

NANOTECHNOLOGIA W BUDOWNICTWIE – PRZEGLĄD ZASTOSOWAŃ

Natalia STANKIEWICZ, Małgorzata LELUSZ*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W artykule opisano wykorzystanie nanotechnologii w produkcji materiałów i wyrobów budowlanych. Stosuje się głównie nanoproducty (na przykład aerozele) oraz modyfikuje znane materiały za pomocą nanocząsteczek. Nanorurki węglowe są jednym z nanomateriałów, który ma zastosowanie w kompozytach o matrycy cementowej. Istotnym problemem okazało się równomierne rozmieszczenie nanododatku w masie kompozytu ze względu na jego tendencję do agregacji. W Politechnice Białostockiej prowadzone są badania nad zastosowaniem nanorurek węglowych w kompozytach o matrycy cementowej oraz nad znalezieniem metody ich równomiernej dyspersji w materiale. W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych wpływu nanocząsteczek na wytrzymałość zapraw. Niewielka ilość dodatku nanorurek węglowych spowodowała wzrost zarówno wytrzymałości na zginanie, jak i na ściskanie badanych zapraw.

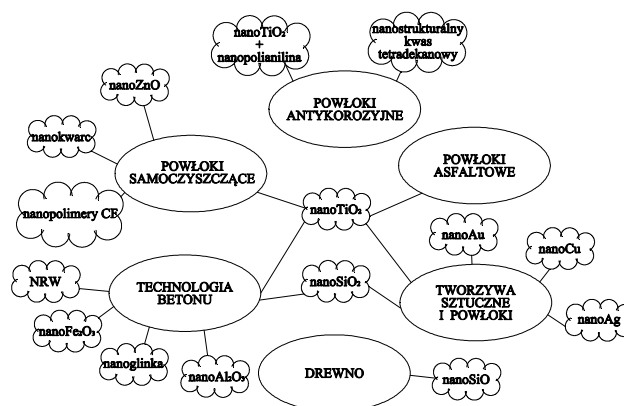
Słowa kluczowe: nanotechnologia, nanomateriały, nanomodyfikacje, nanoproducty.

1. Wprowadzenie

Nanotechnologia to obecnie bardzo szybko rozwijający się obszar nauki. Opiera się ona głównie na fizyce, chemii, inżynierii oraz biologii, przez co ma szerokie zastosowanie w medycynie, mikroelektronice, technologii obrazującej czy inżynierii materiałowej. Wyjątkowe właściwości nanomateriałów oraz ich potencjał aplikacyjny powodują duże zainteresowanie tymi produktami. Jedną z dziedzin, która wykorzystuje osiągnięcia tej nowoczesnej technologii jest budownictwo. W ostatnich latach stosowanie nanomateriałów lub nanomodyfikacji stało się bardzo popularne. Nie tylko odkryto nowe materiały, czego przykładem są nanorurki węglowe, ale również modyfikuje się tradycyjne, dobrze znane materiały, takie jak stal czy beton.

Nanotechnologia obejmuje projektowanie, tworzenie oraz wykorzystywanie materiałów mających przynajmniej jeden wymiar, którego naturalną jednostką miary jest nanometr. Jeśli któryś z wymiarów struktury mieści się w przedziale od 1 do 100 nm, czyli znajduje się w zakresie, w którym granice z jednej strony wyznaczają odległości typowe dla pojedynczych atomów (10^{-9} m), z drugiej natomiast te spotykane w ciele stałym (10^{-7} m), materiał może wykazywać cechy wyraźnie odbiegające od cech pojedynczych atomów oraz typowych kryształów. Materiały o takiej strukturze można tak zaprojektować, aby przejawiały przydatne właściwości chemiczne, fizyczne lub biologiczne dzięki ograniczonym wymiarom tworzących je cząstek. Przy wykorzystaniu nano-

technologii mogą powstawać materiały o nietypowych właściwościach (Kellsall i in., 2009). W tabeli 1 zestawiono potencjalne zastosowania nanocząsteczek i nanoproductów w budownictwie. Nanocząstki to struktury ograniczone w trzech wymiarach w skali nano. Zastosowania nanocząsteczek w budownictwie przedstawiono na rysunku 1. Nanoproducty to tworzywa, które powstają przy wykorzystaniu nanotechnologii i nie muszą zawierać nanocząsteczek, mogą jednak posiadać nanostrukturę. Przykładem są nanopory w aerozelach (van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009; Kellsall i in., 2009).



Rys. 1. Zastosowania nanocząsteczek w budownictwie

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: m.lelus@pb.edu.pl

Tab. 1. Zestawienie potencjalnych zastosowań nanocząsteczek i nanoproductów w budownictwie

Nanomateriały	Zastosowanie w budownictwie	Źródło
Dwutlenek tytanu (TiO ₂)	Powłoki antybakteryjne	(van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009)
	Powłoki zabezpieczające przed promieniowaniem UV	(van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009)
	Powłoki fotokatalityczne	(van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009; www.titanium-tech.pl)
	Farby samoczyszczące	(www.titanium-tech.pl; www.taniachata.pl)
	Szyby samoczyszczące	(Schodek i in., 2009; van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009; Danielewska i in., 2007; Langer i Langer, 2007, 2010a; brasil.cel.agh.edu.pl)
	Baterie słoneczne	(van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009)
	Powłoki asfaltowe redukujące spaliny	(van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009; Langer i Langer, 2010b; Pużak, 2012; Sanchez i Sobolev, 2010)
	Betonowe kostki brukowe	(van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009; Pużak, 2012)
	Fotokatalityczny cement	(van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009; Pużak, 2012)
	Betony samozagęszczalne	(Nazari i Riahi, 2011)
Nanocząsteczki Nanokrzemionka (SiO ₂) – pył krzemionkowy	Szkło ognioodporne	(van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009)
	Powłoki odporne na zarysowania	(van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009)
	Lakiery do wyrobów drewnianych	(van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009)
	Ognioodporne materiały izolacyjne	(van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009; Danielewska i in., 2007)
	Nanobeton	(Bahadori i Hosseini, 2012; Czarnecki, 2011)
	Betony zwykłe i samozagęszczalne	(Nazari i in., 2011; Raki i in., 2010; Sanchez i Sobolev, 2010)
	Betony wysokiej wytrzymałości	(Czarnecki, 2011)
	Beton ultra wysokowartościowy	(van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009)
	Stabilizacja wypełniaczy w betonie	(van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009)
	Zaprawy naprawcze do napraw konstrukcyjnych i niekonstrukcyjnych	(Danielewska i in., 2007; www.basf.pl)
Preparat gruntujący	(Danielewska i in., 2007; www.basf.pl)	
Nanocząsteczki tlenku krzemu	Nanoimpregnacja drewna	(www.drewno.pl)
Nanocząsteczki srebra	Powłoki i farby antybakteryjne	(van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009; Langer i Langer, 2010a; Langer i Langer, 2009a; www.titanium-tech.pl)
	Dodatek do impregnatów	(www.nano-technologie.pl)
	Preparaty gruntujące	(www.nano-technologie.pl)
Nanocząsteczki złota	Fugi i silikon antybakteryjne	(Czarnecki i Kurzydłowski, 2012; Langer i Langer, 2010a; www.nano-technologie.pl)
	Farby antybakteryjne	(Langer i Langer, 2009a)
Tlenek glinu	Powłoki odporne na zarysowania	(van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009)
	Lakiery do wyrobów drewnianych	(van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009)

cd. Tab. 1. Zestawienie potencjalnych zastosowań nanocząsteczek i nanoproductów w budownictwie

