# Nanotechnologie w budownictwie

Poznań, 24.01.2012r.

CUTOB-PZITB

Międzynarodowe Targi Poznańskie

budma

Dr hab. Eur. Inż. Tomasz Z. Błaszczyński
Mgr inż. Błażej Gwozdowski
Politechnika Poznańska

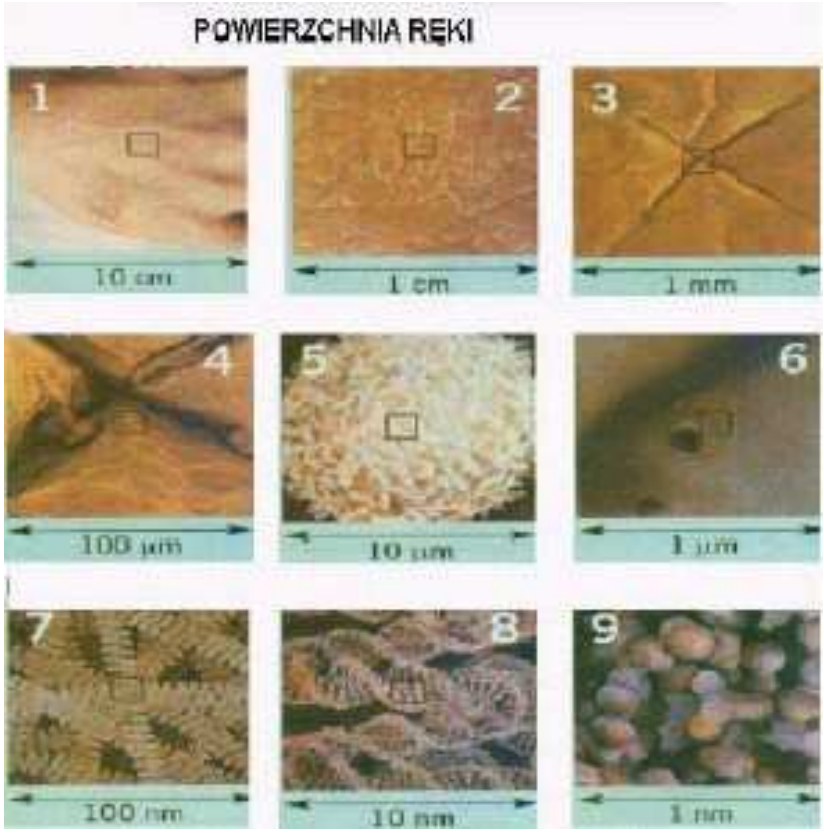
## WPROWADZENIE DO ZAGADNIEŃ NANOTECHNOLOGII W BUDOWNICTWIE

### 1. Wstęp

Nanotechnologia – technologia i produkcja bardzo małych przedmiotów na poziomie najmniejszych cząstek materii, czyli na poziomie budowy atomu – jest wciąż bardzo młodą dziedziną nauki. Jeszcze na początku ubiegłego stulecia Ernest Mach uważał, że atomy istnieją jedynie w wyobraźni ludzi i dążył do usunięcia pojęcia atomu, uznając je za metafizykę. Niewiele ponad pół wieku później, wystąpienie noblisty Richarda Feynmana z 29 grudnia 1959 roku zatytułowane „*There is plenty of room at the bottom*”, rozpoczęło na nowo dyskusję i dziś uważa się, że wtedy narodziła się nanotechnologia. To właśnie Feynman wskazał, że działanie molekularne jest możliwe, co więcej, właśnie ono powinno stać się przedmiotem dociekań naukowców w przyszłości. Dziś rewolucyjne tezy amerykańskiego fizyka znajdują potwierdzenie, a nanotechnologia rozwija się w zawrotnym tempie. Dowodem może być chociażby nagroda Nobla dla Richarda Smalleya oraz Harolda Kroto z 1996 roku za odkrycie fulerenów, czyli cząsteczek składających się z parzystej liczby atomów węgla, tworzących pustą w środku bryłę. To właśnie Smalley cztery lata po otrzymaniu nagrody stwierdził, że: *Nanotechnologia jest sztuką finezyjnego budowania: atom – po – atomie* [1].

Określenia ‘nanotechnologia’ po raz pierwszy użył japoński naukowiec z Tokyo University of Science, Norio Taniguchi. Stało się to w 1974 roku podczas konferencji, a definicja japońskiego fizyka jest nadal stosowana: *Nanotechnologia jest produkcją z wykorzystaniem technologii w celu osiągnięcia bardzo wysokiej dokładności i wyjątkowo małych wymiarów, tzn. precyzji rzędu 1 nm.* Do tej dziedziny nauki przyjęło się zaliczać wszelkie działania na cząsteczkach mniejszych niż 100 nm (1 nanometr – jedna miliardowa metra). Aby zobrazować skalę, wystarczy uświadomić sobie, że ludzki włos ma przeciętnie od 20 000 do 80 000 nanometrów, natomiast 1 nm da 10 atomów wodoru ułożonych jeden na drugim (Rys. 1).

Rys. 1a. Porównanie obrazujące skalę, jaką stosuję się w nanotechnologii.




Rys. 1b. Powierzchnia ręki w różnym zbliżeniu.

Od pomysłu, by zająć się twórczym działaniem naukowym na poziomie atomów, do uzyskania pierwszych efektów takiego działania, była jednak dość daleka droga. Pojawiła się bowiem bariera technologiczna. Pierwszym krokiem do dokonania przełomu było stworzenie przyrządów analitycznych umożliwiających oglądanie skomplikowanych, nanoskopowych elementów żywej materii. To dało możliwość dogłębnego poznania wielu rozwiązań, które natura stworzyła sama, a które dotychczas pozostawały jedynie zagadką i powodem, by darzyć je podziwem. Czerpane z przyrody ożywionej pomysły wciąż nie mogły jednak doczekać się realizacji [2, 3].

Dopiero odkrycie z lat osiemdziesiątych ubiegłego stulecia – skaningowy mikroskop tunelowy – pozwoliło nie tylko na obrazowanie atomów, ale również na ich przesuwanie w krysztale. W ten sposób stworzono podstawy do tego, by nanotechnologia zaczęła powoli wychodzić do ludzi.

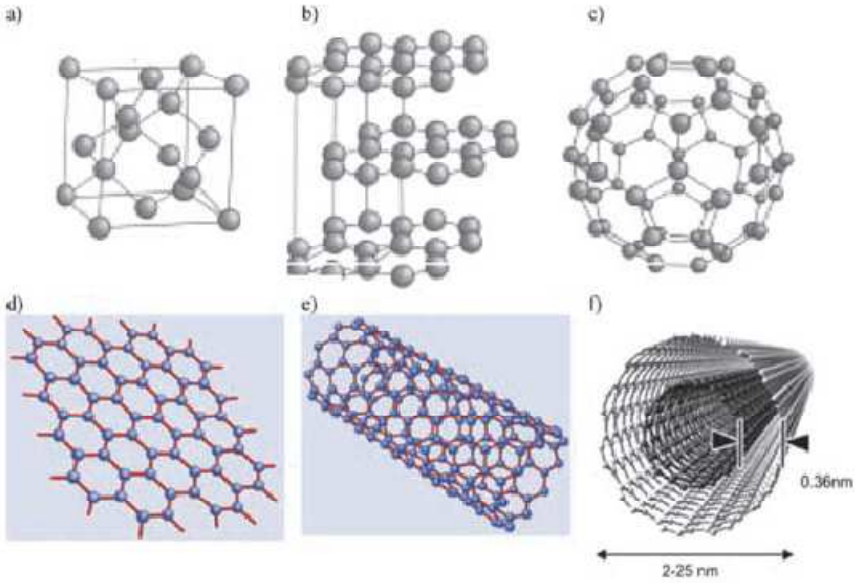
Nanotechnologia to podejście badawcze, które otwiera przed przemysłem zupełnie nowe możliwości – można dziś produkować mniejsze, lżejsze i bardziej wydajne materiały, podzespoły i systemy, rozwiązując tym samym liczne problemy, nękające ludzkość od wielu lat. Już dziś można zaryzykować stwierdzenie, że rozwój nanotechnologii pozwoli znacznie zredukować emisję zanieczyszczeń. Z nanotechnologii korzyści czerpać będzie można w wielu dziedzinach życia [2] – Rys. 2.

Rys. 2. Dziedziny, w których zastosowanie znajduje nanotechnologia.

Zanim zabrniemy głębiej w temat nanotechnologii, warto się pochylić nad pierwszym rewolucyjnym odkryciem w tej dziedzinie nauki – fulerenami. Osiągnięcie nagrodzone Noblem jest bowiem najlepszym przykładem na to, jak wiele możemy zyskać dzięki nanotechnologii (Rys. 3). Można wymienić naprawdę wiele potencjalnych zastosowań fulerenów, które wynikają z ich unikatowych właściwości fizykochemicznych [5]:

- biomedyczne (chemia i terapia medyczna),
- optyczne (domieszkowane $C_{60}$ kompozyty polimerowe, filtry optyczne),
- elektroniczne i elektryczne (tranzystory, diody, heterozłącza, urządzenia fotowoltaiczne, fotorezystory),
- elektrochemiczne (magazynowanie wodoru, ogniwa odwracalne i nieodwracalne),
- materiałowe (synteza diamentów, promotory wzrostu cienkich warstw, katalizatory, monowarstwy, nowe reagenty chemiczne).

A to nadal nie wszystkie zastosowania, bo mogą być one wykorzystane przy budowie czujników, membran, pokryć końcówek sond w mikroskopii elektronowej, czy choćby naciągów do rakiet tenisowych [5].




Rys. 3. Odmiany alotropowe węgla: a – diament, b – grafit, c – węgiel C60, d – grafen, e – nanorurka o pojedynczej strukturze, f – nanorurka wielowarstwowa [4].

W 1991 roku Iijima dokonał innego ważnego odkrycia, którego podstawą znów były atomy węgla – nanorurki węglowe (NRW). Znajdują one wiele zastosowań również w przemyśle budowlanym. Służą między innymi do:

- wzmacniania metali, ceramiki i zapraw cementowych,
- zwiększenia przewodności elektrycznej materiałów,
- zapobiegania powstawaniu i rozwojowi rys w betonie,
- produkcji nanokompozytów i kompozytów węglowych.

Nowe odmiany alotropowe węgla są wielkim wkładem nanotechnologii w inżynierię materiałową.

Podstawy naukowe to jedno, teraz niezwykle istotne jest stworzenie odpowiednich warunków do rozwoju nanotechnologii i ułatwienie przemysłowi korzystania z nowych osiągnięć. Nic zatem dziwnego, że w Europie i na świecie duży nacisk kładzie się na opracowanie nowych procesów i produktów, czego najlepszym dowodem jest publikacja Komisji Europejskiej pt. *„Ku europejskiej strategii w zakresie nanotechnologii”* z maja 2004 roku [6]. W komunikacie tym poruszono wiele ważnych kwestii, poczynając od bezpieczeństwa, przez finansowanie oraz promocję nanotechnologii, na edukacji, szkoleniu i współpracy międzynarodowej kończąc.

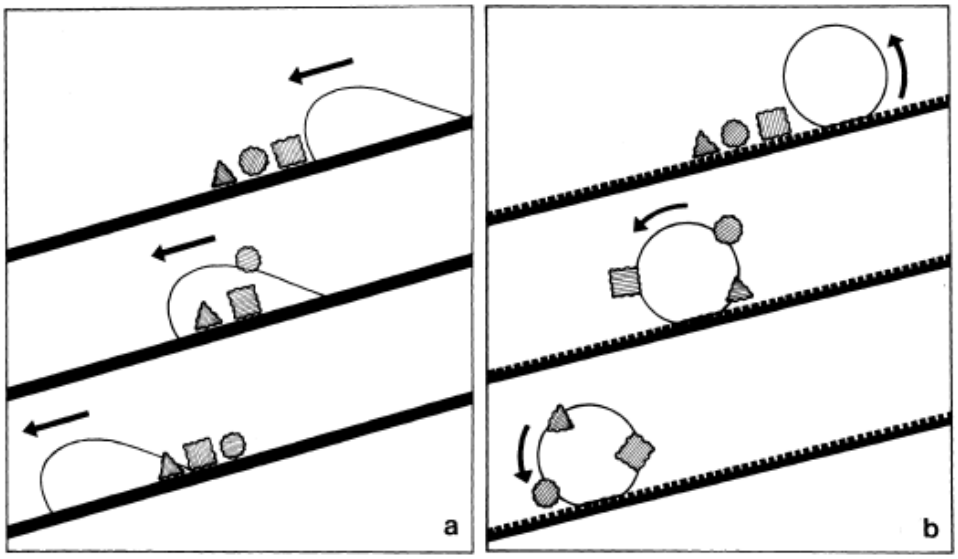
Postawiono już zatem sprawę jasno – nanotechnologia jest dziedziną nauki mającą przed sobą świetlaną przyszłość. Zbyt wiele korzyści już dzięki niej osiągamy i zbyt wiele możliwości jest ciągle odkrywanych, by zaniedbać kwestię rozwoju nanotechnologii. W XXI wieku coraz trudniej wyobrazić sobie dalszy rozwój ogólnie pojętego przemysłu bez wykorzystania nanotechnologii. Proces ten następuje oczywiście także w budownictwie, gdzie powszechne jeszcze niedawno rozwiązania (jedynie w technologiach wspierających eksploracje kosmosu), przebojem wchodzą na rynek materiałów budowlanych. Dzięki nanotechnologii to, co jeszcze kilkanaście lat temu wydawało się niemożliwe, dziś staje się rzeczywistością.

## 2. Nanotechnologia naśladująca naturę

Znalezienie najbardziej efektywnych rozwiązań problemów, które napotykamy funkcjonując w otaczającym nas świecie, wcale nie musi się wiązać z twórczym działaniem naukowego świata. Wręcz przeciwnie. Wnikliwa obserwacja świata, który nas otacza, pozwala dojść do wniosku, że z wieloma nękającymi nas problemami natura poradziła sobie sama i to wręcz doskonale. Trudno zatem oprzeć się pokusie naśladownictwa, a pole do popisu dla współczesnych naukowców jest ogromne. Dokładne poznanie sekretów, jakie wciąż przed nami kryje świat przyrody ożywionej, to jedno z podstawowych wyzwań stojących przed naukowcami. Wiele procesów zachodzących w przyrodzie dało impuls do działania i już dziś znanych jest wiele rozwiązań odtwórczych, które nanotechnolodzy wprowadzają powoli na taśmy produkcyjne. Produkty odtwórstwa cudów natury są obecnie w cenie.

