

Spis treści

Katarzyna GŁADYSZEWSKA-FIEDORUK, Tomasz MANOWSKI

Porównanie różnych systemów chłodniczych w analizowanym obiekcie hotelowym – wskaźniki ekonomiczne
Comparison of the various air-conditioning systems in analysed hotel spaces – economics indices..... 95

Natalia STANKIEWICZ, Małgorzata LELUSZ

Nanotechnologia w budownictwie – przegląd zastosowań
Nanotechnology in civil engineering – application review 101

Mikołaj SYCZEWSKI, Genadij SHIROKIY, Pavel JUCHNEVSKIJ

Modyfikacja struktury żelu cementowego wskutek oddziaływania polimetyleno-naftalenosulfonianu sodu z hydratowaną powierzchnią alitu (C₃S)
Modification of cement gel structure by means of interaction between polyethylene-sodium sulfonate with hydrated alite (C3S) surface 113

Maciej SWIRYDZIUK

Wpływ temperatury i czasu prażenia na zawartość zaprawy w kruszywie recyklingowym
The influence of roasting temperature and time on a content of cement mortar in recycled aggregate 119

Dariusz TOMASZEWICZ

Wzmacnianie ścian zewnętrznych w budynkach wielkopłytowych
Reinforcing of the external wall in the buildings of large slab..... 125

PORÓWNANIE RÓŻNYCH SYSTEMÓW CHŁODNICZYCH W ANALIZOWANYM OBIEKCIE HOTELOWYM – WSKAŹNIKI EKONOMICZNE

Katarzyna GŁADYSZEWSKA-FIEDORUK*, Tomasz MANOWSKI

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

Streszczenie: W pracy przedstawiono koszty inwestycyjne i eksploatacyjne wybranych systemów chłodniczych w różnym okresie życia układów oraz czas zwrotu inwestycji. Porównując zaprezentowane w wymienionym artykule układy należy zauważyć przewagę systemu opartego na bezpośrednim odparowaniu czynnika chłodniczego w przypadku każdego z trybów pracy (cyklu grzania, chłodzenia oraz cyklu mieszanego – grzania i chłodzenia). Pewnym zaskoczeniem są niższe koszty ogrzewania za pomocą systemu freonowego, ponieważ wydawałoby się że ciepło sieciowe w połączeniu z wodą lodową będzie tańsze. Różnica w kosztach inwestycyjnych prezentowanych układów klimatyzacji w obiekcie biurowym dochodzi do 100%. Najniższe koszty inwestycyjne ma układ z wodą lodową. Można zauważyć, że na przestrzeni 15 lat, czyli czasu przyjmowanego jako czas „życia” produktu, oszczędności mogą wynieść od 500 tysięcy do 1 milion złotych w wypadku wybrania systemu freonowego dla tego samego obiektu.

Słowa kluczowe: klimatyzacja, freon, woda lodowa.

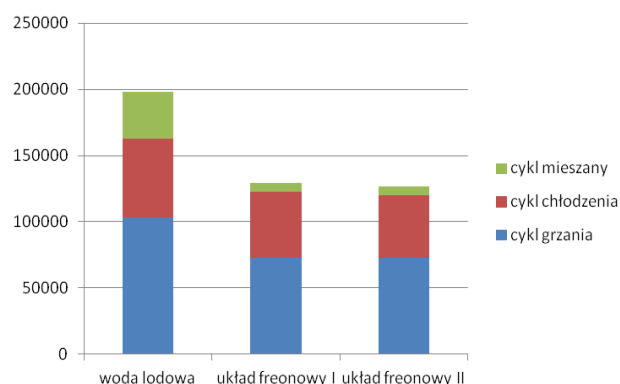
1. Wprowadzenie

Analizowane w pracy systemy chłodnicze zostały szczegółowo opisane w wcześniejszej publikacji autorów (Gładyszewska-Fiedoruk i Manowski, 2014). Klimatyzacja oparta na wodzie lodowej ma możliwość tylko chłodzenia powietrza, po uwzględnieniu dostarczenia ciepła sieciowego układ może również ogrzewać powietrze. Układy rozbudowane freonowe – układ I – współpraca z odzyskiem ciepła, układ II – współpraca systemu z pompą ciepła, mają możliwość zarówno chłodzenia, jak i grzania powietrza w zależności od potrzeb eksploatacyjnych.

Celem pracy jest pokazanie wskaźników ekonomicznych dla analizowanych systemów chłodzenia. Biorąc pod uwagę rachunek kosztów należy zestawić go z nakładami inwestycyjnymi. Pozwoli to ocenić opłacalność całej inwestycji i da obraz ogólnej opłacalności stosowania jednego z zaprezentowanych systemów. W porównaniu z oceną zalet i wad przedstawionych rozwiązań powinno się uzyskać kompleksową ocenę porównawczą systemu wody lodowej i freonu.

