daje całkowitą przezroczystość około 20% (rys. 15). Panele nazwane i.light potrzebują stalowej konstrukcji do ich instalacji, jednak jak podkreślają producenci, umożliwiają łatwiejszy dostęp światła do wnętrza, co zmniejsza zużycie energii w tym samym czasie. We wspomnianym pawilonie (rys. 16) zastosowano również półprzezroczyste panele, których przezroczystość wynosiła 10%.



Rys. 12. Kościół milenijny Dives in Misericordia w Rzymie wykonany z białego betonu fotokatalitycznego [16]

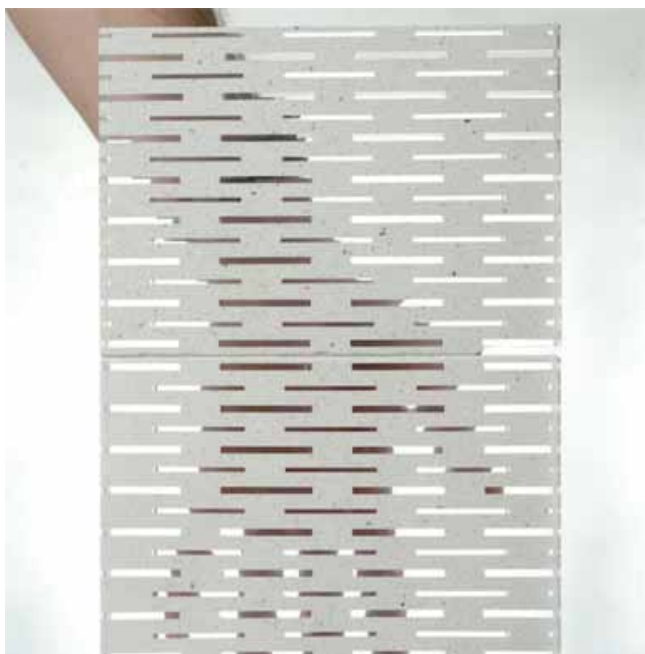


Rys. 13. Pawilon włoski na EXPO 2015 w Mediolanie [17]



Rys. 14. LiTraCon CLASSIK® [18]

LUCCON jest drugim najpopularniejszym producentem przezroczystego betonu, który powstaje przez układanie mat ze światłowodami na przemian z mieszanką betonową. Powstałe w ten sposób panele tworzą najczęściej ściany



**Rys. 15.** Panel i.light [19]



**Rys. 18.** Modułowe bloki LiCrete [22]



**Rys. 16.** Panele i.light wbudowane w elewację włoskiego pawilonu na World Expo 2010 w Szanghaju [20]



**Rys. 19.** Beton transparentny Kurpińskich [23]



**Rys. 17.** Umywalka LUCCON [21]

i elementy wykończenia pomieszczeń, takie jak umywalki, prysznicz, meble (rys. 17).

LiCrete (rys. 18) jest czeskim rozwiązaniem z dziedziny betonu transparentnego, który składa się z 85% betonu i 15% materiału przepuszczającego światło, składanego z elementów w formie przed zalaniem mieszkanką betonową. Bloki z LiCrete można wykorzystać do budowy ścian działowych lub elementów wykończenia wnętrz.

Polski patent z betonu transparentnego z 2014 r. obejmuje beton z maksymalnie 2,5% włókien optycznych o średnicy od 0,7 do 1,2 mm układanych w elemencie betonowym w siatkę o kształcie rombu (rys. 19).

W ramach realizacji pracy dyplomowej student Politechniki Warszawskiej opracował technologię wykonywania elementów z betonu transparentnego z wykorzystaniem prętów borokrzemowych oraz prętów PMMA [24]. Wykazał w pracy, że na właściwości wytrzymałościowe betonu transparentnego ma duży wpływ zastosowany materiał nośników światła oraz jego ułożenie w elemencie. Materiał, z którego są wykonane nośniki światła, ma duże znaczenie przy ostatecznej ocenie zdolności przepuszczania przez niego światła. W betonie transparentnym z PMMA punkty na betonie były jaśniejsze oraz widoczne pod dużym kątem przy świetle dziennym niż w betonie transparentnym z prętami borokrzemowymi (rys. 20).