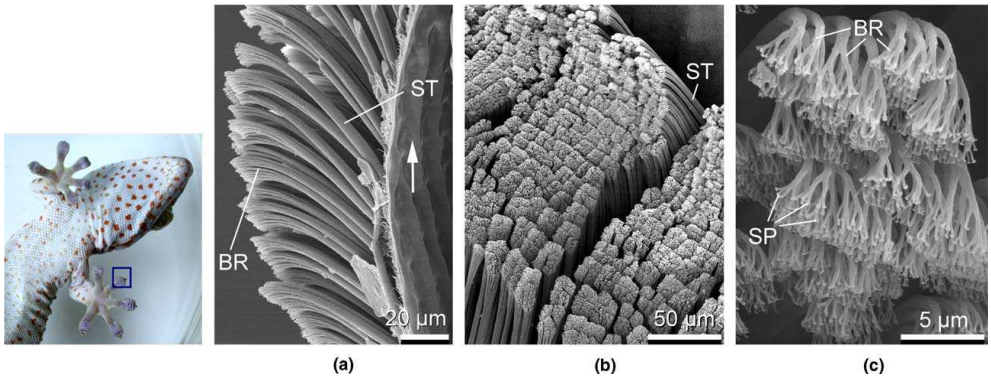
Jednym z ciekawszych zjawisk występujących w przyrodzie jest tzw. efekt lotosu. Pierwsze badania na temat związku między chropowatością powierzchni a hydrofobowością prowadzili w latach 40-tych ubiegłego stulecia Cassie i Baxter. Przełomu dokonał jednak dopiero profesor Barthlott wraz ze swoimi współpracownikami z Uniwersytetu w Bonn. Badania prowadzone przez Barthlotta i Neinhuisa [6] dowiodły, że *Nelumbo nucifera* (lotos orzechodajny), dzięki hydrofobowej powierzchni o mikroskopijnej chropowatości, wykazuje umiejętność samooczyszczenia. Wykorzystywana jest zdolność kropli wody do przyjmowania dużej ilości wszelkich zanieczyszczeń, co przy niewielkiej powierzchni jej kontaktu z liściem, powoduje iż owe zanieczyszczenia spływają wraz z wodą. Podobną zdolność posiadają także niektóre zwierzęta i inne rośliny. Mechanizm samoczyszczenia w przypadku powierzchni o mikroskopijnej chropowatości został przedstawiony na rys. 4. Celem nanotechnologów stało się stworzenie materiałów, które będą wykazywać się podobnymi właściwościami.

Dziś niesamowitą zdolność samoczyszczenia zwaną efektem lotosu wykorzystuje się w wielu produktach. Przykładem mogą być hydrofobowe farby do elewacji czy ceramika sanitarna. Efekt w obu przypadkach jest ten sam – znacznie łatwiejsze stało się utrzymanie czystości [2].




Rys. 4. Schemat przedstawiający proces samoczyszczenia na chropowatej powierzchni (a), w porównaniu z powierzchnią gładką (b) [7].

Innym cudem natury, nad którym musieli pochylić się naukowcy, jest zdolność gekona do poruszania się po ścianach czy nawet biegania po suficie. Tym fenomenem zajęli się pracownicy Instytutu Metalurgii Maxa Plancka w Stuttgarcie. Naukowcy odkryli, że niesamowita przyczepność łap gekona jest związana ściśle z działaniem sił van der Waalsa, które przecież są bardzo słabe. Ponieważ jednak zachodzą one pomiędzy powierzchnią podłoża a setkami tysięcy keratynowych włosów lub szczeciny pokrywających łapy gekona, miejsc zaczepienia jest na tyle dużo, że utrzymanie ciężaru ciała zwierzęcia jest jak najbardziej możliwe [8].




Rys. 5. Struktura powierzchni łapy gekona w różnych powiększeniach [8].

Wszystko to dzięki temu, że każdy z mierzących od 30 do 130 µm włosków składa się z setek 200-500 nm łopatek i wypustek (rys. 5). Przyczepność zwiększona jest jeszcze przez elektryczne właściwości końcówek włosków. Prowadzone badania miały na celu nie tylko dokładniej poznać mechanizm, który pozwala gekonowi poruszać się, nie zważając na grawitację, ale także znalezienie odpowiedzi na to, jaka jest optymalna siła adhezji? Przecież by móc się poruszać, musi on być w stanie ze sporą łatwością przerwać powstałe oddziaływanie. Obserwacje pokazały, że gekonowi zamocowanie się do szklanej powierzchni zajmuje 40 ms, natomiast zerwanie oddziaływania pochłania zaledwie 66 ms [8].

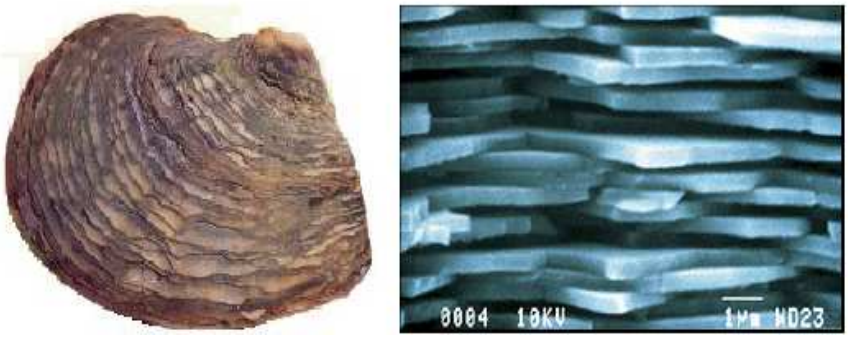
Dorównanie naturze zawsze było zadaniem niezwykle trudnym i w tym wypadku również stworzenie produktów pozwalających w sposób efektywny wykorzystywać ten mechanizm, nie jest rzeczą łatwą. Pierwsze kroki zostały już jednak wykonane i wydaje się kwestią czasu, gdy i ten fenomen natury znajdzie swoje zastosowanie w naszym codziennym życiu, rozwiązując wiele problemów.

Równie interesującym produktem natury jest sieć pajęcza, której elastyczność i wytrzymałość jest wręcz zadziwiająca (Rys. 6). Poznanie procesu jej wytwarzania z wodnego roztworu białek, który zachodzi w pajęczych kądziołkach podrzędnych, jest marzeniem wielu naukowców. Może kiedy wyjaśnione zostaną szczegóły tego procesu, uda się stworzyć nić o podobnych właściwościach. Odtwórcze działanie jest w tym wypadku bardzo uzasadnione – wystarczy wspomnieć, że włókno pajęcze o grubości od 10 do 200 razy mniejszej niż ludzki włos ma wytrzymałość dwukrotnie większą od wytrzymałości stali, a pajęcza nić o grubości 1 mm może utrzymać ciężar dorosłego człowieka.

Rys. 6. Sieć pajęcza.

Wciąż trwają badania, które pozwolą znaleźć metodę wytwarzania syntetycznej nici pajęczej. Jest to zdecydowanie najbardziej wytrzymały materiał, z jakim kiedykolwiek na ziemi się spotkano i produkcja nici o takiej wytrzymałości na masową skalę jest niezwykle kuszącą perspektywą. Już opracowano pierwsze metody, z których jedna stworzona przez Nexia Biotechnologies polega na wytwarzaniu nici z białek ssaków zmodyfikowanych genetycznie. Powstałe w ten sposób włókno jest niemal tak wytrzymałe, jak naturalna pajęczyna. Co ważne, otrzymywany w ten sposób produkt jest całkowicie biodegradowalny (składa się z białek). Przy dalszych postępach w tej dziedzinie, może już niedługo protezy, nici chirurgiczne, sieci rybackie, kamizelki kuloodporne czy ubrania ochronne dla wojska i policji będą wykonane właśnie z pajęczyny.

Wśród innych wzorców, którymi nanotechnolodzy zaczęli się interesować, trzeba wymieć między innymi muszle obalona (Rys. 7). Ich wielowarstwowa struktura i duża odporność na pęknięcia inspirują naukowców.




Rys. 7. Muszla abalona i jej struktura.

Wiele można się także nauczyć od małż, które wytwarzają niezwykle mocny klej podwodny. Wszystko to jednak dopiero wierzchołek góry lodowej. Przed nami nadal wiele lat poznawania kolejnych sekretnych rozwiązań, jakimi natura zawstydza największych naukowców.

## 3. Nanotechnologia w produkowanych materiałach budowlanych

Problem wykorzystania nanotechnologii dla budownictwa był poruszany już wielokrotnie [4, 9, 10]. Jako główną przyczynę dość skromnego wykorzystania tej nowej dziedziny nauki w branży budowlanej podaje się adaptacyjny charakter budownictwa. Większość z nowoczesnych rozwiązań technologicznych i materiałowych trafia na rynek budowlany dopiero po tym, jak zostaną skutecznie wykorzystane w innych branżach. Ma na to wpływ także fakt, że obiekty budowlane w odróżnieniu od wyrobów mikroelektroniki czy medycyny, mają bardzo długi okres użytkowania. W związku z tym wszelkie nowinki są raczej dość powoli adaptowane z branż rozwijających się bardziej gwałtownie. Oczywiście nie można także zapominać, iż wciąż brakuje odpowiednich specjalistów. To wszystko składa się na to, iż budownictwo pomimo usytuowania kilka lat temu aż na ósmej pozycji wśród największych beneficjentów nanotechnologii, nie czerpie aż tak wielkich korzyści z tej dziedziny nauki [4, 9] - Tablica 1.

Tablica 1. Lista największych beneficjentów rozwoju nanotechnologii [4, 9].

| Pozycja | Obszar |
|---|---|
| 1 | Energia: wytwarzanie, przetwarzanie, magazynowanie |
| 2 | Rolnictwo |
| 3 | Uzdatnianie wody |
| 4 | Diagnostyka medyczna |
| 5 | Farmacja |
| 6 | Przemysł spożywczy |
| 7 | Ochrona czystości powietrza |
| **8** | **Budownictwo** |
| 9 | Monitorowanie zdrowia pacjenta |
| 10 | Wykrywanie ognisk chorobotwórczych |

Biorąc pod uwagę to, na jaką skalę funkcjonuje przemysł budowlany, jeśli chodzi o przerób materii, oczywistą wydaje się konieczność rozwoju technologii materiałowej. Nanotechnologia w tym rozwoju uczestniczy i będzie uczestniczyć, co już dziś widać na rynku materiałów budowlanych.

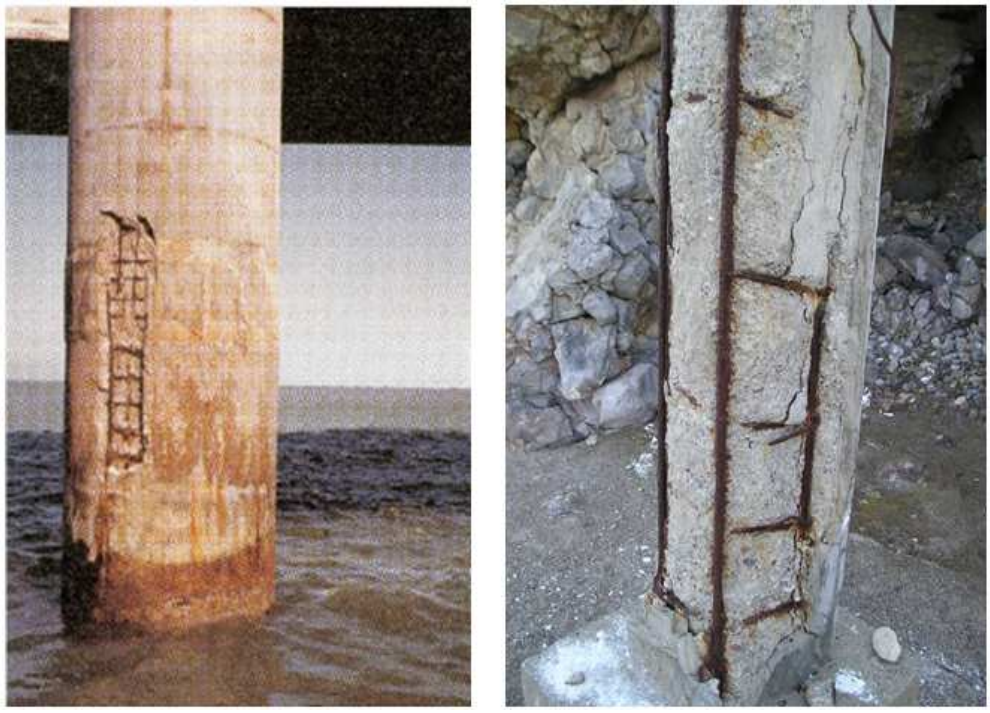
### 3.1 Hydrofobizacja i jej zastosowania

Projektując i realizując obiekty budowlane zakłada się, że przez wiele lat będą one z powodzeniem pełnić swoją funkcję (Rys. 8). Z upływem czasu następuje jednak degradacja materiału, z którego zostały one wzniesione. Do najbardziej narażonych budowli zalicza się przede wszystkim obiekty mostowe i drogowe [11, 12].

Rys. 8. Korzyści wynikające z długotrwałości betonu [13].

Obiekty te są bowiem narażone na działanie szkodliwych warunków atmosferycznych. Problemem jest także często stosowanie niewłaściwych chlorkowych środków odladzających. W Europie Zachodniej stawia się na ochronę prewencyjną obiektów budowlanych, co wynika z analiz, wg których takie postępowanie jest uzasadnione technologicznie, ekologicznie i przede wszystkim ekonomicznie. Jednym ze sposobów na zapewnienie większej trwałości materiałom takim jak beton, jest Hydrofobizacja (impregnacja wodoodporna) [11, 12].