Nanomateriały	Zastosowanie w budownictwie	Źródło	
Nanocząsteczki	Tlenek glinu	Betony zwykłe	(Nazari i in., 2011; Raki i in., 2010; Sanchez i Sobolev, 2010)
		Betony samozagęszczalne	(Nazari i in., 2011; Raki i in., 2010; Sanchez i Sobolev, 2010)
	Nanocząstki miedzi	Impregnaty	(www.nano-technologie.pl)
		Preparaty gruntujące	(www.nano-technologie.pl)
	Tlenek cynku	Powłoki antybakteryjne	(van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009)
		Powłoki zabezpieczające przed promieniowaniem UV	(van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009)
		Powłoki fotokatalityczne	(van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009)
		Betony zwykłe i samozagęszczalne	(Nazari i in., 2011; Raki i in., 2010; Sanchez i Sobolev, 2010)
	Nanocząstki kwarcu	Powłoki samoczyszczące	(adexplus.pl)
	Polimery fluorowęglowe	Samoczyszczące powłoki fotokatalityczne	(van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009)
		Powłoki ochronne do wyrobów drewnianych oraz podłoży mineralnych	(van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009; pl.percenta.com)
	Dwutlenek tytanu (TiO ₂) i nanocząstki polianiliny	Powłoki antykorozyjne	(Langer i Langer, 2009b)
	Nanostrukturalny kwas tetradekanowy	Powłoki antykorozyjne	(Langer i Langer, 2009b)
	Dwuwarstwowe wodorotlenki	Katalizator	(Raki i in., 2010)
		Dostarczania domieszek obecnych w mieszance betonowe	(Raki i in., 2010)
	Nanoglinka	Betony zwykłe	(Nazari i in., 2011; Raki i in., 2010; Sanchez i Sobolev, 2010)
Betony samozagęszczalne		(Nazari i in., 2011; Raki i in., 2010; Sanchez i Sobolev, 2010)	
Nanocząsteczki tlenku żelaza	Betony zwykłe	(Nazari i in., 2011; Raki i in., 2010; Sanchez i Sobolev, 2010)	
Nanorurki węglowe	Zbrojenie rozproszone w betonie	(Czarnecki, 2011)	
	Betony komórkowe	(Langer i Langer, 2009c)	
Wodny preparat na bazie miceli tłuszczu	Impregnaty do drewna	(van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009; www.nanosklep.pl)	
Roztwór wodny zawierający nanosilany	Impregnaty do podłoży mineralnych	(www.nanostone.pl; www.nanosklep.pl)	
Nanoproducty	Aerozele	Izolacja termiczna	(Schodek i in., 2009; Danielewska i in., 2007; Szyszka, 2009)
		Izolacja akustyczna	(Schodek i in., 2009; Szyszka, 2009)
		Szyby o lepszych własnościach cieplnych	(Schodek i in., 2009; Szyszka, 2009)
		Panele ściennie	(Szyszka, 2009)
		Kolektory słoneczne	(Szyszka, 2009)
		Taśmy zabezpieczające przed pęknięciami termicznymi dla konstrukcji drewnianych i stalowych	(www.aerogels.pl)
		Maty izolacyjne do pielęgnowania podłoży betonowych w niskich temperaturach	(www.aerogels.pl)
		Izolowane maty robocze do prac budowlanych w ekstremalnych warunkach atmosferycznych	(www.aerogels.pl)

2. Zastosowania nanotechnologii w budownictwie

2.1. Nanopowłoki

Dzięki nanotechnologii opracowano nowe systemy powłok odpowiednich dla zróżnicowanych powierzchni, zaczynając od tworzyw sztucznych, a kończąc na stali. Nanocząstki oddziałują lepiej niż ich większe formy na powierzchnie nimi pokryte. Jest to możliwe dzięki głębszej penetracji i intensywniejszej interakcji między powierzchnią a powłoką, w wyniku czego uzyskuje się bardziej trwałe pokrycie powierzchni. Powłoki takie wykazują większą odporność na zarysowania lub promieniowanie UV, podwyższone przewodnictwo elektryczne oraz ogniotrwałość. Powłoki takie mogą wykazywać właściwości samoczyszczące lub antibakteryjne. Mogą również umożliwiać absorpcję lub odbijanie promieniowania podczerwonego (van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009).

Do nanopowłok zaliczyć można (van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009):

- powłoki antibakteryjne, w których stosuje się dodatek dwutlenku tytanu, cząsteczki srebra lub tlenek cynku,
- powłoki odbijające lub absorbujące promienie UV bądź podczerwone, gdzie wykorzystuje się tlenek cynku i dwutlenku tytanu,
- powłoki odporne na zarysowanie, w których zastosowanie ma krzemionka oraz tlenek glinu,
- „samoczyszczące” powłoki fotokatalityczne, przy produkcji których wykorzystuje się dwutlenek tytanu lub tlenek cynku,
- powłoki zmniejszające palność z zastosowaniem krzemionki.

Nanopowłoki w postaci farb, które charakteryzują się właściwościami fotokatalitycznymi, antibakteryjnymi oraz samoczyszczącymi, stosuje się w celu spowolnienia rozwoju grzybów i pleśni. Dzięki tym cechom można je stosować w szpitalach, przychodniach oraz innych obiektach użytku publicznego. Powłoki antibakteryjne na bazie nanocząstek srebra, zapewniają czystość mikrobiologiczną powierzchni, mają bardzo dobre cechy bakteriobójcze, eliminują wilgoć oraz redukują rozwój grzybów. Dodatkowo występują samoczyszczące powłoki katalityczne oraz powłoki łatwe w czyszczeniu, niezwilżalne przez wodę i olej na bazie polimerów fluorowęglowych. Farby te zapewniają również trwałość barwy, ponieważ nie przebarwiają się pod wpływem promieniowania UV (van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009; Langer i Langer, 2010a; www.titanium-tech.pl).

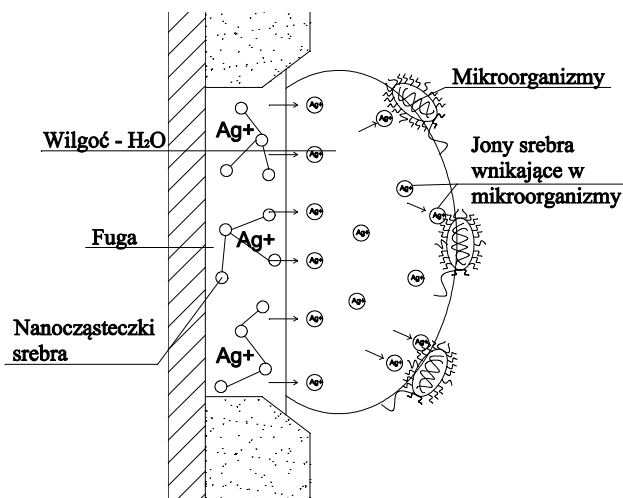
Opracowano również farby antibakteryjne (Langer i Langer, 2009a), które dopiero podczas wysychania samoistnie aktywują antyseptyczne nanocząstki metali. Nienasycone kwasy tłuszczowe obecne w farbie, pozwalają na przekształcenie się soli srebra i złota w bakteriobójcze nanodrobinki tych metali. Gdy w wysychającej warstwie tworzą się nanocząstki, zauważalna jest subtelna zmiana w kolorze farby. Substancja, która w swoim składzie ma nanodrobinki srebra, ma barwę żółtawą, natomiast ta z zawartością nanocząstek złota, cechuje się kolorem różowawym.

Specjalne farby fotokatalityczne z zawartością nanokatalizatora, którym są nanocząsteczki dwutlenku tytanu, usuwają osiadające na powierzchniach zanieczyszczenia. Dodatkowo oczyszczają pomieszczenia z nieprzyjemnych zapachów, szkodliwych oparów i gazów oraz ograniczają rozwój bakterii i pleśni. Podczas procesu fotokatalizy, przebiegającego w obecności światła i tlenu, cząstki zanieczyszczające, osiadające na pomalowanej powierzchni utleniają się i przekształcają w substancje nieszkodliwe (www.titanium-tech.pl).

Powłoki samoczyszczące mają również zastosowanie w farbach elewacyjnych. W nich również stosuje się nanocząsteczki dwutlenku tytanu oraz srebra. Dzięki fotokatalizie są one łatwiejsze w utrzymaniu. Innym rodzajem nanocząsteczek wykorzystywanych w farbach elewacyjnych są nanocząsteczki kwarcu. Superhydrofobowe materiały polimerowe, nanoszone w postaci cienkiej folii na elementy elewacyjne, również chronią je przed zabrudzeniami (Langer i Langer, 2007, 2008; adexplus.pl; www.taniachata.pl).

Należy również wspomnieć o farbie zwiększającej komfort cieplny. W skład tej farby wchodzi krzemionkowe wypełniacze, czyli wypełnione powietrzem krzemionkowe mikrosfery, pełniące rolę izolatora termicznego i redystrybutora ciepła. Ściany pomalowane tą farbą równomiernie rozpraszają ciepło po powierzchni od źródła ciepła, co wspomaga komfort termiczny (Langer i Langer, 2010a).