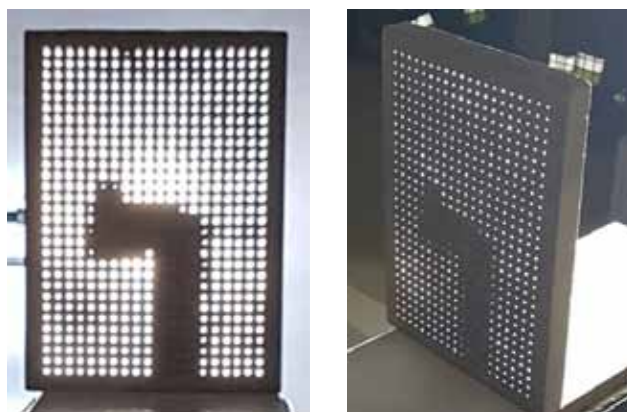
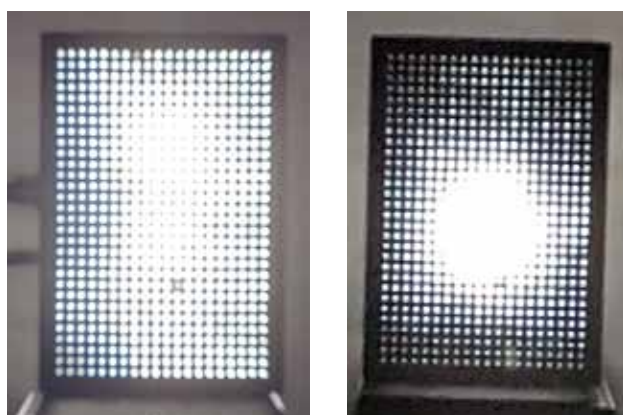
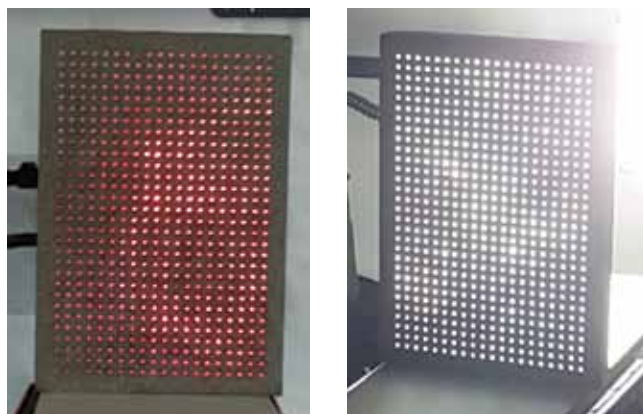
**Rys. 20.** Płyty z betonu transparentnego: po prawej pręty borokrzemowe, po lewej pręty PMMA [24]

Przy dobrym świetle można nie tylko dostrzec grę cieni na powierzchni betonu transparentnego, ale i kolory (rys. 21).

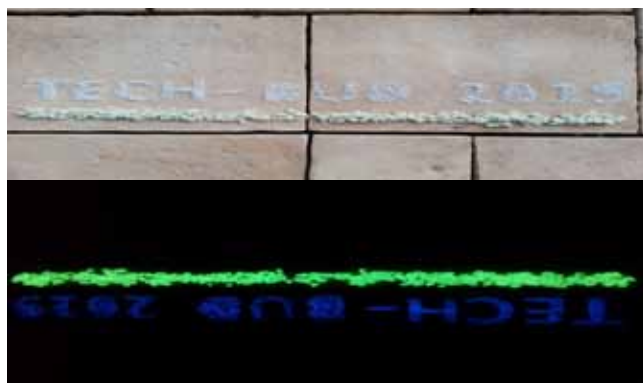
## 6. Beton luminescencyjny

Ciekawym efektem, który możemy uzyskać w płytach elewacyjnych z betonu architektonicznego, jest zjawisko świecenia. Efekt ten uzyskuje się dzięki użyciu kruszywa luminescencyjnego (rys. 22). Osiągnięcie tego efektu w przypadku kruszyw nadających się do wykorzystania w mieszankach betonowych jest niezmiernie trudne.