2. Porównanie wskaźników ekonomicznych

Zebrane dane dotyczące szacowanych kosztów użytkowania każdego z systemów w skali roku pokazano w tabelach 1-3. Dane zawierają w sobie koszty energii elektrycznej zużywanej przez cały system wraz z urządzeniami towarzyszącymi, a także – w przypadku wody lodowej, koszty ciepła sieciowego z SPEC Warszawa (rys. 1).



Rys. 1. Koszty eksploatacji w ciągu jednego roku z podziałem na cykle pracy w PLN

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: k.gladyszewska@pb.edu.pl

Tab. 1. Koszty eksploatacyjne – cykl chłodzenia w PLN

Czynnik chłodzący	Koszt rocznej eksploatacji	Różnica na korzyść układów freonowych
Woda lodowa	103.280	
Układ freonowy I	72.910	30.370
Układ freonowy II	72.560	30.720

Tab. 2. Koszty eksploatacyjne – cykl grzania w PLN

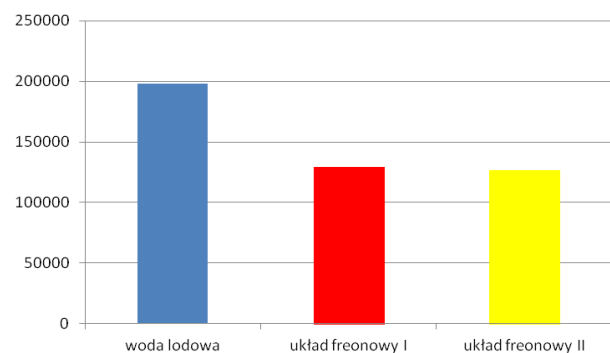
Czynnik chłodzący	Koszt rocznej eksploatacji	Różnica na korzyść układów freonowych
Woda lodowa	59.240	
Układ freonowy I	49.660	9.580
Układ freonowy II	47.160	12.080

Tab. 3. Koszty eksploatacyjne – cykl mieszany – okres przejściowy w PLN

Czynnik chłodzący	Koszt rocznej eksploatacji	Różnica na korzyść układów freonowych
Woda lodowa	35.740	
Układ freonowy I	7.000	28.740
Układ freonowy II	6.970	28.770

W przypadku wody lodowej uwzględniono koszt ciepła sieciowego w wysokości 52.034 PLN netto w cyklu grzania, oraz w wysokości 20.574 PLN netto w cyklu przejściowym.

W tabeli 4 i na rysunku 2 podano dane dotyczące szacowanych kosztów użytkowania każdego z systemów w skali całego roku z uwzględnieniem wszystkich wymienionych wcześniej kosztów.

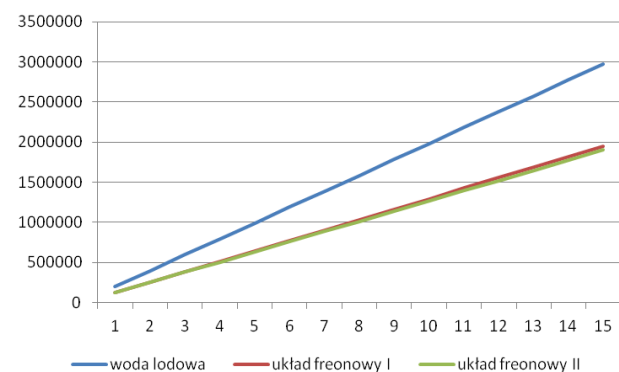


Rys. 2. Zbiorcze koszty eksploatacji w ciągu jednego roku w PLN

Dane pokazują przewagę systemu opartego na bezpośrednim odparowaniu czynnika chłodniczego właściwie w przypadku każdego z trybów pracy. Pewnym zaskoczeniem są niższe koszty ogrzewania za pomocą

systemu freonowego, ponieważ wydawałoby się że ciepło sieciowe w połączeniu z wodą lodową będzie tańsze, ze względu na koszt GJ z SPEC Warszawa oraz ogólnie panujący pogląd na temat cen ogrzewania miejskiego (Müller i Skrzyniowska, 2006; Jones, 2001).