Właściwości fotokatalityczne, antibakteryjne oraz samoczyszczące nanocząsteczek wykorzystywane są również w fugach i silikonach. Nanocząstki srebra dzięki antyseptycznym właściwościom zapobiegają charakterystycznym przebarwieniom, które świadczą o wzroście bakterii lub grzybów. Spoiwo płytek jest czyste, nie przebarwia się i utrzymuje początkowy kolor. Tak jak wcześniej wspomniane farby, fugi redukują wzrost mikroorganizmów, dlatego też można je stosować w lokalach gastronomicznych, salach operacyjnych lub w toaletach. Schemat działania nanocząstek srebra w fudze antibakteryjnej przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat działania nanocząstek srebra w fudze antibakteryjnej (Czarnecki i Kurzydłowski, 2012; Langer i Langer, 2010a; www.nano-technologie.pl)

Specjalne nanopowłoki można również stosować do wyrobów drewnianych. Ich głównymi cechami są: wysoka odporność na zarysowanie, ochrona przed promieniami UV oraz zdolność odpychania wody. Lakierzy zawierające w swoim składzie nanokrzemionkę są bardzo odporne na zarysowania. Odporność taką mają również powłoki, w których zastosowano nanocząstki tlenku glinu. Do produkcji powłok chroniących drewno przed olejem lub wodą wykorzystuje się polimery fluorowęglowe. Produkty, z zawartością wcześniej wymienionych nanocząsteczek, stosowane są nie tylko do drewna, ale również do pokrycia podłoży mineralnych, kamieni naturalnych, marmuru, gazobetonu, cegieł, dachówek, betonu czy klinkieru (van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009).

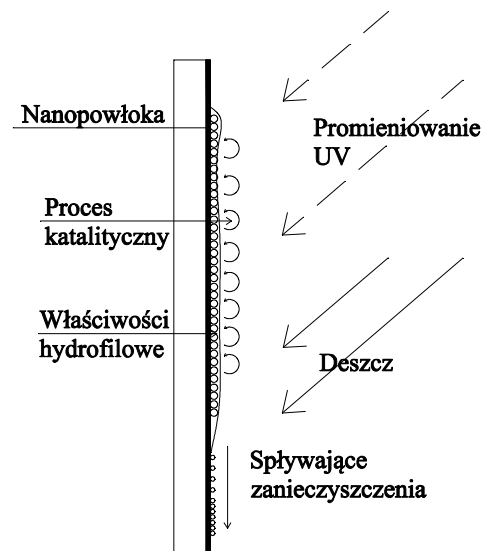
Wykorzystując nanotechnologię opracowano powłoki na bazie miceli. Micele mają średnicę około kilku nanometrów i składają się średnio z 30 do 100 molekuł. Te stabilne cząsteczki o kulistym kształcie, pochłaniają brud i zanieczyszczenia do swojego wnętrza. Obszar miceli można podzielić na dwie części. Część wewnętrzna ma właściwości hydrofobowe i jest pokrewna tłuszczom, dzięki czemu pochłania różne zanieczyszczenia i zamyka je w swoim wnętrzu. Natomiast warstwa zewnętrzna charakteryzuje się hydrofilowością, czyli skłonnością do łączenia się z wodą. Na bazie miceli tłuszczu produkowany jest wodny preparat powłokowy, który znakomicie penetruje powierzchnię drewna. Hamuje on rozwój glonów, pleśni i mchów, zapobiega erozji biologicznej, chemicznej i fizycznej drewna (van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009; Koralewski i in., 2010).

Dostępnych jest wiele preparatów, które w swojej nazwie mają przedrostek nano. Nie zawsze zawierają one w swoim składzie nanocząsteczki, ale mogą być produkowane z wykorzystaniem nanotechnologii. Są to głównie impregnaty do różnego rodzaju powierzchni o właściwościach samoczyszczących oraz bakterio-bójczych. Jednym z nanoproduktów jest roztwór wodny zawierający hydrofobowe i olejofobowe nanosilany, który stosować można na niepomalowanych podłożach mineralnych, m.in. betonie, klinkierze, cegle, marmurze lub granicie (www.nanosklep.pl; www.nanostone.pl).

2.2. Szyby samoczyszczące

W oknach ze szkłem samoczyszczącym wykorzystuje się powłoki fotokatalityczne. Szkło w takich oknach ma modyfikowaną nanotechnologicznie powierzchnię, która samoczynnie oczyszcza się z brudu i pozostaje zawsze czysta. Wprowadza się powłokę grubości 15 nm z nanocząsteczek dwutlenku tytanu, która jest przezroczysta. Proces mycia takich okien można podzielić na dwa etapy. W pierwszym etapie, zupełnie przezroczysta warstwa fotokatalityczna, którą utworzono z aktywowanego światłem słonecznym związku chemicznego, rozpuszcza materiał organiczny osiadający na powierzchni szkła. Następuje fotokatalityczne degradowanie cząstek organicznych, takich jak: kurz, odchody ptaków, resztki liści lub pyłki kwiatów.

W kolejnym etapie, w czasie opadów deszczu woda spłukuje produkty degradacji z powierzchni szkła, co jest możliwe dzięki jej hydrofilowym właściwościom. Cechy wodolubne zmodyfikowanego szkła sprawiają, że ciecz spływa po powierzchni cienką, prawie całkowicie przezroczystą warstwą, nie tworząc kropli. Właśnie dzięki fotokatalizie i hydrofilowym właściwościom szkła, samoczyszczące szyby nie wymagają właściwie ingerencji człowieka. Schemat działania szkła samoczyszczącego przedstawiono na rysunku 3. Podobne działanie mają również powłoki zapobiegające zaparowywaniu szyb czy powłoki antyrefleksyjne. Istnieją również propozycje stosowania powłok, aktywnych i pasywnych, blokujących promieniowanie podczerwone i widzialne. Rozwiązanie pasywne ma postać cienkich folii, natomiast aktywne polega na wykorzystaniu technologii termochromowych, fotochromowych czy elektrochromowych. Powłoki takie reagowałyby właściwie na temperaturę, intensywność światła czy stosowane napięcie i zmieniłyby stopień absorpcji promieniowania podczerwonego tak, aby w pomieszczeniu utrzymywała się niska temperatura (Schodek i in., 2009; van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009; Danielewska i in., 2007; Langer i Langer, 2007, 2010a; brasil.cel.agh.edu.pl).



Rys. 3. Schemat działania szkła samoczyszczącego

2.3. Nowoczesne materiały izolacyjne

Opisując nanoprodukty należy wspomnieć o materiałach izolacyjnych. Wyróżniają się one tym, że zrobione są z aerożelu albo posiadają nanootwory, natomiast nie zawierają nanocząstek. Aerożele, czyli nanoporowate komponenty krzemianowe, posiadają dziesięciokrotnie lepsze właściwości niż typowe izolacje. Cechuje je duża porowatość, a także mała gęstość, osiągnięta dzięki dużej liczbie porów i ich małym rozmiarom oraz wyjątkowym kształtom. Materiały te są zalecane w przypadkach, gdy ważna jest efektywność cieplna, minimalna grubość izolacji czy bardzo dobre właściwości termiczne (van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009; Danielewska i in., 2007).

Struktura aerożelu to sztywny szkielet, który przypomina kratownicę otaczającą pory o rozmiarach 10-200 nm. Gęstość materiału waha się od dwóch do kilkudziesięciu kg/m^3 , w zależności od metody produkcji, natomiast porowatość aerożelu wynosi od 90 do 99%. Współczynnik przewodzenia ciepła aerożeli λ wynosi 0,012-0,030 $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$. Materiał ma bardzo małą przewodność cieplną, którą zawdzięcza specjalnej strukturze i krzemionce. Struktura umożliwia ograniczenie konwekcji i przewodzenia, natomiast krzemionka absorbuje promieniowanie, co można zwiększyć dodatkową modyfikacją związkami węgla (Schodek i in., 2009; Szyszka, 2009).