Ze względu na trudności technologiczne podczas produkcji tego typu kruszywa, na rynku jest niewiele firm, które rozwijają tę technologię, praktycznie żadnej nie ma w Europie. Na rynku można znaleźć kruszywo grube frakcji 2/18 mm oraz piasek 0,2/2 mm w kolorystyce niebieskiej, turkusowej, seledynowej, szmaragdowej. W kartach produktów zapewniana jest ciągłość „świecenia” kruszywa do około 8 godzin w przypadku kruszyw klasycznych, natomiast w przypadku kruszyw ultra nawet do 15 godzin. Czas pobierania energii w porównaniu do czasu jej oddawania jest niezmiernie krótki. Producenci określają przykładowo na 10 minut w przypadku naświetlania światłem słonecznym, natomiast 20 minut w przypadku światła sztucznego. Wadą tego kruszywa jest jego cena, która znacznie przewyższa cenę tradycyjnych, nawet najwyższej klasy kruszyw, dlatego elementy z betonu architektonicznego wykonuje się nieco inaczej niż płyty z tradycyjnej mieszanki betonowej ze standardowym kruszywem.



**Rys. 21.** Zdjęcia betonu transparentnego przy zbyt mocnym świetle, bardzo dobrze przepuszcza światło białe jak i kolorowe [24]



**Rys. 22.** Kruszywo luminescencyjne frakcji 1/2 i 2/4 w dzień i w nocy (po naświetleniu); źródło: fotografia własna

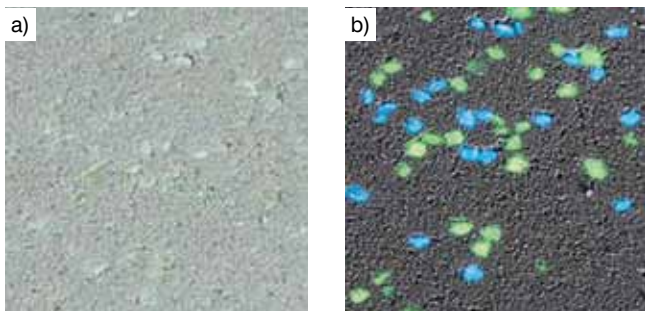




**Rys. 23.** „Van Gogh Bicycle Path” w Holandii z kruszywem luminescencyjnym ułożonym we wzór inspirowany twórczością malarza [25]



**Rys. 24.** Plac przed halą sportową w Harnes oświetlony nawierzchnią betonową z kruszywem luminescencyjnym [26]



**Rys. 25.** Widok powierzchni kostki brukowej: a) w dzień, b) w nocy [27]

### 6.1. Wykonywanie elementów betonowych z kruszywem luminescencyjnym

Wykonywanie elementów płytowych z betonu luminescencyjnego odbywa się w dwóch warstwach. Pierwsza, tworząca lico płyty elewacyjnej, wykonana jest z mieszanki betonowej z kruszywem luminescencyjnym. Druga warstwa jest tradycyjną mieszanką betonową, najczęściej samozagęszczalną. Drugą warstwę układa się po osiągnięciu przez warstwę pierwszą „plastycznej” konsystencji, co uniemożliwi wymieszanie się obydwu warstw. W celu odsłonięcia powierzchni świecącego kruszywa warstwę licową płyty trzeba poddać piaskowaniu, potraktować ją żrącą substancją

chemiczną bądź też przed zalaniem formy betonem posmarować ją opóźniaczem do betonu, a po rozformowaniu zmyć wierzchnią warstwę zaczynu.

Inną technologią wykonania świecących płyt elewacyjnych jest zamocowanie kruszyw luminescencyjnych do formy, a następnie wlanie do formy mieszanki betonowej. W takim przypadku wlewana mieszanka jest już tradycyjną mieszanką betonową z tradycyjnym kruszywem, a efekt świecenia zapewnia kruszywo zamocowane do formy. W przypadku tej technologii mieszanka wlewana do formy z przyklejonymi świecącymi kamieniami powinna wykazywać właściwości mieszanki samozagęszczalnej, która bez większych problemów wpłynie w przestrzenie pomiędzy przymocowanym kruszywem i całkowicie obleje świecące kamienie pozostawiając odsłoniętą tylko warstwę licową.

Jeszcze inną metodą osiągnięcia świecącej powierzchni w betonie jest wykorzystanie podsypki piaskowej. W tym przypadku dno formy wysypuje się piaskiem. Jego grubość należy uzależnić od frakcji wbudowywanego kruszywa i głębokości wbudowania go w beton. W celu dokładnego i równomiernego rozprowadzenia piasku po formie można użyć stołu wibracyjnego. Świecące kruszywo rozkłada się ręcznie w wybranych miejscach. Tak przygotowaną formę spryskuje się niewielką ilością wody i całość wypełnia samozagęszczalną mieszanką betonową, która bez większych problemów równomiernie rozpułynie się po formie. Po związaniu betonu płytę wyjmuje się z formy, a warstwę licową wypłukuje wodą ze zbędnego podkładu piaskowego.