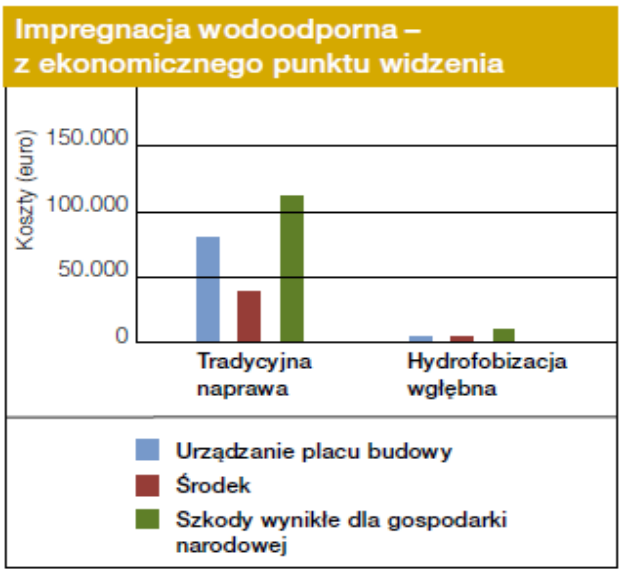
Środki impregnujące stosowane do niedawna nie były wystarczająco trwałe, by hydrofobizacja była traktowana jako technologia mogąca pomóc w redukcji kosztów związanych z konserwacją betonu. Dotychczas stosowane środki hydrofobowe bazowały bowiem na rozpuszczalnikach oraz emulsjach i impregnację trzeba było powtarzać co około 5 lat. Stosunkowo szybkiej degradacji wywołanej przez promieniowanie UV, działanie kwaśnych gazów oraz wodę (korozja chlorkowa, szkody spowodowane solą w wyniku hydratacji i krystalizacji, wymywanie wapna), podlegały powierzchnie poddane hydrofobizacji powierzchniowej, czyli takiej sięgającej głębokości 2 mm (Rys. 9).



Rys. 9. Skutki korozji chlorkowej.

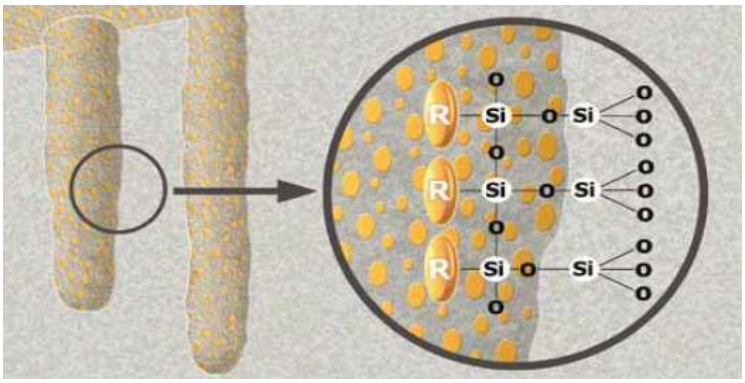
Wraz z rozwojem nanotechnologii pojawiło się jednak rozwiązanie zdecydowanie bardziej trwałe, a co za tym idzie bardziej racjonalne. Stworzone zostały środki hydrofobowe, potrafiące wniknąć w pory na głębokość 6-8 mm. Wykonywana przy ich użyciu hydrofobizacja wgłębna to rozwiązanie gwarantujące wieloletnią skuteczną ochronę antykorozyjną betonu i zbrojenia. Doświadczenia z krajów skandynawskich dowodzą, że jeżeli zapewni się odpowiednią kontrolę wykonywania hydrofobizacji (głębokości aplikacji

środka hydrofobowego i procentowej zawartości środka czynnego), to efektywność zostanie utrzymana nawet po 30 latach od aplikacji [12].



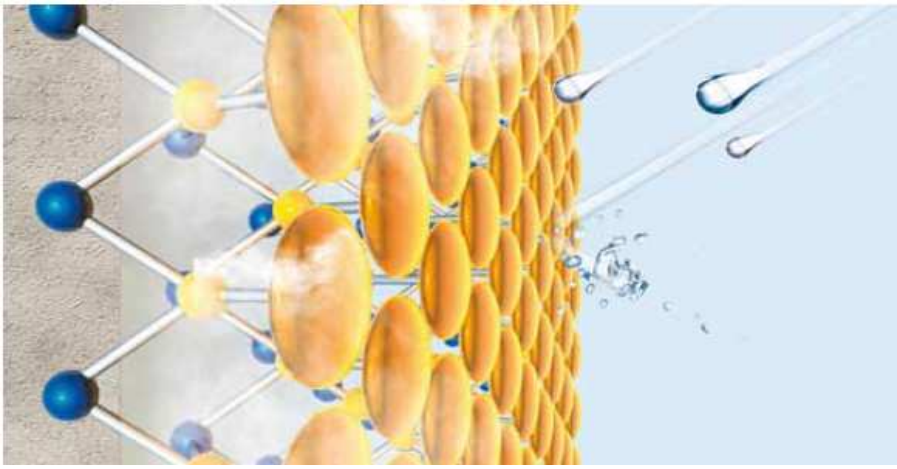

Rys. 10. Porównanie kosztów tradycyjnej naprawy i hydrofobizacji wgłębnej [13].

Zgodnie z danymi firmy WACKER usuwanie szkód powstających podczas użytkowania budowli betonowych jest aż dziesięciokrotnie bardziej kosztowne, niż impregnacja wodoodporna, będąca środkiem zapobiegawczym. Na rys. 10. zobrazowane zostały dane liczbowe przedstawione w 2007 roku na Uniwersytecie w Karlsruhe. Jasno z nich wynika, że w perspektywie wielu lat, znacznie lepszym i bardziej ekonomicznym rozwiązaniem jest zapobieganie metodą hydrofobizacji wgłębnej. Jest to związane z tym, że największe koszty nie są wcale generowane poprzez same środki jako takie, ale nakłady na infrastrukturę podczas napraw oraz urządzanie placu budowy. Pomijanie tych kosztów jest rażącym zaniedbaniem, gdyż stanowią one nawet 80% kosztów całego przedsięwzięcia [12, 13].

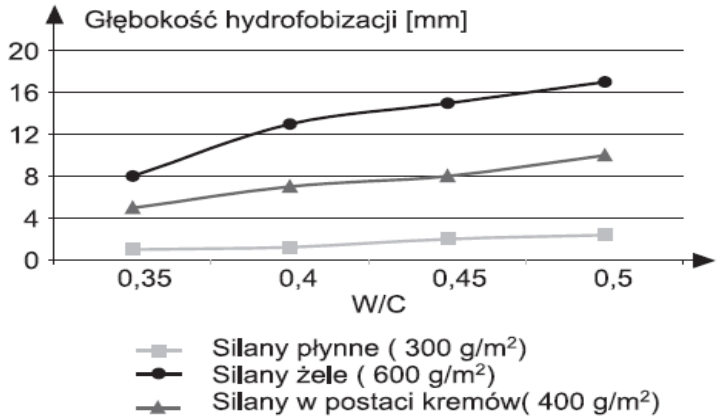



Rys. 11. Wiązanie się silanu z betonem, tworzące działanie hydrofobowe [12, 13].

Jednym z najpowszechniej stosowanych obecnie rozwiązań jest hydrofobizacja wgłębna z zastosowaniem wysoko alkilowanych silanów (izooktyle). Silany charakteryzują się doskonałą wodoodpornością, a przy tym są bardzo trwałe i obojętne na wpływy fizyczne, chemiczne i mikrobiologiczne (Rys. . Wszystko dzięki temu, że silany wnikając w beton, tworzą z nim stabilne wiązania SI – O – SI (Rys. 11), czemu towarzyszy powstawanie struktur analogicznych do żywic silikonowych. Struktura przereagowanego silanu jest zbliżona do budowy kwarcu naturalnego, co pomaga zrozumieć, skąd tak wielka trwałość żywic silikonowych [12, 13] – Rys. 12.



Rys. 12. Schemat ochrony betonu zabezpieczonego poprzez hydrofobizację wgłębną [13].




Rys. 13. Głębokość wnikania silanów w zależności od rodzaju środka oraz betonu [11].

Ponieważ o skuteczności hydrofobizacji decyduje głębokość wniknięcia odpowiedniej ilości substancji czynnej, trzeba zwrócić uwagę, na jaki środek hydrofobowy się zdecydować. Zależnie od rodzaju (silany płynne, silany żele, silany w postaci kremów), głębokość wnikania środka jest różna, co przedstawione zostało na rys. 13 [11].

### 3.2. Impregnaty i powłoki wykorzystujące efekt lotosu i fotokatalizy

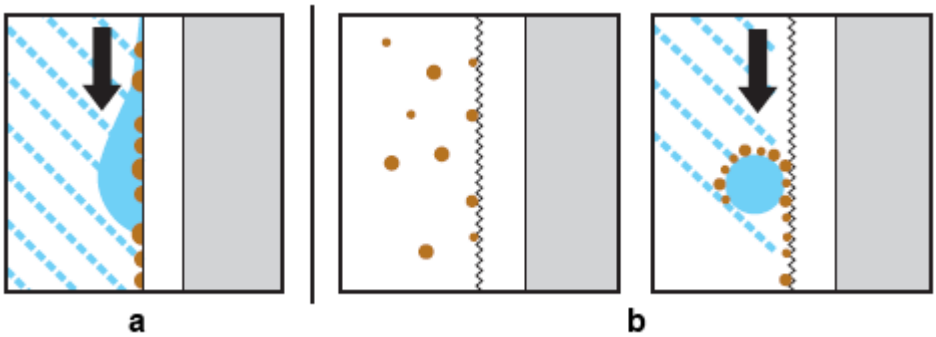
Opisana w punkcie 2. zdolność lotosu orzechodajnego to jedno z rozwiązań stworzonych przez naturę, które doczekało się skutecznie funkcjonującej imitacji wykorzystywanej w przemyśle budowlanym. Impregnaty i powłoki z efektem lotosu posiadają unikalne właściwości. Są to materiały:

- przeciwdziałające przywieraniu,
- somoczyszczące pod wpływem wody,
- antybakteryjne,
- odporne na działanie temperatur, promieniowania UV i na uszkodzenia mechaniczne,
- nieszkodliwe dla skóry.

Mechanizm działania jest bardzo zbliżony do tego, który stworzyła natura na potrzeby lotosu, którego liście są niezwilżalne i po każdym deszczu od razu stają się suche i czyste, ponieważ krople wody toczą się po nich niczym kule po szklanej płycie, zabierając ze sobą brud. Efekt lotosu w farbach i tynkach został osiągnięty poprzez połączenie właściwości hydrofobowych farb silikonowych z mikrostrukturą o drobnej chropowatości. Proces samoczyszczenia powłoki elewacyjnej przez kroplę wody i efekty zostały zobrazowany na poniższych rysunkach (Rys. 14, 15) [14].

Rys. 14. Głębokość wnikania silanów w zależności od rodzaju środka oraz betonu [14].

Ponadto producenci powłok hydrofobowych z efektem lotosu deklarują, iż cechują się one bardzo dobrymi właściwościami w zakresie fizyki budowli oraz bardzo dobrą przepuszczalnością dwutlenku węgla. Powłoki tego typu są uniwersalne i można je stosować na bardzo różnych podłożach – nadają się zarówno do tynków cementowych, cementowo-wapiennych i wapiennych, a także akrylowych, silikonowych, silikatowych, wymurówek licowych z piaskowca i cegły ceramicznej. Również starsze budynki pokryte już farbami wapiennymi, cementowymi, silikatowymi, akrylowymi czy silikonowymi, mogą być odnawiane przy użyciu farb tworzących powłokę hydrofobową – produkty tego typu znajdą więc zastosowanie także przy renowacjach budynków zabytkowych [14].




Rys. 15. Mechanizm samoczyszczenia powłok elewacyjnych z efektem lotosu (b) w porównaniu z tradycyjną powłoką elewacyjną (a) [14].

Produkowanych jest wiele różnych rodzajów farb hydrofobowych i znajdują one zastosowanie między innymi do takich produktów i elementów konstrukcyjnych jak:

– ceramika – zapewniają optymalne warunki higieniczne,
– stal szlachetna – ochrona przed korozją,
– okna (szyby) – samooczyszczanie,
– drewno, kamień – ochrona przed mchami i spalinami,
– wykładziny podłogowe – łatwość do utrzymania w czystości,
– anty-graffiti – niechciane malunki zmywane są za pomocą wody pod ciśnieniem (rys. 16).

Rys. 16. Usuwanie graffiti ze ścian pokrytych farbą hydrofobową za pomocą wody pod ciśnieniem.

Oprócz farb i powłok hydrofobowych, produkowane są także bezbarwne preparaty, które zabezpieczają powierzchnię, nie pozwalając na wniknięcie zanieczyszczeń do porów. Przy tym jednocześnie nie zakłócają procesu oddychania powierzchni. Dzięki zastosowaniu tego typu środków, pozbycie się wszelkich nieczystości nie wymaga żadnych specjalnych detergentów – podobnie jak w przypadku farb hydrofobowych, zanieczyszczenia można spłukać za pomocą wody.

Ciekawe właściwości mają również powłoki hydrofilowe z dwutlenku tytanu ($TiO_2$). Wśród najważniejszych należy wymienić [15, 16, 17]:

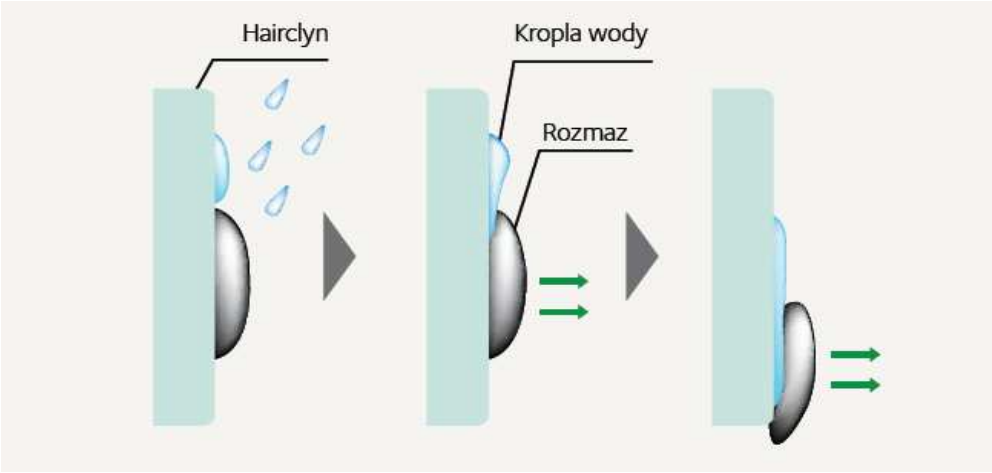
- właściwości samoczyszczące w deszczu – w oknach, świetlikach dachowych, elewacjach ceramicznych i aluminiowych, przeźroczystych zadaszeniach i szklarniach,
- ułatwianie mycia – ściany tuneli, oświetlenie tuneli,
- właściwości przeciwmgielne i zapobieganie utworzeniu się kropli,
- ochrona przed promieniowanie UV – elewacje o dużym nasłonecznieniu,
- neutralizacja zapachów – palarnie, wnętrza z dużym natężeniem nieprzyjemnych zapachów, szatnie sportowców,
- właściwości bakteriobójcze i przeciwgrzybiczne – instalacje do oczyszczania powietrza w budynkach, ściany w łazienkach i ubikacjach miejsc użyteczności publicznej, powierzchnie sal operacyjnych i gabinetów lekarskich,
- działanie antystatyczne.