Aerożele mogą występować w kilku postaciach: granulatach, płyty, taśmy. Są one nie tylko dobrymi izolatorami termicznymi, ale również można je stosować jako izolację akustyczną. Wykorzystuje się je, jako materiał izolacyjny w stolarce okiennej i drzwiowej, w postaci mat jako ocieplenie dachu lub balkonów, w membranach pokryć dachowych, podbitkach czy gontach. Można je również zastosować, jako izolację termiczną i akustyczną przegród pionowych i poziomych budynku. Ponadto, dzięki właściwości, jaką jest przepuszczalność światła, aerożele wykorzystuje się do doświetlenia pomieszczeń światłem rozproszonym. Ten materiał izolacyjny stosowany w szybach, w postaci wkładki z granulatem aerożelowym, polepsza właściwości akustyczne i ciepłe okna. Możliwe jest też zastąpienie zwykłych przezroczystych okien, szybami, które dzięki specjalnej technologii produkcji, mają zarówno niską wartość przewodzenia ciepła jak i dobrą przezroczystość (Schodek i in., 2009; Szyszka, 2009).

Aerożele mają również zastosowanie w obudowach budynków w postaci paneli ściennych. Panele grubości 7 cm są prześwitujące, lecz nie przezroczyste, co powoduje korzystne doświetlenie bez zjawiska oślepienia. Obniżają one hałas oraz mają dobry współczynnik przenikania ciepła, wynoszący $U = 0,28 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Aerożel może być również stosowany w instalacjach słonecznych, takich jak kolektory czy ściany kolektorowo-akumulacyjne (Szyszka, 2009).

Kolejnym przeznaczeniem aerożeli są taśmy zabezpieczające przed pęknięciami termicznymi dla konstrukcji drewnianych i stalowych, maty izolacyjne do pielęgnowania podłogi betonowych w niskich temperaturach lub izolowane maty robocze do prac budowlanych w ekstremalnych warunkach atmosferycznych (www.aerogels.pl).

Materiały izolacyjne na bazie nanostrukturalnego spoiwa fluoro-poliuretanowego połączonego z fotokatalityczną wierzchnią warstwą tlenku żelaza, stosuje się do zabezpieczania dachów przed niskimi i wysokimi temperaturami. Giętka izolacja z nanoporowatego żelu ma zastosowanie w ekstremalnych temperaturach. Natomiast materiały izolacyjne na bazie nanoporowatej struktury krzemionkowej przeznaczone są do wyjątkowej ochrony ogniowej lub do ekstremalnej izolacji przed zimnem (van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009; Danielewska i in., 2007).

Jednym ze sposobów termoizolacji może być również ekologiczny, wodny nanokompozyt, w którego skład wchodzi w 70% Hydro-NM-Oxide, w 30% żywica akrylowa oraz różne dodatki uszlachetniające. Materiał ten ma zastosowanie, jako termiczne uszczelnienie budynków i po rozprowadzeniu po ścianach zewnętrznych, tworzy powłokę cechującą się małą przewodnością termiczną. Powłoka ta może zredukować ilość energii zużywanej na ogrzanie budynku nawet o 40% (Langer i Langer, 2010a).

2.4. Nanomodyfikowana stal

Nanomodyfikowana stal MMFX2 charakteryzuje się odpornością na korozję, podobną do odporności stali nierdzewnej, dodatkowo jest stanowczo tańsza. Stal ta wykazuje poprawę cech mechanicznych, na przykład większą ciągliwość, wyższą wytrzymałość na rozciąganie czy wytrzymałość zmęczeniową, w porównaniu z innymi stalami wysokowytrzymałościowymi. Właściwości stali MMFX2 uzyskiwane dzięki wyjątkowej nanostrukturze, przypominającej sklejkę, pozwalają obniżyć koszty konstrukcji oraz zapewnić dłuższy okres użytkowania w agresywnych środowiskach (Danielewska i in., 2007).

Modyfikacja stali pozwala wydłużyć okres użytkowania konstrukcji, ale należy również pamiętać o ochronie powierzchniowej stali. Korozja jest głównym czynnikiem uszkadzającym stal i inne metale. Szkodliwe substancje zawarte w powietrzu niekorzystnie wpływają na powierzchnie elementów metalowych. Jednym ze sposobów zabezpieczenia antykorozyjnego może być zastosowanie lakierów reagujących na zmienne warunki środowiska. Nanokontenery, które są głównym składnikiem innowacyjnych powłok lakierniczych, zawierają w sobie środki chemiczne zapobiegające korozji. Gdy następuje zmiana w otoczeniu, na przykład pH powierzchni, otoczki nanododatku stają się półprzepuszczalne, dzięki czemu następuje uwolnienie środka przeciwdziałającego rozwojowi korozji. Nanokontenery wracają do oryginalnego stanu, a warstwa ochronna nie zostaje naruszona. System ten pozwala na wczesną neutralizację ognisk korozji (Langer i Langer, 2007, 2008).

Kolejnym rozwiązaniem zabezpieczenia antykorozyjnego stali, wykorzystującym nanotechnologię, jest organiczna powłoka kompozytowa składająca się z dwutlenku tytanu i nanocząstek polianiliny. Polianilina, organiczny polimer stosowany początkowo jako barwnik, sama w sobie jest kompletnym produktem antykorozyjnym. Nie tylko ogranicza rozwój korozji, ale również tworzy pasywną strefę ochronną wokół powstałej rysy. Jednakże sama polianilina ulega zużyciu, dlatego wymagane jest użycie dodatkowego medium, jako nośnika i stabilizatora. Połączenie nanocząsteczek dwutlenku tytanu i polianiliny w skali nano pozwala na zwiększenie powierzchni preparatu oraz redukcję ilości, którą należy zastosować, co wyraźnie ogranicza koszty. Istota nanopowłok antykorozyjnych tkwi w potrójnym działaniu mieszaniny nanocząsteczek. Pierwszym czynnikiem jest mechaniczna bariera

odgradzająca składniki korozyjne od powierzchni metalu, gdzie dodatkowo nanocząstki podwyższają jej szczelność. Kolejnym atutem jest zmiana właściwości elektrochemicznych powłoki, dzięki obecności hybrydowych nanocząstek. Ostatnim czynnikiem jest „samonaprawa” powłoki. Nawet jeśli zostanie ona uszkodzona, dodatek polianiliny naprawia usterkę i hamuje dalszy rozwój korozji (Langer i Langer, 2009b).

Innym modyfikowanym metalem jest miedź, stosowana obecnie jako pokrycie dachów lub jako materiał na rury instalacji ogrzewczych. Ją również należy zabezpieczać przed korozją. Powierzchnia miedzi pokryta kwasem tetradekanowym, który tworzy nanostrukturalną warstwę ochronną, wykazuje właściwości superhydrofobowe. Dzięki tym właściwościom woda na powierzchni materiału przybiera postać idealnie kolistych kropli, po czym w prosty sposób spływa i pozostawia powierzchnię suchą. Proces zabezpieczenia antykorozyjnego elementów miedzianych jest prosty i nie wymaga stosowania kosztownych urządzeń (Langer i Langer, 2009b).

2.5. Nanoinfiltracja drewna

Naukowcy z Innsbrucku (www.drewno.pl) przeprowadzili nanomodyfikację europejskich gatunków drewna. Drewno iglaste lub liściaste suszono w suszarce przemysłowej w warunkach lekkiej próżni, w której drewno schnie od wewnątrz, dzięki czemu jego pory nie zamykają się tak bardzo jak w trakcie suszenia standardowego. W następnej kolejności drewno zanurzane było w preparacie impregnacyjnym, który składał się z dwutlenku krzemu i szkła wodnego. Na koniec powtórnie suszono element w suszarce. W wyniku przeprowadzonego procesu powstają nanocząsteczki tlenku krzemu, które osadzają się w strukturze drewna. Nano-infiltrowane drewno charakteryzuje się lepszymi właściwościami mechanicznymi, wyższą wytrzymałością, odpornością na ogień, posiada właściwości hydrofobowe oraz staje się bardziej odporne na owady i grzyby. Badania przeprowadzano na próbkach drewna świerku, które cechuje naturalne kurczenie i pęcznienie, wrażliwość na warunki zewnętrzne i biotyczne oraz łatwopalność. Celem badania było znalezienie innych sposobów modyfikacji drewna niż toksyczne środki ochrony. Pomysł na badania zaczerpnięto z natury, gdzie występują naturalne procesy petryfikacji drewna, głównie w obszarze „krzemionkowania”.