### 6.2. Przykłady zastosowania betonu z kruszywem luminescencyjnym

W 2014 roku w Eindhoven, w Holandii, wykonano 600-metrową świecącą w nocy ścieżkę rowerową (rys. 23). Droga nosi nazwę „Van Gogh Bicycle Path” na cześć malarza, który tam się urodził i wychował. Ścieżka powstała z luminescencyjnego, dwukolorowego kruszywa, które gromadzi energię za dnia, i oddaje ją w postaci światła w nocy. Dodatkowy efekt wizualny tworzy wzór, w jaki ułożone jest „świecące” kruszywo, którego inspiracją była twórczość malarza. W miasteczku Harnes we Francji dziedziniec hali sportowej błyszczący w środku nocy dzięki eksponowanej warstwie kruszywa luminescencyjnego (rys. 24).

Na polskim rynku dostępna jest betonowa kostka brukowa, w której w wierzchniej warstwie zastosowano kruszywo luminescencyjne (rys. 25).

## 7. Podsumowanie

W artykule przedstawione zostały wybrane, najciekawsze rodzaje betonu architektonicznego, którym obok wartości dekoracyjnej zadano dodatkowe funkcje. Opisano warunki wdrażania nowych technologii, takich jak fotobeton, beton fotokatalityczny, transparentny oraz beton z kruszywem luminescencyjnym. Betony te powstają dzięki odpowiedniemu

doborowi jakościowemu i ilościowemu podstawowych składników betonu, ale i dodatkowych komponentów, które w połączeniu ze specjalną technologią produkcji i wbudowania pozwalają na uzyskanie specjalnych właściwości takich jak: odwzorowanie obrazu na powierzchni – fotobeton, możliwość redukcji tlenków azotu – beton fotokatalityczny, przezroczystość – beton transparentny, czy „świecenie” powierzchni – beton z kruszywem luminescencyjnym. Są to niewątpliwie betony inne niż wszystkie, chociażby dlatego, że przykuwają uwagę jakością i formą widocznej powierzchni jak i zadaną funkcją w otoczeniu. Ze względu na możliwości, jakie niesie ich zastosowanie, pomimo większego kosztu produkcji stają się ważnym elementem realizacji nowo powstających obiektów. Tylko świadomość technologii nowych betonów pozwoli na optymalne wykorzystanie ich możliwości, w przeciwieństwie do działań nieprofesjonalnych prowadzących do marnotrawstwa.

**Artykuł był prezentowany na konferencji Tech-Bud 2019.**

**BIBLIOGRAFIA**

[1] PN-EN 206+A1:2016-12 Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność  
 [2] ACI 303R-12 Guide to Cast-in-Place Architectural Concrete Practice  
 [3] ACI 301-16 Specifications for Structural Concrete  
 [4] Jackiewicz-Rek W., Mroczek M., Fotobeton jako sposób urozmaicenia formy architektonicznej budowli, Materiały Budowlane 12/2014  
 [5] Jackiewicz-Rek W., Smirnow M., Woyciechowski P., Fotobeton – technologiczna efemeryda czy atrakcyjna możliwość urozmaicenia formy architektonicznej elewacji z betonu, konferencja Dni Betonu – Tradycja i Nowoczesność, 2002  
 [6] Fotobeton – ein inzwischen kalkulierbares Stilmittel für Sichtbeton; www.baulinks.de