Powłoki hydrofilowe stosowane są także w produktach stalowych (np. Arcelor Mittal). Są one bardzo dobrym rozwiązaniem w przypadku fasad o znacznej powierzchni. Takie powłoki powodują, że woda na powierzchni rozprowadzana jest bardziej równomiernie, a to ułatwia czyszczenie. Ponadto nie są na powierzchni widoczne krople, co ze względu na estetykę jest jak najbardziej pożądane. Efekty w rozwiązaniach Hairclyn firmy Arcelor Mittal zostały zaprezentowane na poniższym rysunku (rys. 17) [18].

Rys. 17. Efekty zastosowanie powłoki hydrofilowej Hairclyn w porównaniu z tradycyjnym rozwiązaniem [18].

Technologa Hairclyn jest oparta na próżniowym nakładaniu powłok (PVD – Fizyczne Nakładanie Próżniowe) zawierających dwutlenek tytanu. Odbywa się to już podczas procesu produkcyjnego materiału. Materiały produkowane w ten sposób są dostępne w wielu kolorach, co jest dodatkowym atutem, zwłaszcza, że są one szeroko stosowane przy konstruowaniu ścian fasadowych [18].

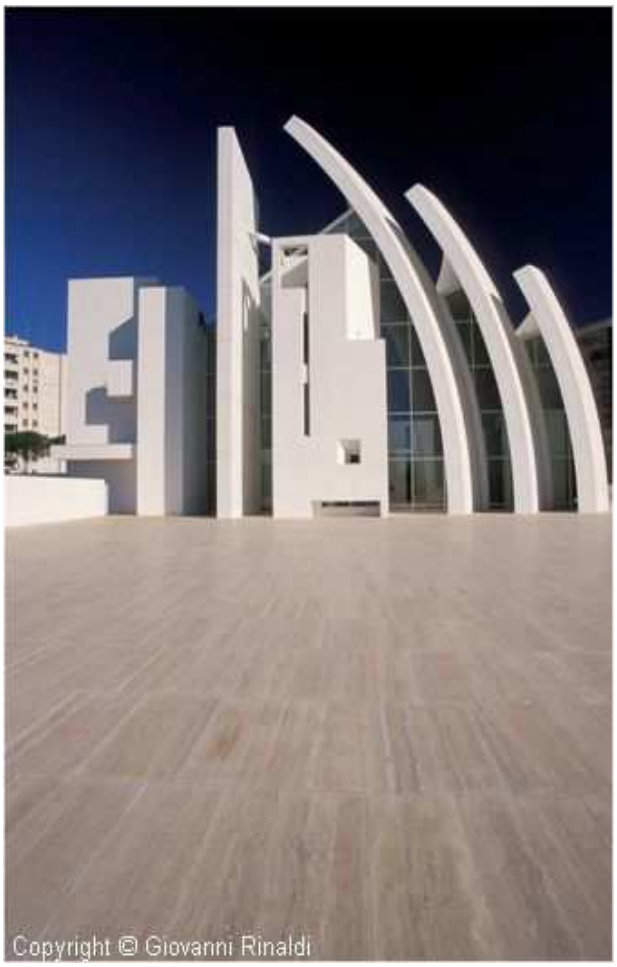
Ponieważ powierzchnie fasad wielkich hal produkcyjnych są bardzo duże, możliwość łatwego utrzymania w czystości ma kolosalne znaczenie. Producent zapewnia, że czyszczenie fasad wykonanych z produktów Hairclyn może odbywać się bez stosowania jakichkolwiek środków czyszczących. Mniejsze wg producenta jest także zużycie wody, przede wszystkim dzięki mechanizmowi samoczyszczenia, którego schemat został przedstawiony na rys. 18.




Rys. 18. Mechanizm samoczyszczenia w produktach Hairclyn [18].

Dodatki dwutlenku tytanu są także powszechnie stosowane do produkcji betonu, który zyskuje dzięki niemu zdolność do samo-ochrony przed działaniem szkodliwych czynników zewnętrznych. W wyniku fotokatalizy dwutlenku tytanu powierzchnia betonu zyskuje między innymi bardzo pożądane właściwości: zdolność do oczyszczania powietrza oraz do samooczyszczania, a ponadto wszystkie inne cechy charakterystyczne dla powłok z $TiO_2$ [16]. Technologia opiera się na tym, że do cementu portlandzkiego dodawany jest dwutlenek tytanu w postaci białego proszku. Procedura jest zatem wyjątkowo prosta, a uzyskane rezultaty bardzo dobre. Procesy chemiczne, które zachodzą na powierzchni betonu są również proste: ponieważ zawiera on nanokrystaliczny dwutlenek tytanu, na jego powierzchni tworzą się rodniki wodorotlenowe $OH^-$ o silnych właściwościach utleniających, które utleniają i rozkładają różnego rodzaju zabrudzenia organiczne, między innymi tłuszcze, oleje, bakterie, gazy zapachowe i spaliny. Następnie swoją rolę spełnia promieniowanie ultrafioletowe (UV) i szkodliwe tlenki azotu przechodzą w jony azotanowe $NO_3^-$. Te natomiast reagują z wodą deszczową i w wyniku tej reakcji powstaje kwas azotanowy, który jest neutralizowany na powierzchni betonu i spłukiwany przez wodę opadową. W zbliżony sposób neutralizowane są także szkodliwe tlenki siarki. Badania dowodzą, iż poziom szkodliwych tlenków siarki czy azotu, może być w ten sposób zredukowany nawet o 80% [19].

Istnieją jednak również bardziej złożone metody wykorzystywania $TiO_2$, co zaprezentowało między innymi firma Italcementi. Podczas renowacji poważnie zniszczonego tunelu w Rzymie Italcementi zastosowało dodatkowo na tyle mocne sztuczne źródła promieniowania ultrafioletowego, by wywołać fotokatalizę w wylanym betonie [20]. Ta sama firma brała również udział w budowie jednego z ciekawszych i bardziej nowoczesnych kościołów – położonej na obrzeżach Rzymu świątyni o nazwie *„Dives In Misericordia”* (*Bogaty w Miłosierdzie*). To co najbardziej zwraca uwagę w tej kaplicy, to piękna, śnieżna biel żelbetowej konstrukcji. Taki efekt udało się osiągnąć poprzez zastosowanie białego cementu oraz wykorzystania jako kruszywa marmuru karraryjskiego (jest to idealnie biały marmur wydobywany we Włoszech w okolicach Carary). Samooczyszczanie się powierzchni konstrukcji w tym kościele zapewnia zawarty w cemencie Bianco TX Millenium® (produkcji Italcementi) dwutlenek tytanu. Ciekawy efekt osiągnięto także przy budowie biurowca policji w Bordeaux. Zdjęcia włoskiego kościoła (rys. 19a i 19b) oraz biurowca policji (rys. 19c) zostały przedstawione poniżej.

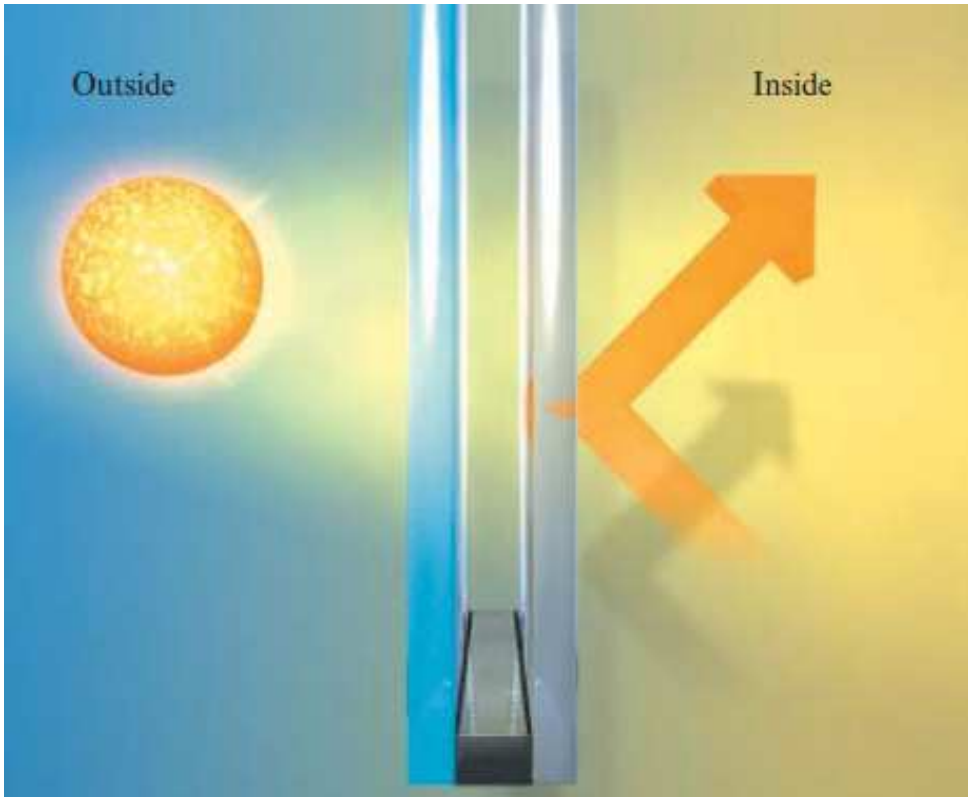



Rys. 19a. Kościół „Dives In Misericordia” – widok z zewnątrz.

Rys. 19b. Kościół „Dives In Misericordia” – widok wnętrza.

Rys. 19c. Budynek Policji w Bordeuax.

Właściwość samooczyszczania udało się także nadać szkłu, a okna i przeszklenia posiadające te cechę funkcjonują już w wielu budynkach. Jednym z pionierów w tej dziedzinie jest firma Pikington. Wytwarzane przez tego producenta szkło *„Activ”* pokryte jest specjalną warstwą grubości 50 nm, składającą się z nanocząsteczek dwutlenku tytanu. Kiedy promienie ultrafioletowe z naturalnego światła dziennego oddziałuje na powierzchnię szkła, $TiO_2$ zaczyna reagować, czemu towarzyszy rozkładanie zanieczyszczeń organicznych. Ten proces fotokatalityczny został już opisany wcześniej, podczas omawiania powłok wykorzystujących dwutlenek tytanu. Ponieważ szkło ma też właściwości hydrofilowe, deszczówka, bądź też woda rozproszona celowo po powierzchni w celu czyszczenia szyby, spływa równomiernie, zmywając przy tym rozłożony podczas fotokatalizy brud. Systemy przeszkleń z serii *„Activ”* pomagają ponadto utrzymać odpowiednią temperaturę wewnątrz pomieszczeń. Już zastosowanie dwuwarstwowych rozwiązań, które składają się z dwóch 4 mm tafli szkła *„Activ”* oraz *„Optitherm”*, pomiędzy którymi jest 16 mm pustka wypełniona argonem, pozwala osiągnąć współczynnik przenikania ciepła U na poziomie 1,2 $W/m^2 \cdot K$. Natomiast zastosowanie rozwiązań trójwarstwowych pozwala jeszcze zredukować współczynnik do wartości wyraźnie poniżej 1,0 $W/m^2 \cdot K$ [21].



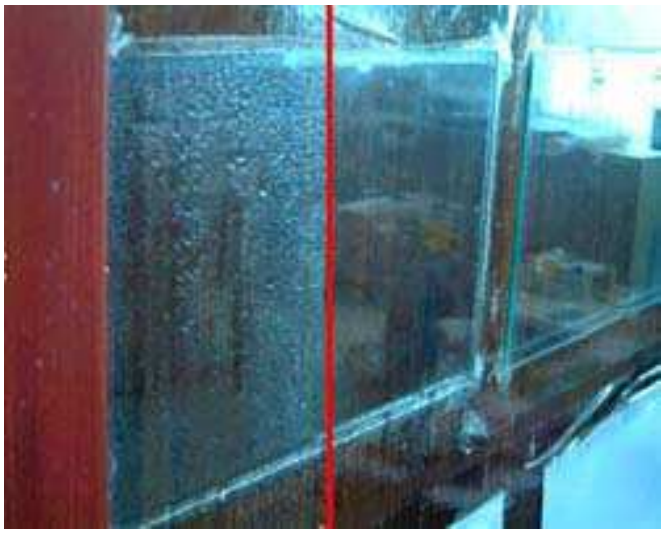

Rys. 20. Działanie niskoemisyjnego szkła w systemach Pikington K Glass™ [21].

Alternatywą jest jeszcze zastosowanie szkła niskoemisyjnego, jako wewnętrznej warstwy systemów przeszkleń. Takie rozwiązanie nie ogranicza przenikania

promieniowania świetlnego z zewnątrz, natomiast powstrzymuje przenikanie ciepła na zewnątrz budynku (Rys. 20).

Podobne właściwości można uzyskać, stosując preparaty firmy Nanopac. Pozwalają one stworzyć na powierzchni przeszklenia powłokę fotokatalityczną na bazie dwutlenku tytanu, poprzez naniesienie natryskowe pistoletem pod ciśnieniem. W ten sposób zaimpregnowane powierzchnie rozkładają zanieczyszczenia organiczne, a do procesu fotokatalizy nie jest niezbędne bezpośrednie działanie promieniowania ultrafioletowego. Dodatkowo preparat nadaje powierzchni funkcję dezodorującą i bakteriobójczą.