2.6. Nanomodyfikacje asfaltu

Interesującym zastosowaniem nanocząstek dwutlenku tytanu jest wykorzystanie ich do zmniejszenia zanieczyszczenia powietrza spalinami. Realizowane jest to w infrastrukturze komunikacyjnej. Powłoki asfaltowe lub betonowe kostki brukowe aktywowane są TiO_2 . Asfalt modyfikowany nanocząsteczkami dwutlenku tytanu ma właściwości fotokatalityczne i niszczy trujące tlenki azotu zawarte w spalinach. Na drodze reakcji fotochemicznych następuje redukcja szkodliwych tlenków

azotu NO_x do nieszkodliwych jonów NO_3^- . Na powierzchni powstają sole neutralizowane, które są splukiwane przez opady atmosferyczne. Stężenie lotnych związków chemicznych jest coraz większe w miastach oraz w pobliżu ruchliwych dróg, dlatego też stosowanie asfaltu modyfikowanego dwutlenkiem tytanu może pomóc w opanowaniu tej niekorzystnej tendencji (van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009; Langer i Langer, 2010b; Pużak, 2012; Sanchezi i Sobolev, 2010).

2.7. Kompozyty cementowe a nanotechnologia

Beton jest obecnie jednym z najpowszechniej stosowanych materiałów konstrukcyjnych. Dzisiejszy rozwój technologii betonu inspirowany jest do coraz bardziej wyrafinowanej modyfikacji składu kompozytów na coraz niższym poziomie w skali mikro, a nawet w skali nano. Zmniejszanie wskaźnika wodno-cementowego, które wpływa korzystnie na wytrzymałość betonu, natrafiło na naturalną granicę, którą jest minimalna ilość wody potrzebna do hydratacji cementu (Czarnecki, 2006 i 2011; Langer i Langer, 2009c).

Beton, w skali nano, jest kompozytem zespołów molekularnych, powierzchni (kruszywa lub włókien) i wiązań chemicznych, które oddziałują poprzez lokalne reakcje chemiczne, siły międzycząsteczkowe oraz wewnątrzfazowe dyfuzje. Fazę C-S-H, wynik reakcji chemicznych zachodzących w cemencie przy udziale wody, gdzie powstają uwodnione krzemiany i glinokrzemiany wapnia, można traktować jako nanomateriał. W celu obserwowania nanostruktur opracowano nowoczesne metody badawcze, takie jak mikroskopia elektronowa czy mikrotomografia rentgenowska. Dzięki nanotechnologii można obecnie opisać wpływ uwodnionych faz cementowych i ich wzajemnego oddziaływania z domieszkami, nanowypełniaczami czy nanowłóknami w kompozytach cementowych. (Monteiro i in. 2009; Sanchez i Sobolev, 2010; Raki i in., 2010).

Nanocząsteczki mogą być również wykorzystywane w technologii betonu do kontrolowania lub wprowadzania domieszek do mieszanek betonowych. Wykorzystywane są w tym celu dwuwarstwowe wodorotlenki, które działają jak katalizator lub sorbent. Mogą też być one nośnikami inhibitorów korozji czy substancji napowietrzających (Raki i in., 2010).

Rozwój technologii betonu doprowadził do powstania, tak zwanych nanobetonów, które są modyfikowane nanokrzemionką lub nanocząsteczkami krzemionki strąceniowej. Modyfikuje się zarówno betony zwykłe jak i betony wysokiej wytrzymałości. Nanomodyfikacja odbywa się przynajmniej w dwóch etapach. Pierwszy etap polega na otrzymaniu koncentratu nanokompozytu, następnie dodawany jest on do mieszanki betonowej. Metoda ta odnosi się do monowarstw o jednocząsteczkowej grubości. Rozważa się też połączenie pojedynczymi łańcuchami polimeru płytek montmorylonitu, które pełniłyby funkcję źródła reakcji

puculanowej. Możliwe jest także połączenie nanorurek w nanozbrojenie rozproszone (Czarnecki, 2011).

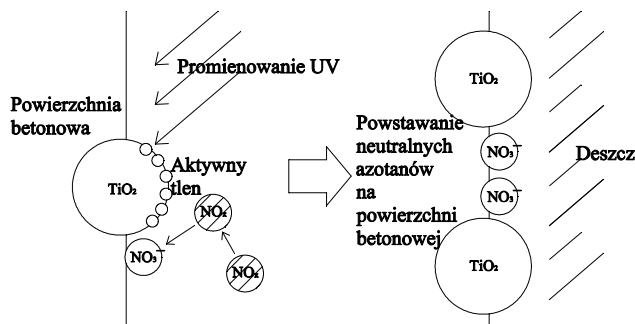
W betonach modyfikowanych polimerami korzystny może być nanomonitoring rozmieszczenia polimeru. Polimer, jeśli wprowadza się go w standardowy sposób, mostkuje potencjalne rysy na poziomie mikrometrycznym. Dodanie polimeru w ilości około 10% masy cementu sprawia, że wytrzymałość na rozciąganie wzrasta kilkakrotnie. Gdy zastosuje się polimery wodorozcieńczalne, interwencja technologiczna przesuwają się w obszar nano. Następuje mostkowanie heksagonalne kryształów portlandytu, które zwielaokrotnia efekt wzrostu wytrzymałości. Wprowadzenie dziesięciokrotnie mniejszej ilości polimeru powoduje pięćdziesięcioprocentowy wzrost wytrzymałości na rozciąganie. Zbliżone skutki otrzymuje się przy stosowaniu polimerów w postaci proszków redyspersyjnych (Czarnecki, 2011).

Nanomodyfikacja betonu nie tylko wpływa na zmianę jego właściwości, ale również umożliwia wprowadzenie materiału naprawczego i otrzymanie samonaprawiającego się betonu. Koncepcja ta polega na umieszczeniu substancji naprawczej podczas wytwarzania mieszanki betonowej, tak, aby znajdowała się ona tam, przed wystąpieniem uszkodzenia. Po tym, gdy w betonie naprężenia wewnętrzne przekroczą pewien poziom, aktywuje się środek naprawczy, zazwyczaj w postaci żywicy utwardzalnej w minikapsułkach. Substancją naprawiającą może być żywica epoksydowa, która wcześniej została umieszczona w mieszance betonowej. Po wystąpieniu mikrorys, spowodowanych przeciążeniem elementu, następuje samoiniekcja rysy żywicą, która następnie ulega utwardzeniu. Dopuszczalnym rozwiązaniem jest także sieciowanie bez współpracy utwardzacza, wyłącznie pod wpływem czynnika katalitycznego, którym może być wodorotlenek wapnia obecny w zaczynie cementowym. Sieciowanie możliwe jest dzięki dużej reaktywności grup epoksydowych. Inną propozycją jest wprowadzenie substancji naprawczej w kruchych włóknach, które stanowią zbrojenie rozproszone dodane do mieszanki betonowej. Samonaprawialność betonu można również uzyskać z wykorzystaniem mikrobiologicznego indukowanego wytrącania minerałów, m.in. kalcytu (Czarnecki, 2011).

Wykorzystanie nanocząsteczek w kompozytach cementowych skupia się obecnie na pyłe krzemionkowym czy dwutlenku tytanu.

Na rynku dostępne są produkty takie jak fotokatalityczny cement, który ma zastosowanie szczególnie w obiektach budowlanych znajdujących się w sąsiedztwie intensywnego ruchu samochodowego. Schemat redukcji NO_x przez powierzchnie fotokatalityczne przedstawia rysunek 4. Spoiwo to, dzięki swoim właściwościom redukującym zanieczyszczenia w powietrzu oraz zabrudzenia pokrywające z upływem lat betonowe powierzchnie budynków i konstrukcji inżynierskich, stosuje się przy wykonywaniu elewacji i dachów budynków, a także nawierzchni i elementów obudowy ciągów komunikacyjnych, a konkretnie (van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009; Pużak, 2012):

- przy produkcji dachówki,
- przy produkcji elementów fasadowych,
- w płytkach, tynkach i farbach cementowych,
- do wykonywania okładzin ścian tuneli,
- do wykonywania i napraw nawierzchni drogowych,
- przy produkcji ekranów akustycznych i ochronnych w budownictwie drogowym,
- przy produkcji drogowych barier bezpieczeństwa,
- przy produkcji kostki brukowej, płyt lub posadzek betonowych.