[7] <http://www.reckli.net>  
 [8] Chilmon K., Jackiewicz-Rek W., Beton fotokatalityczny a możliwość oczyszczania powietrza, Budownictwo, Technologie, Architektura 2/2019, str. 66–69  
 [9] Hüsken G., Hunger M., Brouwers H. J. H. Experimental study of photocatalytic concrete products for air purification, Building and environment 44/12/2009, str. 2463–2474  
 [10] Cassar L., Pepe C., Paving tile comprising an hydraulic binder and photocatalyst particles, Italcementi SpA, Bergamo, Italy, EP-Patent 1600430A1, 1997  
 [11] Sokołowski M., Dziuk D., TioCem – cement z przyszłością, X Sympozjum Naukowo-Techniczne Reologia w technologii betonu, 2008, Gliwice  
 [12] Dylla, Heather, et al. Laboratory investigation of the effect of mixed nitrogen dioxide and nitrogen oxide gases on titanium dioxide photocatalytic efficiency in concrete pavements, Journal of Materials in civil engineering 23/7/2010, str. 1087–1093  
 [13] Boonen E., Beeldens A., Recent photocatalytic applications for air purification in Belgium, Coatings 4.3 (2014), str. 553–573  
 [14] Guerrini G.L., Peccati E., 2008, Tunnel UMBERTO I in Rome. Monitoring program results, CTG Italcementi Group Report n.24  
 [15] <http://www.airlite.com/2018/01/17/tunnel-umberto-repainted>, stan na 10.2019  
 [16] <http://ecoemas.com/fotocatalisis-materiales-descontaminan>, stan na 10.2019  
 [17] <https://envirotecmagazine.com>, stan na 10.2019  
 [18] <http://www.litracon.hu/en>, stan na 10.2019  
 [19] [https://www.arcvision.org/wp-content/uploads/2015/03/5-Folder\\_i.light\\_ENG\\_def.pdf](https://www.arcvision.org/wp-content/uploads/2015/03/5-Folder_i.light_ENG_def.pdf); stan na 10.2019  
 [20] <https://newatlas.com/italian-firm-creates-transparent-cement/17454/>, stan na 10.2019  
 [21] <http://www.luccon.com/en/product>, stan na 10.2019  
 [22] [www.gravelli.com](http://www.gravelli.com), stan na 10.2019  
 [23] PL 216128 B1, M. K. KURPIŃSCY, Sposób wytwarzania elementów betonowych przewodzących światło oraz forma do wytwarzania elementów betonowych przewodzących światło, udzielenie patentu 28.02.2014 WUP 02/14  
 [24] Kowieski D., Opracowanie technologii wykonywania elementów z betonu transparentnego, czerwiec, 2019  
 [25] <https://www.architecturaldigest.com/story/van-gogh-bike-path>, stan na 10.2019  
 [26] [https://bybeton.fr/grand\\_format/harnes-beton-scintiller-ville](https://bybeton.fr/grand_format/harnes-beton-scintiller-ville), stan na 10.2019  
 [27] <https://www.polbruk.pl/pl/produkty/styl/polbruk-lumia>, stan na 10.2019

XXI KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA  
**KONTRA' 2020**

TRWAŁOŚĆ BUDOWLI I OCHRONA PRZED KOROZJĄ

Warszawa-Cedzyna 27-29 maja 2020 r.



**TEMATYKA KONFERENCJI**

- odporność materiałów budowlanych na działanie agresywnych czynników zewnętrznych,
- trwałość i ochrona przed korozją konstrukcji żelbetonowych, stalowych, drewnianych i murowych,
- trwałość nawierzchni drogowych i mostów,
- modelowanie procesów degradacji materiału i konstrukcji, badania laboratoryjne,
- metody diagnostyki korozyjnej konstrukcji,
- wyroby antykorozyjne, systemy naprawcze, technologie prac antykorozyjnych i metody napraw,
- inne, związane z trwałością materiałów i konstrukcji.

**WAŻNE DATY – UWAGA: PRZEDŁUŻONY TERMIN ZGŁASZANIA UCZESTNICTWA!**

- 31.01.2020 r.** – Zgłoszenie uczestnictwa, tematu artykułu lub informacji o wystąpieniu promocyjnym
- 14.02.2020 r.** – Przesłanie pełnych tekstów artykułów i wniesienie opłaty konferencyjnej
- 30.04.2020 r.** – Przesłanie uczestnikom Komunikatu nr 2 z programem konferencji oraz informacji o akceptacji referatów

**ORGANIZATOR:**

Komitet Trwałości Budowli Zarządu Głównego Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa

**WSPÓLORGANIZATOR:**

Wydział Inżynierii Łądowej Politechniki Warszawskiej

**KONTAKT:**

e-mail: [kontra@il.pw.edu.pl](mailto:kontra@il.pw.edu.pl), [www.kontra.il.pw.edu.pl](http://www.kontra.il.pw.edu.pl)



**Wydział  
 Inżynierii Łądowej**

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