Preparaty tego typu są także używane do impregnacji ekranów akustycznych z przeźroczystych poliwęglanów. Pozwala to utrzymać ich konstrukcję w czystości i gwarantuje przeźroczystość konstrukcji nawet po opadach deszczu [22] – Rys. 21, 22.

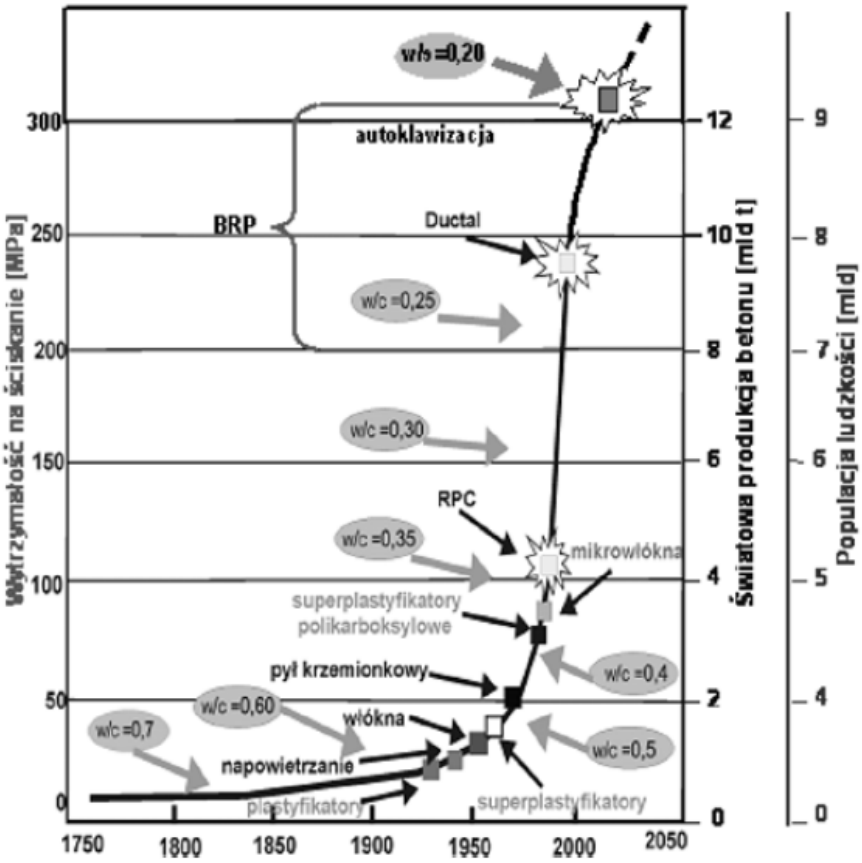


Rys. 21. Szyba pokryta impregnatem – samooczyszczanie na deszczu (z lewej: część nie pokryta powłoką, z prawej: część pokryta powłoką) [22].

Rys. 22. Ściana dźwiękochłonna z poliwęglanów [22].

## 3.3. Nanobeton i nanocement

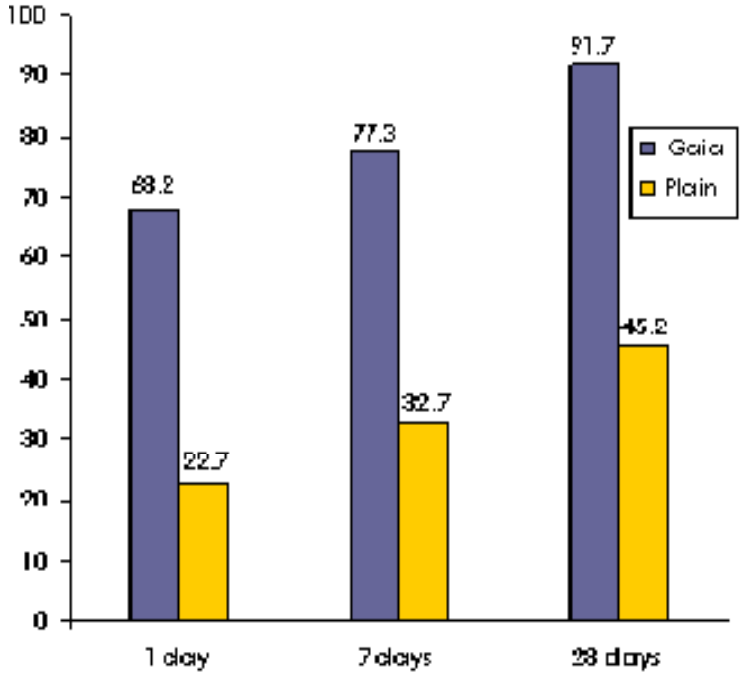
Stopniowe ulepszanie mieszanek betonowych przez lata było realizowane wyłącznie na poziomie makro. Jak zostało to zobrazowane na diagramie rozwoju betonu (Rys. 23), kolejne zmiany w składzie mieszanki, poprzez dodawanie domieszek upłynniających, sprawiły, że wytrzymałość betonu wzrosła bardzo gwałtownie. Doprowadziło to jednak także do redukcji wskaźnika wodno-cementowego do wartości minimalnej. Dalsze modyfikacje w skali makro mogą już tylko skutkować kosmetycznymi zmianami właściwości. Nadzieję na ponowne przyśpieszenie rozwoju wytrzymałości i ulepszenie także pozostałych cech betonu przynosi nanotechnologia. Pierwsze próby nanomodyfikacji betonu przyniosły obiecujące efekty [4, 23].




Rys. 23. Uogólniona krzywa rozwoju betonu [4].

Nanomodyfikacja może być prowadzona na dwa różne sposoby. Pierwszy to modyfikacja prosta, natomiast drugi to modyfikacja złożona [23]. Modyfikacja prosta polega na jednostopniowym wprowadzaniu nanomodyfikatorów do mieszanki betonowej, a modyfikacja złożona jest wielostopniowym procesem. Dobrym przykładem jest modyfikacja przeprowadzona przez Soboleva z Uniwersytetu w Meksyku. Dodał on

domieszkę Gaia opartą na 1,3% nanokrzemionki, w efekcie otrzymując beton o trzykrotnie większej wytrzymałości po 24 godzinach, w porównaniu do betonu świadkowego. Wytrzymałość po 7 i 28 dniach była natomiast wyższa dwukrotnie. Jest to dobry przykład skutecznej modyfikacji jednostopniowej. Wyniki zostały przedstawione na poniższym wykresie (Rys. 24) [19, 23].



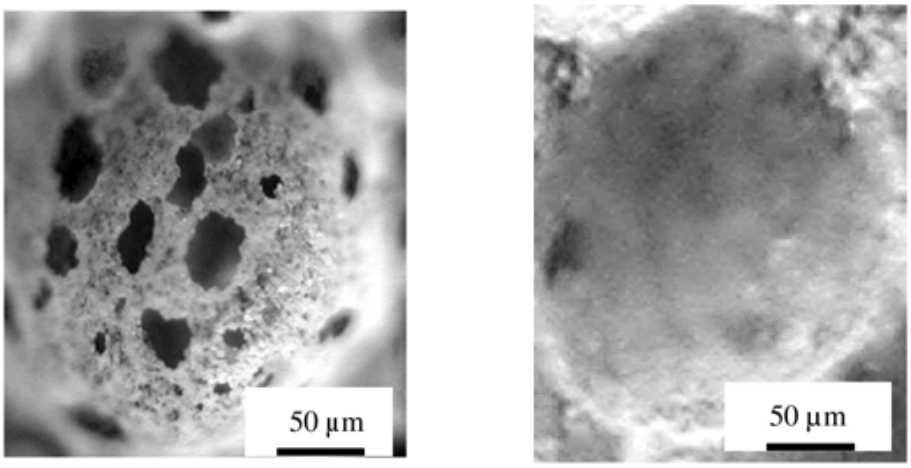

Rys. 24. Zmiana wytrzymałości na ściskanie po dodaniu superplastyfikatora Gaia [19].

Znaczny, bo 40% wzrost wytrzymałości na ściskanie betonu uzyskano także poprzez modyfikację nanocząsteczkami krzemu. Zastosowano cement CEM I 32,5 [23].

Bardzo dobre efekty daje również modyfikacja mieszanki betonowej substancją zawierającą nanorurki. W badaniach użyto substancji o gęstości 0,086 g/cm$^3$, która zawierała nanorurki o średnicy od 40 do 60 nm wypełnione miedzią i cementu o gęstości 3,5 g/cm$^3$. Domieszkę wprowadzono do cementu w ilości 0,05% początkowej masy. Wyniki, które uzyskano podczas badań wytrzymałościowych betonu modyfikowanego i niemodyfikowanego były bardzo dobre:

- nastąpiło niewielkie zmniejszenie gęstości cementu z domieszką (z 330 kg/m$^3$ na 309 kg/m$^3$),
- wytrzymałość na ściskanie zwiększyła się o 70%,
- współczynnik przewodnictwa cieplnego zmniejszył się o 20%.

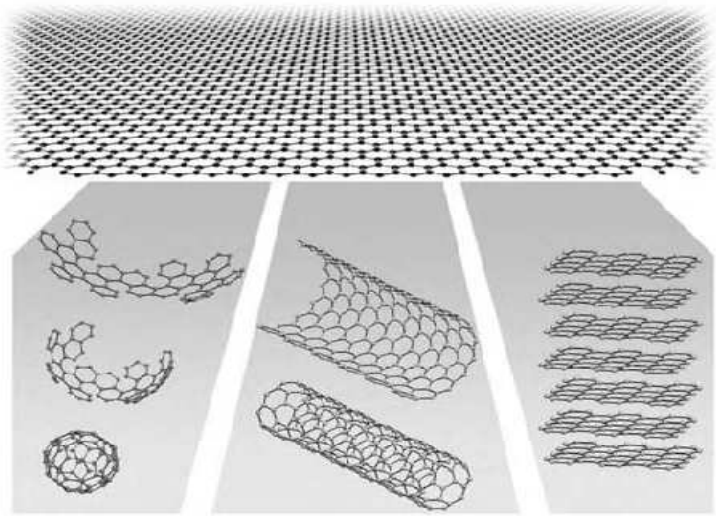
Uzyskane tak pozytywnych efektów było możliwe dzięki temu, że dodanie domieszki z nanorurkami zmieniło strukturę betonu. Beton zmodyfikowany odznaczał się bardziej jednolitą strukturą od betonu zwykłego. Różnice można zaobserwować na zamieszczonych fotografiach (Rys. 25) [19].




Rys. 25. Struktura badanego cementu portlandzkiego: po lewej próbka bez modyfikacji, po prawej z dodatkiem nanorurek [25].

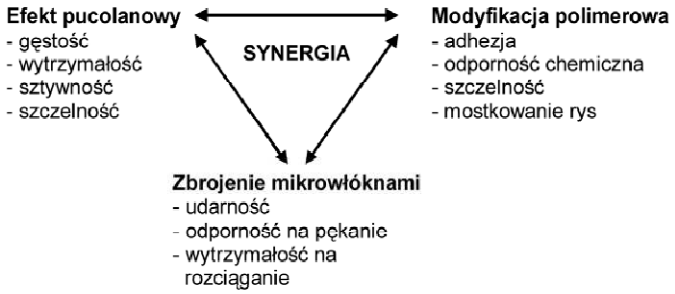
Modyfikowanie betonu nanorurkami ma jednak swoje wady. Przede wszystkim nanorurki są wciąż bardzo drogie, a w związku z tym produkcja betonu nawet z bardzo niewielką domieszką byłaby kosztowna. Utrudnieniem jest też tendencja nanorurek do zbrylania się i ich niewielka przyczepność do stwardniałego zaczynu cementowego [4].

Lepsze perspektywy są przed modyfikacjami bazującymi na siatkach grafenowych. Grafeny nie tworzą bowiem aglomeratów, w przeciwieństwie do nanorurek, a metoda ich otrzymywania jest bardzo prosta i polega na zdzieraniu plastrem samoprzylepnym (Rys. 26). Właściwości grafenu czynią go znakomitym dodatkiem do betonu – wysoka wytrzymałość mechaniczna i nieprzepuszczalność, również dla wodoru [4].



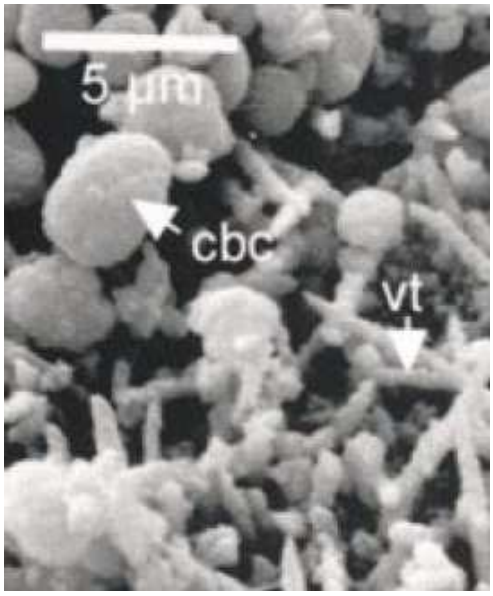
Rys. 26. Siatki grafenowe [4].

Nanomodyfikacja złożona ma przynajmniej dwa etapy. Celem pierwszego jest uzyskanie nanokompozytu i rozprowadzenie go w mieszance betonowej. Stosując tę nanomodyfikację, oczekuje się efektów synergicznych (rys. 27), związanych z łączeniem łańcuchem polimeru rozproszonych elementów – czy są to płytki montmorylonitu będące źródłami reakcji pucolanowej, czy też pełniące rolę swoistego zbrojenia rozproszonego nanorurki – cel jest podobny [4].