Rys. 4. Schemat redukcji NO_x przez powierzchnie fotokatalityczne

Cement fotokatalityczny w swoim składzie zawiera nanokrystaliczny dwutlenek tytanu. Właściwości fotokatalityczne, sprawiają, że TiO_2 , pod wpływem promieniowania UV i w towarzystwie wody opadowej na powierzchni betonu, przyspiesza rozpad szkodliwych substancji. Cement z zawartością nanokrystalicznego dwutlenku tytanu charakteryzuje się także właściwościami superhydrofilowymi, czyli powierzchnia wykonana z użyciem tego spoiwa ma właściwości samoczyszczące. Ważnym aspektem jest to, że dwutlenek tytanu, pełniący rolę katalizatora, nie zużywa się w trakcie zachodzących procesów, dzięki czemu zjawisko oczyszczania powietrza jest bezustannie odnawialne i długofalowe (Pużak, 2012).

Jednym z najbardziej znanych obiektów wykonanych z użyciem nanocząsteczek jest Kościół Jubileuszowy w Rzymie. Do jego wykonania wykorzystano beton fotokatalityczny z dodatkiem TiO_2 , który ma właściwości samoczyszczące (Schodek i in., 2009).

Dzięki nanotechnologii można nie tylko otrzymywać beton o specjalnych właściwościach, ale również produkty przeznaczone do naprawy betonu. Przykładem jest produkt na bazie pyłu krzemionkowego, który charakteryzuje się większą gęstością, lepszą przyczepnością i kompatybilnością z betonem. Jego zaletą jest również większa tiksotropia, nieprzepuszczalność oraz mniejszy skurcz. Poprawiają się również parametry techniczne, takie jak: odporność na zarysowania, wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie, mrozoodporność. Dostępne są również zaprawy naprawcze do napraw konstrukcyjnych i niekonstrukcyjnych oraz zabezpieczający, jednoskładnikowy preparat gruntujący, na bazie cementu, do stali zbrojeniowej, który może być równocześnie klejącą zaprawą szczepną zastosowaną przed nałożeniem zaprawy naprawczej (Danielewska i in., 2007; www.basf.pl).

Modyfikację nanocząsteczkami dwutlenku tytanu można przeprowadzić w nawierzchniach betonowych. Po dodaniu około 5% (wagowo) nanocząstek dwutlenku tytanu, drogi betonowe, w testach laboratoryjnych, eliminowały nawet 92% lotnych związków azotu kontaktujących się z ich powierzchnią. Natomiast w warunkach środowiskowych redukcja wynosiła nawet 50% lotnych związków azotu NO_x (Langer i Langer, 2010b).

Nanocząsteczki dwutlenku tytanu mają swoje zastosowanie również w betonach samozagęszczalnych. W pracy Nazari i Riahi (2011) przedstawiono wyniki badań, które potwierdzają, że dodatek nanocząstek TiO_2 zwiększa wytrzymałość na ściskanie betonów samozagęszczalnych, ponieważ przyspieszona jest hydratacja cementu oraz zmniejsza się porowatość betonu.

Dodatkiem do betonów zwykłych lub samozagęszczalnych mogą być również: nanokrzemionka, nanocząstki tlenków cynku, nanoglinka lub tlenek glinu Al_2O_3 . Dodatek nanocząsteczek tlenków żelaza Fe_2O_3 do betonów zawierających popioły lotne zwiększa ich wytrzymałość na ściskanie. Stosowanie tych nanocząsteczek może zwiększać odporność na ścieranie, wytrzymałość, poprawiać urabialność (Nazari i in., 2011; Raki i in., 2010; Sanchez i Sobolev, 2010).

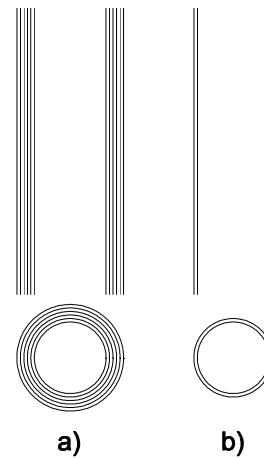
Nanotechnologia może być również stosowana w betonach ogniotrwałych oraz innych materiałach cementowych. Antonovič i inni (2010) opisuje wpływ nanostrukturalnych formacji materiałów wiążących przy produkcji betonów ogniotrwałych. Ograniczona ilość wody w utwardzonej strukturze zapewnia warunki do tworzenia się wstępnych nanoklastrów i nanowarstw amorficznych hydratów. Zastosowanie nanotechnologii w produkcji betonów ogniotrwałych pozwoliło na zwiększenie wytrzymałości na ściskanie 3 razy – od 55 MPa do 165 MPa.

Przeprowadzono także badania betonów, w których zastąpiono część cementu koloidalnymi nanocząsteczkami bezpostaciowej krzemionki. Badano właściwości fizyczne i mechaniczne, wytrzymałość oraz mikrostrukturę. Zredukowanie znacznej części cementu oraz dodatek nanokrzemionki powodował wzmocnienie mikrostruktury betonu przy niewielkim spadku wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie. Umożliwi to przyszłości znaczne zmniejszenie ilości stosowanego cementu. Wzrost ilości nanocząsteczek oraz redukcja dodawanego cementu powodowały utratę urabialności. Dlatego też niezbędne w takich wypadkach jest stosowanie superplastyfikatorów (Bahadori i Hosseini, 2012).

2.8. Nanorurki węglowe

Odkrycie nowych odmian alotropowych węgla, zwłaszcza nanostrukturalnych odmian, tj. fulerenów i nanorurek węglowych, doprowadziło do przełomu w technologii materiałów inżynierskich. Nanorurki węglowe (NRW) to zwinięte współosiowo płaszczyzny grafenowe. Struktura tej formy węgla może mieć całkowicie zamkniętą powierzchnię, ponieważ nanorurki są zakończone na jednym lub obu końcach półkolistymi

czasami. NRW cechuje szczególnie duży stosunek długości do średnicy. Nanorurki jednowarstwowe i wielowarstwowe przedstawiono na rysunku 5 (Czarnecki, 2011; Huczko, 2004 i 2006; Kellsall i in., 2009; Zipper, 2006).



Rys. 5. Rodzaje nanorurek: a) wielowarstwowe nanorurki węglowe, b) jednowarstwowe nanorurki węglowe

Istnieje kilka metod wytwarzania nanorurek węglowych, we wszystkich powstają one przy powolnej kondensacji gorących par atomów węgla. Bez względu na metodę wytwarzania, sposób przygotowania, podawania i wykorzystania katalizatora w komorze reaktora, uzyskane nanorurki węglowe przybierają dwie postaci: pierwszą jest depozyt ze skłębionych, poplątanych, zlepionych węglem amorficznym i losowo pomieszanych nanorurek, drugą postacią są rzędy równoległe wyrośniętych nanorurek na podłożu pokrytym katalizatorem, który jest niezbędny przy produkcji NRW (Czarnecki, 2011; Huczko, 2004 i 2006; Kellsall i in., 2009; Kurzydłowski i Lewandowska, 2010; Zipper, 2006).

Nanorurki węglowe charakteryzują się specyficzną morfologią, dużą powierzchnią właściwą, nowymi i zmiennymi właściwościami elektronowymi, bardzo wysokim współczynnikiem sprężystości podłużnej, bardzo silnymi wiązaniami między atomami węgla, które dają NRW doskonałą trwałość, wysoką wytrzymałość na rozciąganie i zginanie oraz bardzo dobrą przewodność ciepła i prądu elektrycznego. Te wszystkie cechy sprawiają, że nanorurki węglowe znajdują dosyć szerokie zastosowanie, m.in. w technologii elektronowej, zwłaszcza w mikroelektronice, telekomunikacji, wielofunkcyjnych materiałach kompozytowych, medycznej inżynierii materiałowej (biomedycyna), technologii obrazującej, jako znaczniki w diagnostyce medycznej czy nośniki różnorodnych katalizatorów (Czarnecki, 2011; Huczko, 2004 i 2006; Kellsall i in., 2009; Zipper, 2006).