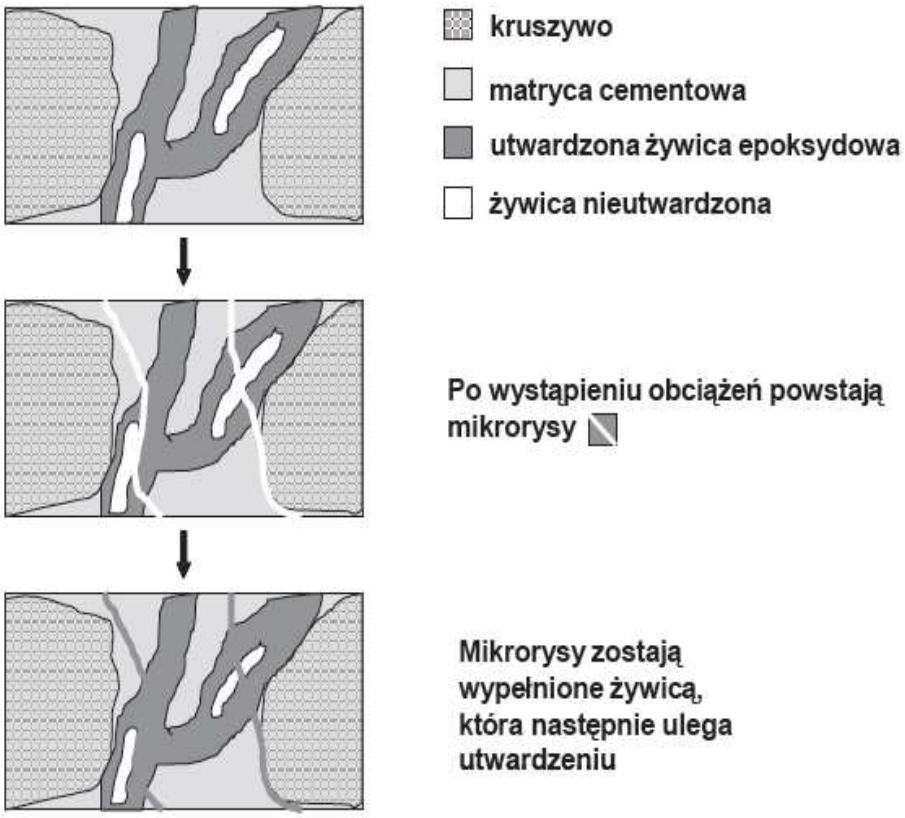

Rys. 27. Koncepcja modyfikacji: poszukiwanie synergii [4].

Stosując nanorurki węglowe, technolodzy chcą uzyskać beton samozagęszczalny o ultra wysokiej wytrzymałości i trwałości. Innym interesującym nanomodyfikatorem są dodatki vivo-aktywne, np. bakterie *baccillius pasteurii.* Kiedy znajdą się one w rysie, wywołują wytrącanie się węglanu wapnia i likwidację powstałej wady betonu (Rys. 28) [26].




Rys. 28. Komórki bakterii *baccillius pasteurii* (cbc) w strukturze betonu [26].

Ciekawa jest także koncepcja betonu epoxy-cementowego samonaprawialnego wg Y. Ohamy i jego współpracowników. Opracowali oni mieszankę betonową z mikrokapsułkami wypełnionymi żywicą epoksydową. Dzięki tej modyfikacji podczas intensywnego mieszania rozprowadzana jest żywica epoksydowa. Kiedy następuje zarysowanie, żywica zostaje uwolniona z mikrokapsułek, przez zetknięcie z powierzchniami powstałej rysy utwardza się w alkalicznym środowisku, sklejając tym samym rysy. Przebieg samonaprawy został przedstawiony na rys. 29 [26].




Rys. 29. Mechanizm samonaprawiania betonu epoxy-cementowego wg Y. Ohamy [26].

Zdolność do naprawiania rys mają także betony polimerowo-cementowe. W betonach tych występuje mostkujący efekt oddziaływania polimeru, dzięki któremu rysy zostają wypełnione. Ponieważ polimery są najdroższym składnikiem tego typu betonów, to kładzie się szczególny nacisk na racjonalne ich rozmieszczenie w betonie. W związku z tym prowadzony jest tzw. nanomonitoring [26].

Nanobetony wciąż są jeszcze w fazie intensywnych badań, nad możliwością ich masowego wykorzystywania w przemyśle budowlanym. Efekty, a co za tym idzie również perspektywy, są bardzo obiecujące. Ważna będzie jednak możliwie maksymalna redukcja kosztów ich wytwarzania.

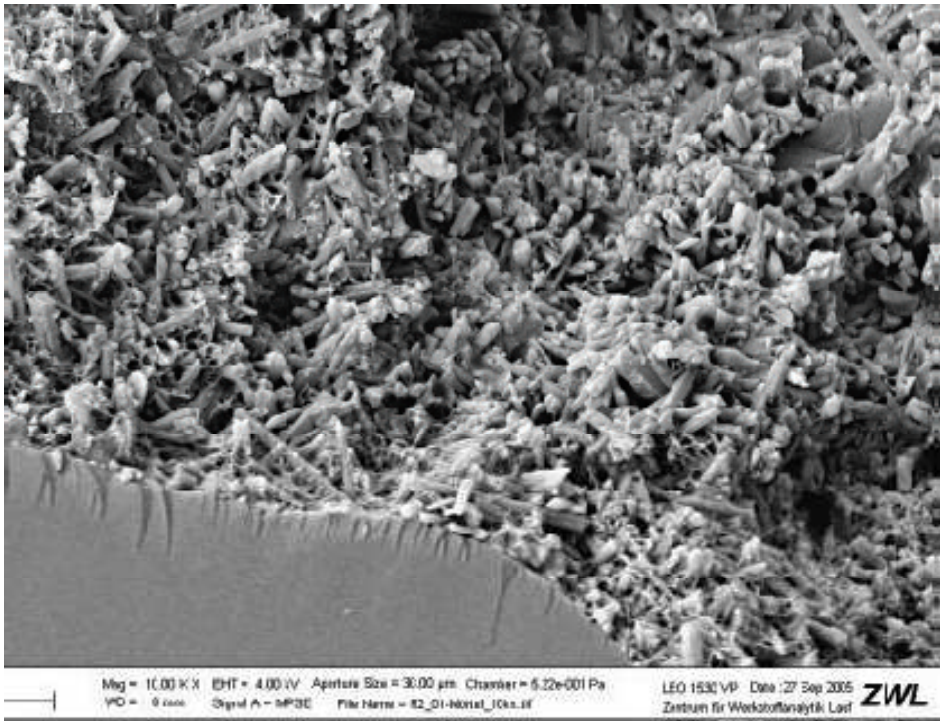
## 3.4. Zaprawy naprawcze i nanokleje

Nanotechnologia przyniosła ze sobą także spory postęp, jeśli chodzi o zaprawy naprawcze i kleje. Ponowne zbadanie procesów w nanoskali pozwoliło znaleźć nowe rozwiązania. Poprawa właściwości była podobna do tej, jaka miała miejsce w przypadku modyfikowanych mieszanek betonowych.

Dzięki nanotechnologii, możliwe stało się wprowadzenie jednowarstwowych, gotowych zapraw naprawczych nawet o grubości do 10 cm. Poprzez dodanie nieorganicznych domieszek do zapraw uzyskano znacznie lepsze parametry techniczne:

- lepsza przyczepność,
- lepsza gęstość i nieprzepuszczalność,
- mniejszy skurcz,
- większa wytrzymałość na rozciąganie, a w związku z tym mniejsza skłonność do zarysowań,
- lepsza kompatybilność z betonem,
- lepsza tiksotropowość,
- łatwiejsze i szybsze nakładanie i wykańczanie.

Nanotechnologia pozwoliła też znacznie lepiej zrozumieć hydratację betonu, a to dało możliwość podniesienia jakości i gęstości nanostruktur w zaczynie cementowym (Rys. 30). Dzięki temu zwiększyła się przyczepność kruszywa do zaczynu cementowego oraz zaprawy cementowej do podłoża. Ponieważ nanomodyfikacje zapraw zwiększyły wytrzymałość na rozciąganie, ryzyko powstania rys zostało zminimalizowane [27].

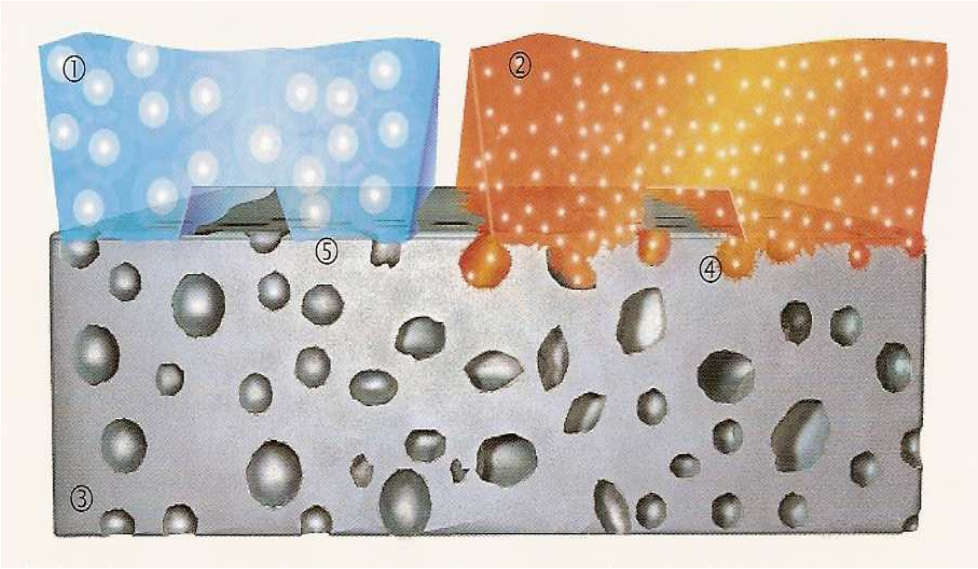



Rys. 30. Nanostruktury zaczynu cementowego [27].

Modyfikacje nanotechnologiczne klejów mineralnych spowodowały zdecydowaną poprawę właściwości zapraw klejowych. Jedną z firm, które wprowadziły tego typu produkty do swojej oferty, jest BASF. Połączenie lekkich wypełniaczy oraz spoiw uszlachetniających tworzących nanostruktury sprawia, że nanokleje mineralne znacznie lepiej wiążą podłoże z okładziną. Najważniejsze zalety zapraw klejowych to:

- wysoka wydajność,
- plastyczność i łatwość formowalna,
- natychmiastowe bezskurczowe wiązanie,
- wysoka stabilność,
- znikome pylenie podczas przygotowywania zaprawy,
- niska emisyjność zaprawy,
- odkształcalność, dzięki której kompensowane są naprężenia wynikające z wahań temperatury.

Schemat wiązania zaprawy z nanomodyfikacjami w porównaniu z zaprawą tradycyjna został przedstawiony na rys. 31.

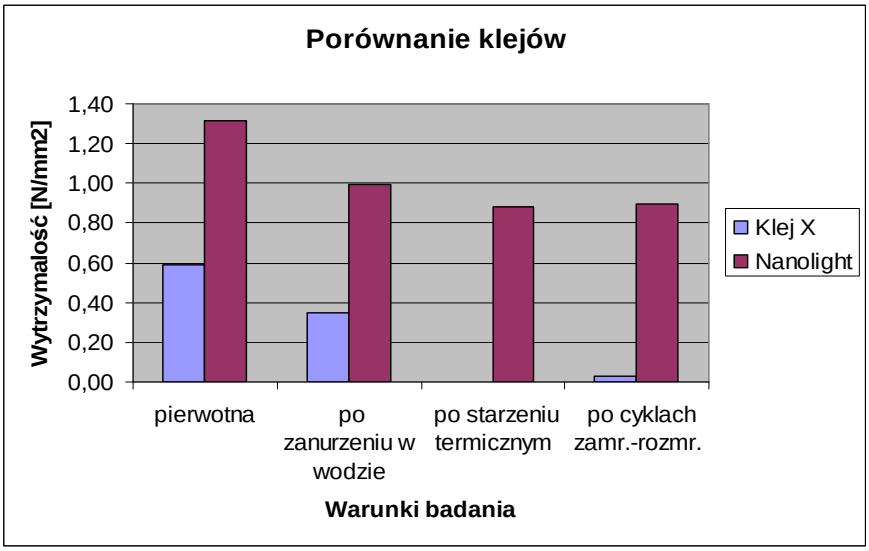



1 – duże cząsteczki zwykłej zaprawy
2 – bardzo małe cząsteczki zaprawy na bazie nanotechnologii
3 – ścianki płytki
4 – zazębianie się nanocząsteczek zaprawy w porach podłoża płytki
5 – brak zakleszczania się cząsteczek zaprawy w porach płytki

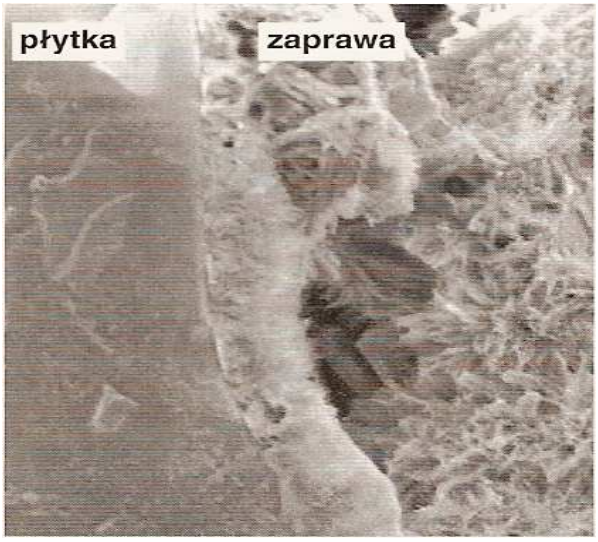
Rys. 31. Porównanie procesów wiązania zaprawy tradycyjnej (po lewej) i zaprawy na bazie nenotechnologii (po prawej).

Elastyczne zaprawy klejowe do okładzin ceramicznych mogą być układane jako cienko- i średniowarstwowe, a warstwa zaprawy może wynosić do 15 mm. Można je stosować do każdego rodzaju podłoża od jastrychu cementowego, przez beton, płyty izolacyjne, po podłoża metalowe, drewniane i PCV.

Badania wytrzymałości dowodzą, że nanokleje zdecydowanie dłużej utrzymują swoje właściwości, a ponadto są bardziej odporne na trudne warunki, w których muszą pracować. Na poniższym wykresie (Rys. 32) przedstawione zostały wyniki badania wytrzymałości zapraw klejowych: tradycyjnej i zaprawy Nanolight firmy BASF. Wyniki zestawiono w zależności od warunków badania. Na Rys. 33 zobrazowane natomiast zostało łączenie się małych cząsteczek hydratu wapniowo-krzemianowego, które wpływa na polepszenie przyczepności.




Rys. 32. Wyniki badania wytrzymałości zapraw klejowych: tradycyjnej i zaprawy Nanolight, w zależności od warunków badania.

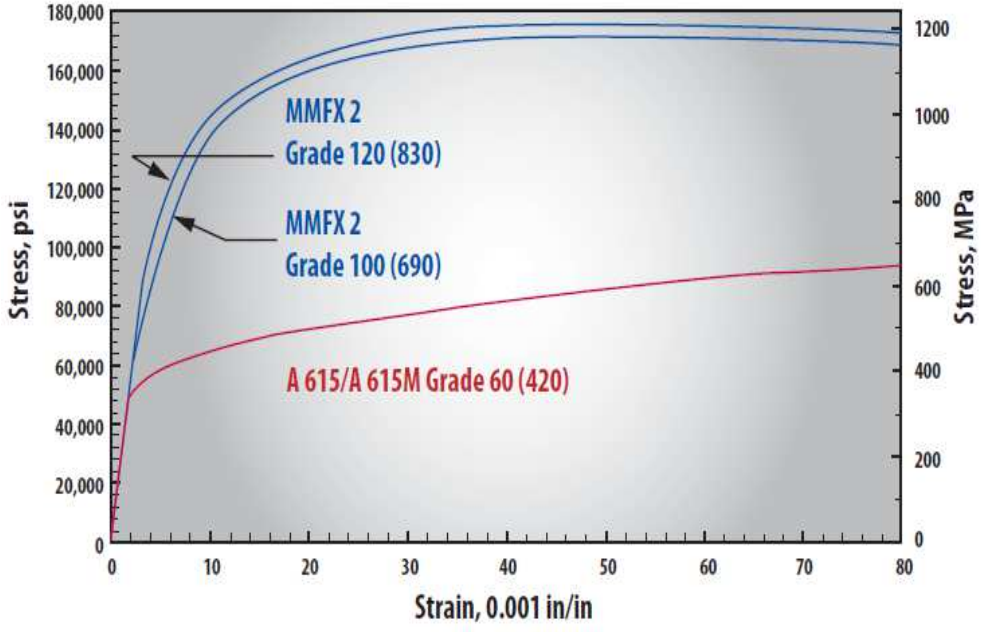



Rys. 33. Łączenie cząstek hydratu wapniowo-krzemianowego.

## 3.5. Nanometale

W punkcie 3.2. poruszone zostały kwestie powłok nanotechnologicznych, dzięki którym elementy stalowe i aluminiowe zyskują właściwości hydrofobowe i zdolność samooczyszczania.

Nanotechnologia pozwala jednak modyfikować także samą stal, a uzyskiwany w ten sposób wzrost wytrzymałości jest znaczący. Takie rozwiązania na rynek wprowadziła amerykańska firma MMFX Steel Corp. Stal tego producenta ma lepsze właściwości mechaniczne niż inne stale wysokowytrzymałościowe: wyższa jest wytrzymałość na rozciąganie, ciągliwość oraz wytrzymałość zmęczeniowa. Porównanie wytrzymałości stali firmy MMFX oraz stali A615/A615M Grade 60 (420) zostało przedstawione w formie wykresów zależności naprężenie-odkształcenie na Rys. 34 [29].



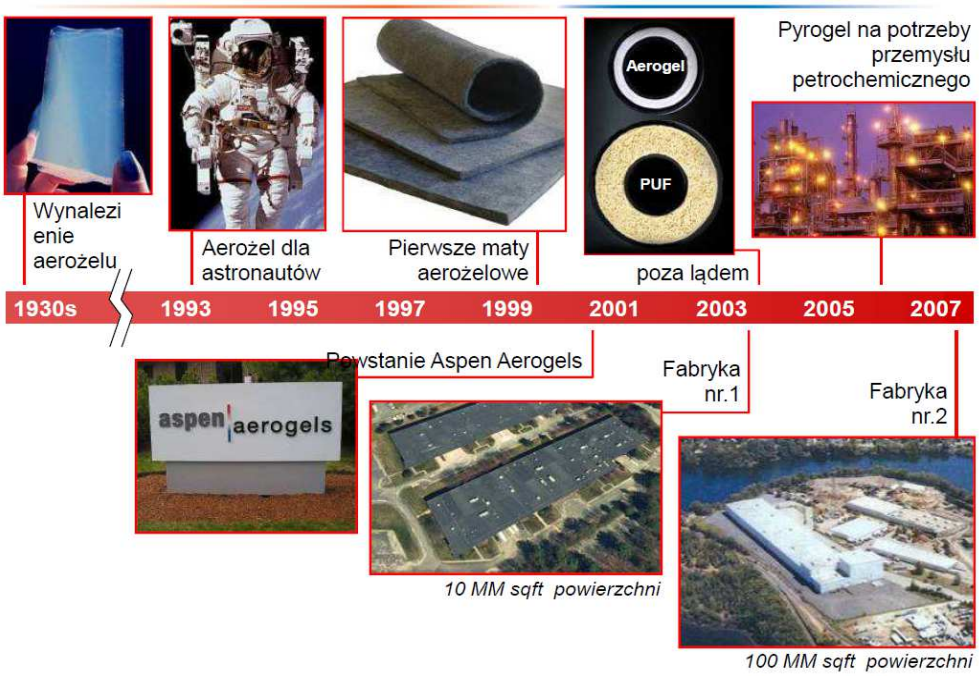

oś pionowa – naprężenia w MPa (prawa strona wykresu)
oś pozioma – odkształcenia w 0.001 cala/cal

Rys. 34. Wykresy zależności naprężeń i odkształceń dla stali firmy MMFX oraz typowej stali A615/A615M Grade 60 (420) [29].

Oprócz zdecydowanego polepszenia właściwości mechanicznych, stal ta charakteryzuje się odpornością na korozje na zbliżonym poziomie do stali nierdzewnej, ale przy tym jest znacznie tańsza.

## 3.6. Aerożele

Wchodzący powoli na rynek materiałów budowlanych aerożel został otrzymana po raz pierwszy już w 1931 roku. Najpierw jednak jego zalety zostały wykorzystane do budowy statków kosmicznych czy warstw izolacyjnych kombinezonów kosmonautów. Proces rozwoju produktów z użyciem aerożelu został zobrazowany na Rys. 35. Dziś aerożel, choć wciąż jeszcze drogi, jest spotykany coraz częściej w bardziej powszechnych zastosowaniach [30, 31].




Rys. 35. Proces rozpowszechniania technologii z wykorzystaniem aerożelu [30].

Aerożel jest to materiał otwartokomórkowy o bardzo małej gęstości. Wytwarzany jest poprzez usunięcie płynnego składnika z żelu, dzięki zastosowaniu temperatury i ciśnienia wyższego od punktu krytycznego składnika płynnego. W trakcie tego procesu (ekstrakcji składnika płynnego), eliminowane są silne siły kapilarne powstające na powierzchni międzyfazowej ciecz-gaz. Wynika to z tego, że obecna jest tylko jedna faza nadkrytyczna. W związku z tym żel kurczy się tylko nieznacznie lub wcale nie zmniejsza swojej objętości. Temu zjawisku zawdzięczamy fakt, że aerożel zachowuje strukturę żelu i może charakteryzować się takimi właściwościami, jak [32]:

- bardzo mała gęstość na poziomie 0,004 g/cm$^3$,
- duże powierzchnie właściwe rzędu 1500 m$^2$/g,
- bardzo wysoka porowatość – 85% lub wyższa,
- stosunkowo duża liczba porów.

Jeżeli połączy się te wszystkie właściwości w strukturę amorficzną, to uzyskamy materiał o najniższych wartościach przewodności cieplnej spośród wszystkich materiałów stałych (Rys. 36).

Rys. 36. Materiał izolacyjny z aerożelu.

Mikrostruktura aerożeli (pory mają średnio od 2nm do 50 nm) sprawia, że są one również znakomitym izolatorem akustycznym – prędkość rozchodzenia się fal dźwiękowych jest bardzo niska [32].

Można wyróżnić dwa podstawowe rodzaje aerożeli: organiczne oraz nieorganiczne. Do grupy organicznych zaliczamy aerożele: uretanowe, poliizocyjanianowe, rezorcynowo-formaldehydowe, poliolefinowe. Natomiast wśród nieorganicznych, wytwarzanych z alkoholanów najbardziej pospolity jest aerożel krzemionkowy. Istnieje jeszcze trzecia grupa – aerożele hybrydowe [32].

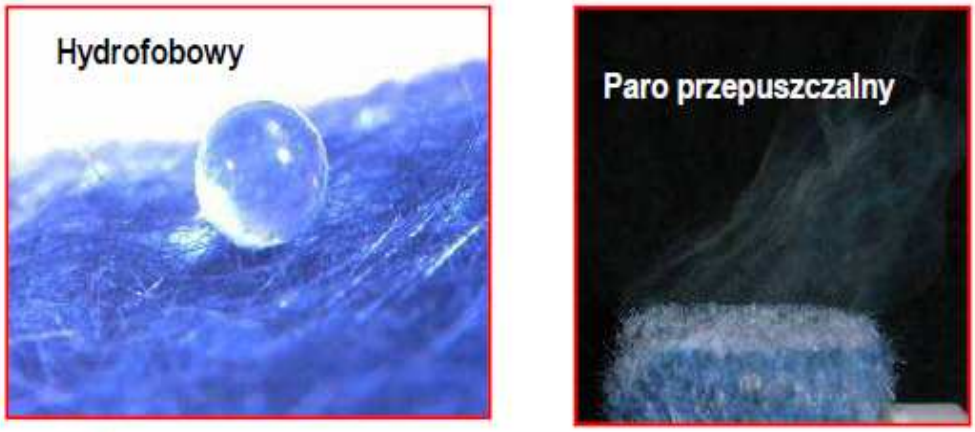
Innym kryterium podziału aerożeli może być ich właściwość masowa. Pod tym względem można je podzielić na: monolityczne, kulkowe, cząsteczkowe, granulowe, proszkowe, powłokowe i cienkowarstwowe. Ze względu na cechy fizyczne, najczęściej używanymi w budownictwie są aerożele monolityczne. Tworzone z nich maty aerożelowe

stosowane jako materiał termoizolacyjny są często wzmacniane włóknem szklanym. Dzięki tej prostej modyfikacji stają się giętkie, nie tracąc przy tym pozostałych, korzystnych właściwości [32, 33].

Ważną właściwością produktów na bazie aerożelu jest wysoka wytrzymałość na działanie skrajnych temperatur. Mogą one pracować bez utraty swoich właściwości w temperaturze 550-650°C. Dopiero powyżej 800°C w aerożelach krzemionkowych zachodzi proces spiekania i następuje szybka utrata właściwości powierzchniowych i izolacyjnych [32].

Dziś produkowane maty izolacyjne na bazie aerożelu charakteryzują się współczynnikiem przenikania ciepła U na poziomie 0,014 $W/m^2K$. To pozwala, zakładając ścianę nośną z bloczków o grubości 215 mm ze współczynnikiem przenikania ciepła U = 0,45 $W/m^2K$, osiągnąć wartość współczynnika przenikania ciepła dla całej ściany U = 0,16 $W/m^2K$, już przy warstwie izolacji termicznej grubości 80 mm. Można dzięki temu zaoszczędzić trochę miejsca oraz łatwiej zlikwidować mostki termiczne, zwłaszcza biorąc pod uwagę giętkość mat na bazie aerożelu, wzmocnionych włóknem szklanym [30].

Cenną właściwością mikrostruktury aerożelu jest hydrofobowość, przy jednoczesnym przepuszczaniu pary wodnej, co zostało zobrazowane na poniższym rysunku (Rys. 37).

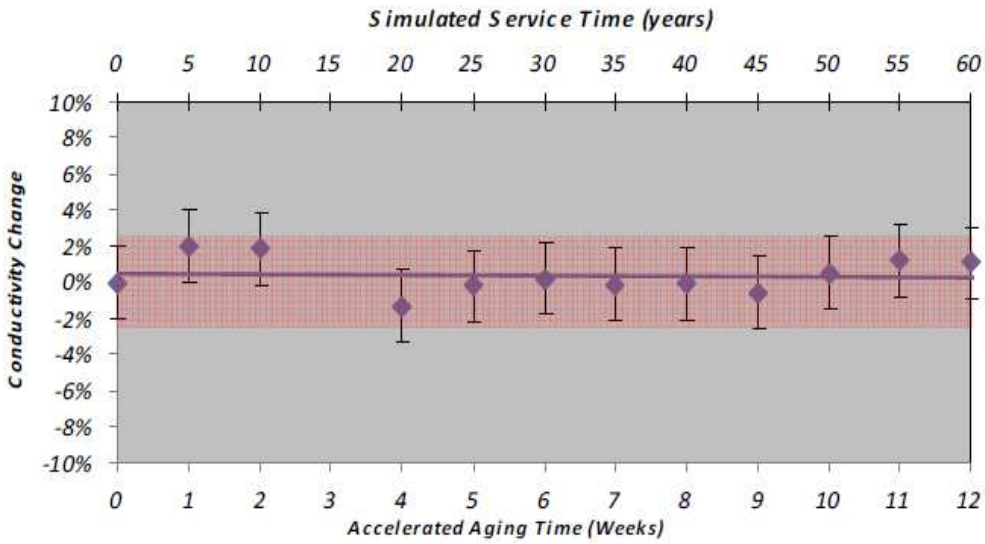



Rys. 37. Mikrostruktura aerożelu – hydrofobowa i jednocześnie paroprzepuszczalna [30].