Nanorurki węglowe mają także zastosowanie w budownictwie. Trwają badania nad zbrojeniem betonu nanorurkami węglowymi (Zharikov i in., 2011). Ze względu na ich wysoką wytrzymałość oraz wysoki moduł sprężystości, może przynieść to wiele korzyści.

Już niewielkie ilości nanocząsteczek mogą wyraźnie zmienić właściwości betonu. W dostępnej literaturze pojawiają się sprzeczne informacje na temat wpływu dodatku nanorurek na cechy mechaniczne kompozytów cementowych. W publikacji Raki (2010) będącej podsumowaniem prac badawczych dotyczących stosowania nanocząsteczek węglowych w technologii betonu, przedstawiono zmienne wyniki badań właściwości mechanicznych zapraw, w których stosowano nanododatek. Część badań potwierdzała polepszenie właściwości, takich jak wytrzymałość na ściskanie, moduł Younga, twardość, podczas gdy inne wskazują na pogorszenie tych właściwości. Analiza badań wykazuje, że najważniejszym czynnikiem uzyskania poprawy wybranych cech kompozytów cementowych jest precyzyjny skład zapraw. Tylko konkretne kombinacje nanorurek węglowych, domieszek oraz wskaźnika wodno-cementowego pozytywnie wpływają na wytrzymałość. Polepszenie cech materiału zależy nie tylko od składu, ale również od czasu hydratacji spoiwa. Jednak głównym problemem wykorzystania nanorurek węglowych, jako dodatku do betonu, jest ich nierównomierna dyspersja i mała przyczepność do zaczynu cementowego (Czarnecki, 2011; Raki i in. 2010).

Naukowcom z międzynarodowej grupy badawczej (Langer i Langer, 2009c) udało się wyeliminować tendencję do zbrylania, dzięki opracowaniu metody syntezy nanowłókien i nanorurek węglowych bezpośrednio na powierzchni cząsteczek cementu. Za pomocą tej nanomodyfikacji zmieniają się właściwości kompozytów cementowych, ponieważ ich odporność mechaniczna na ściskanie wzrasta ponad dwukrotnie. Nanowłókna węglowe mogą mieć także zastosowanie przy produkcji betonów komórkowych. Specjalne powłoki paneli betonowych utworzone z polimerowych laminatów z zawartością nanowłókien węglowych, zwiększają wytrzymałość betonów komórkowych oraz poprawiają odporność na niekorzystne warunki środowiskowe.

Na Politechnice Białostockiej prowadzone są obecnie badania nad zastosowaniem nanocząsteczek węglowych w kompozytach cementowych.

3. Badania własne

Pomimo bardzo zachęcających wyników badań nad zastosowaniem nanocząsteczek węglowych do wytwarzania kompozytów cementowych badacze napotykają bardzo duże trudności w zastosowaniu nanorurek z powodu ich agregacji i nierównomiernej dyspersji w materiale. Celem badań wstępnych prowadzonych w Politechnice Białostockiej jest opracowanie metody równomiernego rozprowadzania nanorurek węglowych w zaprawie cementowej. Analizowano wpływ:

- rodzaju wody,
- rodzaju domieszki chemicznej (superplastyfikatora),
- sposobu mieszania składników zaprawy.

W badaniach wykorzystywano wodę wodociągową, wodę strukturyzowaną i wodę demineralizowaną oraz trzy rodzaje domieszek chemicznych:

- domieszka upłynniająca (d1), która jest produkowana na bazie modyfikowanych polikarboksylatów,
- domieszka uplastyczniająca (d2) jest oparta na eterach polikarboksylowych,
- domieszka upłynniająca nowej generacji (d3) wytwarzana na bazie modyfikowanych polikarboksylatów.

Woda strukturyzowana otrzymywana była poprzez wstępne zamrożenie powodujące uporządkowanie jej struktury. Jako nanomodifikator dodawano wielowarstwowe nanorurki węglowe „Taunit-M”. Są to quasi-jednowymiarowe, nitkowane formy polikrystalicznego grafitu o cylindrycznym kształcie z wewnętrznym kanałem o średnicy 4,8 nm, zaś zewnętrzna średnica nanorurki waha się w granicach 8,15 nm, a długość jest rzędu 2µm i więcej.

Zaprawę przygotowano zgodnie z PN-EN 196-1:2006 *Metody badania cementu. Część 1: Oznaczanie wytrzymałości* (jak dla zapraw normowych do badania wytrzymałości cementu). Stosowano dwa sposoby wprowadzania nanomodifikatora. Sposób pierwszy polegał na tym, że domieszkę chemiczną i nanorurki dodawano do wody zarobowej i mieszano mechanicznie przed dodaniem do pozostałych składników. Sposób drugi dodawania nanorurek obejmował wstępne mieszanie części wody z domieszką i nanorurkami za pomocą mieszadła magnetycznego.

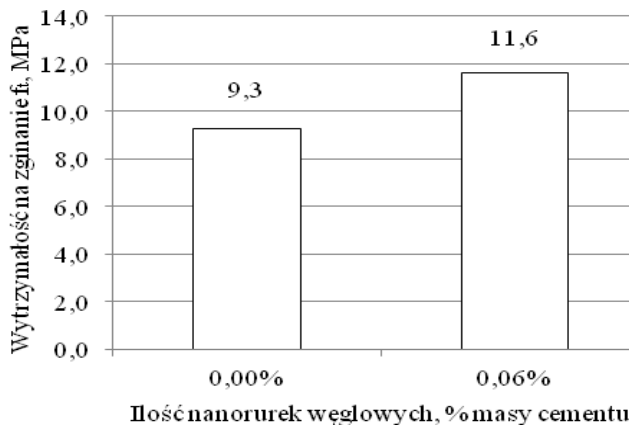
W wyniku przeprowadzonych badań ustalono, że użycie mieszadła magnetycznego spowodowało wzrost wytrzymałości zaprawy nie zawierającej dodatku nanocząsteczek o ponad 2%, natomiast zaprawy, do których dodawano nanorurki węglowe wykazały wytrzymałość większą nawet o 18%. Przeprowadzone badania wstępne pozwoliły na wytypowanie jako najefektywniejszej domieszki, domieszkę (d3) upłynniająca nowej generacji na bazie modyfikowanych polikarboksylatów, która umożliwiła uzyskanie wyższych o około 5% wytrzymałości zaprawy z dodatkiem nanocząsteczek w porównaniu z zaprawami kontrolnymi.

Kolejny etap badań obejmował porównanie wytrzymałości zapraw cementowych bez dodatku nanorurek i z nanorurkami. Badane zaprawy wykonane były z wykorzystaniem cementu CEM I 42,5 oraz wody demineralizowanej i domieszki d3 w ilości 0,6% masy cementu. Zaprawy wykonywane były z zastosowaniem mieszadła magnetycznego w trakcie wprowadzania nanomodifikatora i superplastyfikatora do wody zarobowej.

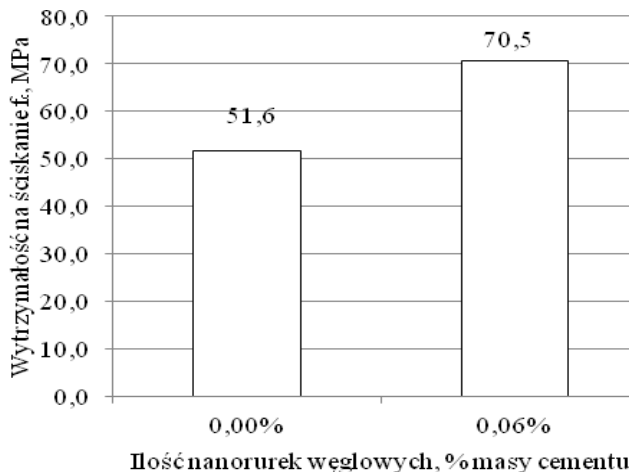
Przeprowadzone badania wykazały korzystny wpływ nanorurek węglowych na wytrzymałość na zginanie oraz wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych (rys. 6 i 7). Wytrzymałość na zginanie próbek zaprawy cementowej wzrosła o 24,7% w wyniku zastosowania nanocząsteczek w ilości 0,06% masy cementu. Natomiast zastosowanie NRW spowodowało wzrost wytrzymałości na ściskanie aż o 36,6%.

Badania wstępne dały zachęcające rezultaty, więc obecnie prowadzone są prace badawcze mające na celu ustalenie optymalnej ilości dodatku nanocząstek węglowych z punktu widzenia właściwości

mechanicznych kompozytów cementowych oraz ich trwałości.



Rys. 6. Wyniki badania wytrzymałości na zginanie próbek zaprawy cementowej zawierającej dodatek nanorurek węglowych oraz próbek zaprawy kontrolnej



Rys. 7. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek zaprawy cementowej zawierającej dodatek nanorurek węglowych oraz próbek zaprawy kontrolnej

4. Podsumowanie

Nanotechnologia, pomimo że jest zdecydowanie nową dziedziną nauki, wykorzystywana jest już w przemyśle budowlanym w szerokim zakresie. Wytwarzane są nowe nanomateriały, stosuje się nanomodyfikację kompozytów cementowych oraz prowadzi się badania materiałów na poziomie nanostruktur w celu stwierdzenia różnic we właściwościach. Najczęściej wykorzystywanymi nanocząsteczkami są dwutlenek tytanu oraz nanocząstki srebra, stosowane w produkcji powłok, impregnatów lub kompozytów cementowych. Aerożele, dzięki swoim unikalnym właściwościom, mają zastosowanie jako izolacje termiczne. Zastosowanie nanorurek węglowych ze względu na wiele wyjątkowych cech wciąż jest na etapie badań.

Przeprowadzone badania laboratoryjne wpływu nanododatku na wytrzymałość zapraw wykazały, że nawet niewielka ilość dodatku nanocząsteczek węglowych (rzędu 0,06% masy cementu) spowodowała wzrost

wytrzymałości na zginanie o około 25%, natomiast wytrzymałość na ściskanie wzrosła o ponad 36%.

Literatura

- Antonovič V., Pundienea I., Stonysa R., Česnieneb J., Keriene J. (2010). A review of the possible applications of nanotechnology in refractory concrete. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 16, Issue 4, 595-602.
- Schodek D.L., Ferreira P., Ashby M.F. (2009). Nanomaterials, Nanotechnologies and Design. An Introduction for Engineers and Architects. *Butterworth-Heinemann*.
- Bahadori H., Hosseini P. (2012). Reduction of Cement Consumption by the Aid of Silica Nano-Particles (Investigation on Concrete Properties). *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 18, Issue 3, 416-425.
- van Broekhuizen F.A., van Broekhuizen J.C. (2009). Nanotechnologie w budownictwie europejskim – stan wiedzy na rok 2009 – streszczenie. Amsterdam.
- Czarnecki L. (2006). Nanotechnologia – wyzwaniem inżynierii materiałów budowlanych. *Inżynieria i Budownictwo*, 9/2006, 465-469.
- Czarnecki L. (2011). Nanotechnologia w budownictwie. *Przegląd budowlany*, 1/2011, 40-53.
- Czarnecki L., Kurzydłowski K. (2012). Nanomateriały budowlane. *Materiały budowlane*, 5/2012, 76-78.
- Danielewska K., Pszczółkowska A., Górecki T. (2007). Nanotechnologia w budownictwie. *Materiały budowlane*, 2/2007, 46-47.
- Huczko A. (2004). Nanorurki węglowe. Czarne diamenty XXI wieku. *BEL Studio*.
- Huczko A. (2006). Fullereny i nanorurki. *Academia*, nr 2 (6), 16-19.
- Kellsall R. W., Hamley I.W., Geoghegan M., red. przekładu Kurzydłowski K. (2009). Nanotechnologie. *Wydawnictwo Naukowe PWN*, Warszawa.
- Koralewski D., Serocki J., Szczyński W. (2010). Micele i micele odwrócone. Prezentacja studentów kierunku Mechatronika Wyższej Szkoły Gospodarki w Bydgoszczy.
- Kurzydłowski K., Lewandowska M. (eds) (2010). Nanomateriały inżynierskie konstrukcyjne i funkcjonalne. *Wydawnictwo Naukowe PWN*, Warszawa.
- Langer J., Langer K. (2007). Nanotechnologia a budownictwo (cz. I). Buduj z głową. *Kwartalnik kosztorysanta*, 4/2007.
- Langer J., Langer K. (2008). Nanotechnologia a budownictwo (cz. II). Buduj z głową. *Kwartalnik kosztorysanta*, 1/2008.
- Langer J., Langer K. (2009a). Nanotechnologiczne powłoki antybakteryjne. *Builder*, 7, 66-67.
- Langer J., Langer K. (2009b). Nanotechnologia a problem korozji. *Builder*, 4, 67-69.
- Langer J., Langer K. (2009c). Mikro i nano – modyfikacje betonu. *Builder*, 8, 66-68.
- Langer J., Langer K. (2010a). Nanotechnologiczny trend. *Builder*, 4, 42-45.
- Langer J., Langer K. (2010b). Nano i mikrotechnologie asfaltu. *Builder*, 5, 46-49.
- Monteiro P.J.M., Kirchheima A.P., Chaea S., Fischer P., MacDowellc A.A., Schaiblec E., Wenkd H.R. (2009). Characterizing the nano and micro structure of concrete to improve its durability. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, Issue 8, 577-584.
- Nazari A., Khalaj G., Riahi S., Khalaj M.J. (2011). Wpływ nano- Al_2O_3 na właściwości betonu z granulowanym żużlem wielkopieczowym. *Cement – Wapno – Beton*, 6/2011, 311-322.

- Nazari A., Riahi S. (2011). Wpływ nanocząstek TiO₂ na właściwości samozagęszczającego się betonu. *Cement – Wapno – Beton*, 3/2011, 167-181.
- Puzak T. i inni, pod kierunkiem dr hab. inż. Zbigniewa Giergiczego (2012). Cement, kruszywa, beton w ofercie GRUPY GÓRAŹDŹE. Rodzaje, właściwości, zastosowanie. Chorula, kwiecień 2012.
- Raki L., Beaudoin J. J., Alizadeh R., Makar J. M., Sato T. (2010). Cement and Concrete Nanoscience and Nanotechnology. *Materials*, 3, 918-942.
- Sanchez F., Sobolev K. (2010). Nanotechnology in concrete – A review. *Construction and Building Materials*, Vol. 24, 2060-2071.
- Szyszką J. (2009). Izolacje aerożelowe. W: „Izolacje IX”, 34-35.
- Zharikov V.V., Yezerskiĭ V.A., Kuznetsova N.V., Sterkhov I.I. (2011). Tsementnyekompozitsionnyematerialy s ispol'zovaniemotkhodovlityeĭnogoproizvodstva. *Tekhnologiiibetonov*, No. 11-12, 19-21.
- Zipper E. (2006). Niezwykłe własności nanorurek węglowych. *Postępy fizyki*, Tom 57. Zeszyt 3, 114 -117.

NANOTECHNOLOGY IN CIVIL ENGINEERING – APPLICATION REVIEW

Abstract: The use of nanotechnology in the production of building materials and building products is described

in the paper. Nano-products (e.g. aerogels) are used in civil engineering. Many well-known materials are modified by nanoparticles. Carbon nanotubes are one of nanomaterials elements, which are applied in cement matrix composites. It turned out a significant problem in even the distribution of nanoadditive in the mass of the composite because of its tendency to aggregate. At Białystok University of Technology, research is being conducted on the use of carbon nanotubes in composites with cement matrix, and on developing a method for their uniform dispersion in the material. Nanoparticles influence on the strength of cement mortar is presented in the paper. The small amount of carbon nanotubes addition resulted in a significant increase in the strength of cement matrix composites.

Artykuł opracowano w Politechnice Białostockiej w ramach realizacji Pracy Statutowej S/WBiŚ/1/2013.

Autorka publikacji Natalia Stankiewicz jest uczestnikiem projektu „Stypendia dla doktorantów województwa podlaskiego”, współfinansowanego w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, Działanie 8.2 Transfer wiedzy, Poddziałanie 8.2.2 Regionalne Strategie Innowacji, ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego, budżetu państwa oraz środków budżetu Województwa Podlaskiego.