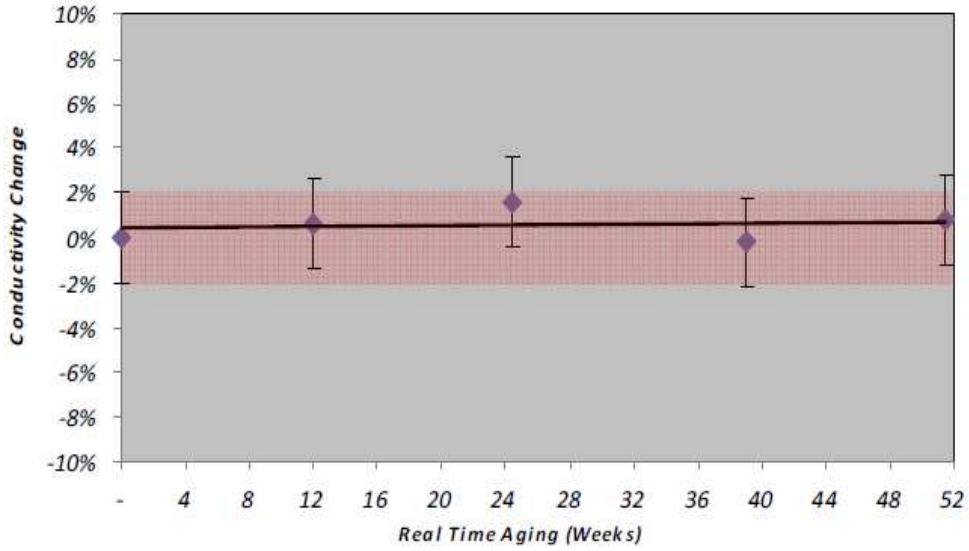
Kolejnym atutem materiałów izolacyjnych z wykorzystaniem aerożelu jest niezmienność wydajności na przestrzeni wielu lat użytkowania. Badania przeprowadzone w celu sprawdzenia, jakie będą efekty starzenia się nanoporowatych produktów, pokazały, iż upływ lat praktycznie nie zmienia właściwości tych materiałów. Przyśpieszony proces starzenia w temperaturze 90°C przez 12 tygodni, mający symulować 60 lat w temperaturze 10°C, nie przyniósł żadnych zmian właściwości (Rys. 38). Podobne efekty dała próba przez 52 tygodnie w normalnych warunkach otoczenia (Rys. 39) [30].

Tylko koszty stosowania nowoczesnych nanoporowatych materiałów izolacyjnych hamują jeszcze ich rozpowszechnienie na rynku materiałów budowlanych. Wydaje się jednak, że nieunikniona jest ekspansja tego typu produktów w najbliższych latach. Trwają bowiem prace nad obniżeniem kosztów produkcji nanoporowatych izolacji, a ponieważ

właściwościami przewyższają one wszelkie dostępne rozwiązania, z pewnością z czasem staną się poważną alternatywą dla produktów dziś dominujących na rynku.



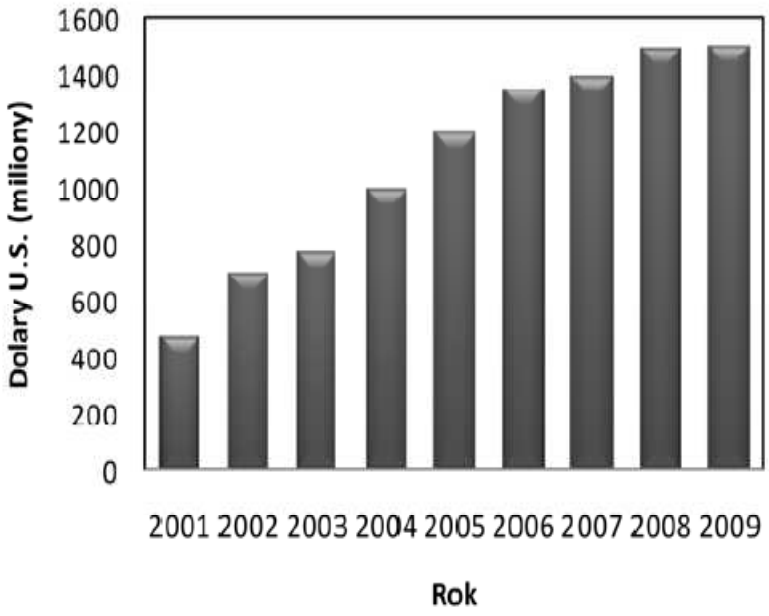

Rys. 38. Zmiany właściwości izolacji Porogel Medium Spaceloft – przyśpieszony proces starzenia, przez 12 tygodni w temperaturze 90°C [30].




Rys. 39. Zmiany właściwości izolacji Porogel Medium Spaceloft – naturalny proces starzenia w normalnej temperaturze przez 52 tygodnie [30].

## 4. Nanotechnologia na świecie oraz jej perspektywy

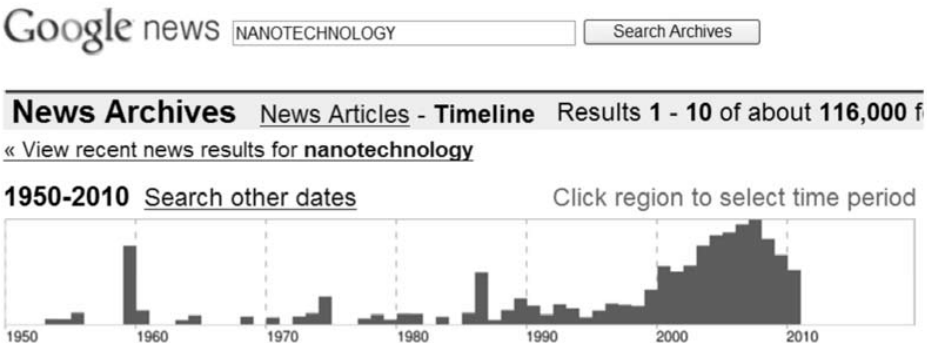
Nanotechnologia jest coraz częściej i głośniej przedstawiana, jako ta dziedzina nauki, która ma przed sobą nieograniczone perspektywy. Idą za tym rozumowaniem zresztą konkretne kroki, w postaci ciągle rosnącego strumienia funduszy przeznaczonych na jej rozwój. W Europe rocznie przeznacza się ponad 2 biliony euro na rozwój nanotechnologii, natomiast w Stanach Zjednoczonych ostatnio 1,5 biliona dolarów. Na przykładzie USA widać zresztą doskonale, jak te nakłady z roku na rok rosły. Tempo tego wzrostu zostało co prawda trochę przystopowane przez kryzys, co widać na poniższym wykresie (Rys. 40), ale trend nie uległ zmianie.




Rys. 40. Fundusz National Nanotechnology Initiative w USA, w latach 2001-2009 [4].

Nie tylko Europa i Stany zjednoczone widzą potrzebę rozwoju nanotechnologii. Duże nakłady są także robione w innych częściach świata, zwłaszcza w krajach rozwijających się. W Brazylii na ten cel przeznacza się 5 mln dolarów rocznie, podobną sumę w Indiach. Sporym zaangażowaniem wykazują się także Tajlandia, Filipiny, Chile czy Argentyna. Warto odnotować, że Chiny już dziś zajmują trzecie miejsce po USA i Japonii, jeśli chodzi o liczbę rejestrowanych patentów z dziedziny nano [4].

Dane archiwalne Google uwidaczniają, że od roku 1950 do 2010, zdecydowanie największy wzrost ilości informacji związanych z nanotechnologią przypada właśnie na pierwsze dziesięciolecie XXI wieku. Wcześniej tylko po sławnym odczycie Feynmana z roku 1959 nastąpił widoczny wzrost. Dane to zostały zilustrowane na Rys. 41 [4].




Rys. 41. Strumień informacji nanotechnologii w okresie 1950-2010 na podstawi danych archiwalnych Google [4].

Niestety jak na razie, ani wzrost informacji na temat nanotechnologii, ani znaczne fundusze przeznaczane na jej rozwój nie sprawiły, by budownictwo zaczęło z tego odpowiednio korzystać. Wprowadzone już na rynek rozwiązania materiałowe są bardzo skromne, w porównaniu chociażby z medycyną i elektroniką. Widząc jednak jakie pomysły rodzą się w głowach i jakie cele stawiają sobie naukowcy, można być umiarkowanym optymistą. Jednym z ciekawszych są badania nad inteligentnymi materiałami, takimi farby zmieniające kolor pod wpływem temperatury lub w reakcji na polecenia głosowe. Inną koncepcją jest stworzenie mostu, który dostosowywałby się do warunków atmosferycznych. Perspektywy są widoczne.

## 5. Podsumowanie

Nie jest trudno udowodnić, że to właśnie rozwój nanotechnologii ma szansę naznaczyć nową epokę. Pokłady możliwości jakie drzemią w inżynierii kreującej rozwiązania, rozpatrując problemy w skali nano, są ogromne. Nic też dziwnego, że Czarnecki [4, 9] zwraca uwagę na potrzebę propagowania nanotechnologii i konieczność wychodzenia z inicjatywą jej rozwijania. Pewien odzew jest widoczny, gdyż kierunki studiów związane z nanotechnogią i nanoinżynierią są brane pod uwagę w rządowym programie studiów zamawianych. Podejmowanie takich kroków jest niezbędne, gdyż bez odpowiedniej kadry naukowej nie ma co liczyć na znaczący postęp.

Nanotechnologia otwiera możliwości modyfikowania i ulepszania produktów oraz procesów wykorzystywanych w budownictwie, tworzenia nowych materiałów i rozwiązań, o których teraz nikt nawet nie marzy. W dalszej perspektywie rozwijania technologii ograniczenia zanieczyszczeń i udziału szkodliwych dla zdrowia czynników. Przedstawione w referacie już istniejące produkty to dopiero początek rewolucji. Stale rosnące ceny energii i zasobów nieodnawialnych, przy jednocześnie coraz większym na nie zapotrzebowaniu, wymuszają poszukiwanie bardziej efektywnych rozwiązań. Zmiany w przemyśle budowlanym muszą zatem następować, a właśnie nanotechnologia jest w stanie je znacząco przyśpieszyć.

## Piśmiennictwo


[1] GENNESYS – International Congress on Nanotechnology and Research Infrastructures: GENNESYS White Book (Dosch H., Van de Voorde M.H. eds.). Max-Planck Institute for Metals Research, Stuttgart, 2010.

[2] Schulenburg M., Broszura Komisji Europejskiej: *Nanotechnologia. Innowacja dla świata przyszłości.* Luksemburg: Urząd Oficjalnych Publikacji Wspólnot Europejskich, 2007.

[3] Bhushan B. (pod red.): *Springer Handbook of Nanotechnology*, Springer – Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.

[4] Czarnecki L.: *Nanotechnologia w budownictwie*, Przegląd Budowlany, 2011, 1, s. 40-53.

[5] Huczko A.: Fulereny i nanorurki, ACADEMIA, 2006, 6, s. 16-19.

[6] Komunikat Komisji Wspólnot Europejskich: *Ku europejskiej strategii dla nanotechnologii*, Bruksela, 12.05.2004.

[7] Barthlott W., Neinhuis C.: *Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces*, Planta (1997) 202:1-8.

[8] Gao H., Wang X., Yao H., Gorb S. and Arzt E., *Mechanics of hierarchical adhesion structure of gecko*, 2005, Mechanics of Materials, Vol. 37(2-3), s. 275-285.

[9] Czarnecki L.: *Nanotechnologia – wyzwaniem inżynierii materiałów budowlanych*. Inżynieria i Budownictwo, 2006, 9, s. 465–469.

[10] Bartos P. J. M., *Nanotechnology in construction: a roadmap for development*. In "Nanotechnology in Construction 3", Springer, Berlin – Heidelberg, 2009.

[11] Ilski M., Błaszczyński T.: *Hydrofobizacja wgłębna*, Materiały Budowlane, 2011, 2, s.18-19.

[12] Kamiński M., Jasiczak J., Buczkowski W., Błaszczyński T.: *Trwałe Rozwiązania Naprawcze w Obiektach Budowlanych*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2010.

[13] Publikacja firmy WACKER.: *Ochrona betonu z wieloma zaletami*, Materiały Budowlane, Monachium 2010 [Wacker.com].

[14] Broszura firmy Sto: *Powłoki elewacyjne z efektem lotosu*, Warszawa [Sto.pl].

[15] Serwis Nanopac.pl: *Możliwości zastosowań powłok fotokatalicznych z* $TiO_2$, [Nanopac.pl/podstrona_pl.php?link=nanotechnologia&t1=zastosowanie_powlok_tio2].

[16] Benedix R., Dehn F., Quaas J., Orgass M.: *Application of Titanium Dioxide Photocatalysis to Create Self-Cleaning Materials*, Lacer, nr 5, 2005.

[17] Hashimoto K., Irie H., Jujishima A.: *$TiO_2$ Photocatalysis: A Historical Overview and Future Prospects*, Japanese Journal of Applied Physics, 2005, 12, s. 8269-8285.

[18] Broszura firmy Arcelor Mittal: *Arval – Hairclyn* [Arcelormittal.com].

[19] Błaszczyński T.: *Betonowe Cuda*, referat w ramach XXV Ogólnopolskich Warsztatów Pracy Projektanta Konstrukcji, 10-13 marca 2010, Szczyrk.

[20] Barbesta M., Schaffer D.: Concrete that Cleans Itself and the Air, Concrete International, 2009, 2, s. 32-33.

[21] Strona internetowa firmy Pikington [Pikington.com].

[22] Strona internetowa firmy Nanopac [Nanopac.com].

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

[24] 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.

[25] Burzyńska K.: *Beton w budownictwie zrównoważonym*. Builder, Nr 11/2008, s. 43-46.

[26] Czarnecki L., Kurdowski W.: *Tendencje kształtujące przyszłość betonu*, referat, Dni Betonu 2006.

[27] Podręcznik firmy EMACO: *Nanotechnologia do prostej i skutecznej naprawy betonu*, [Chemolak.pl]

[28] Strona internetowa firmy BASF [Basf-cc.pl]

[29] Strona internetowa firmy MMFX Steel Corp. [Mmfx.com]

[30] Prezentacja Aerogels Poland Nanotechnology: *Aspen Aerogels*

[31] Publikacja Lawrence Berkley Laboratories: Microstructured Materials Group: *Silica Aerogels.*

[32] Aspen Aerogels/Aerogels Poland Nanotechnology: *Aerożel*, Builder, 2010, 7, s. 58-60.