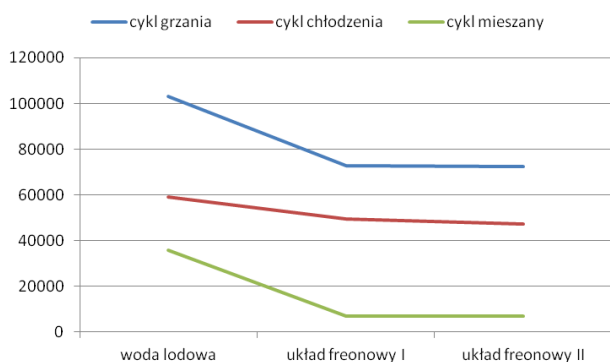
Można zauważyć, że nie ma znaczącej różnicy pomiędzy kosztami systemu typu „pompa ciepła” i „odzysk ciepła”, w takim wypadku o ewentualnej przewadze ekonomicznej którejkolwiek z systemów powinny świadczyć koszty inwestycyjne (rys. 3 i 4).



Rys. 3. Koszty eksploatacji w ciągu 15 lat w PLN

Tab. 4. Podsumowanie kosztów eksploatacji w PLN

Czynnik chłodzący	Koszt rocznej eksploatacji	Różnica na korzyść układów freonowych
Woda lodowa	198.240	—
Układ freonowy I	129.570	68.690
Układ freonowy II	126.690	71.570



Rys. 4. Poszczególne udziały sezonów chłodzenie-grzanie – okres przejściowy dla każdej z opcji w skali jednego roku w PLN

Warto tu wspomnieć o najczęstszym błędzie inwestorów podczas postępowań ofertowych, przetargowych, czyli – nieuwzględnianiu kosztów eksploatacji i trzymaniu się kryterium: „100% cena”. W przedstawianym przypadku można w uproszczeniu założyć, że koszt zakupu systemu opartego na freonie mógłby być przynajmniej o 0,5 milionów złotych wyższy na początku, a i tak inwestor „odzyskałby” swoje środki na przestrzeni czasu.

3. Porównanie nakładów i kosztów

Można stwierdzić, że systemy freonowe współpracujące z różnego typu urządzeniami do odzysku ciepła są tańsze w eksploatacji niż systemy wody lodowej uzupełnione o możliwość grzania powietrza. Składa się na to przede wszystkim:

- brak dodatkowych urządzeń elektrycznych w instalacjach freonowych,
- wyższa sprawność urządzeń freonowych przekładająca się na wskaźniki COP i EER,
- zaawansowana automatyka agregatów freonowych, pozwalająca na szybszą reakcję na sygnały z czujników temperatury w pomieszczeniach,
- czynnik chłodniczy o znacznie większej pojemności cieplnej, co przekłada się na czas pracy sprężarki agregatu chłodniczego,
- brak elementów pośrednich w wymianie ciepła obniżających ogólną sprawność systemu – są to systemy z bezpośrednim odparowaniem czynnika chłodniczego.

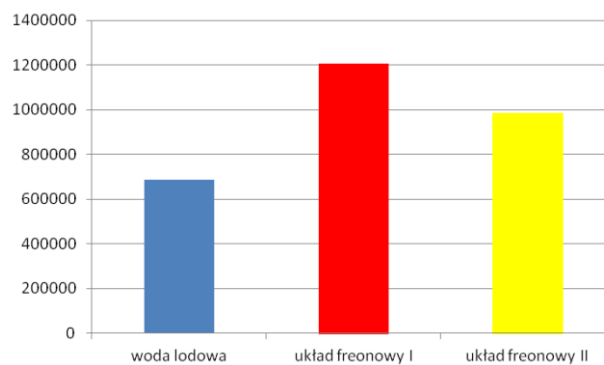
Należy zauważyć, że w projektowanym systemie wody lodowej nie wykorzystano możliwości, jakie daje woda

lodowa, to jest połączenia z istniejącym systemem grzewczym budynku. Taka możliwość nie została przewidziana przez inwestora, a wpłynęłaby na sprawność i koszt ogrzewania w sezonie grzewczym, a co za tym idzie na obniżenie kosztów eksploatacji (Porowski i Szczehowiak, 1999 i 2006).

Z danych zebranych w trakcie przygotowywania koncepcji projektowych koszt całości systemów został obliczony na podstawie ofert kosztorysowych producentów urządzeń wraz z uwzględnieniem wszystkich możliwych składników, to jest:

- koszt urządzeń – agregaty, jednostki wewnętrzne, podstawowe sterowanie ściennie lub bezprzewodowe, moduły hydrauliczne, pompy obiegowe, zawory na instalacji – według przedmiaru,
- koszt instalacji – rur miedzianych lub stalowych wraz z otuliną – według przedmiaru,
- koszty montażowe – trójniki, łączniki, zawiesia ściennie i sufitowe, taśmy montażowe, podstawy i ramy dla urządzeń – szacunkowo,
- koszty montażu określone przez firmy instalacyjne z Warszawy.

Cena końcowa nie zawiera marży firm instalacyjnych, co częściowo zostanie skompensowane przez zastosowanie ceny kosztorysowej urządzeń. Wartości netto przedstawiono w tabeli 5 i na rysunku 5.

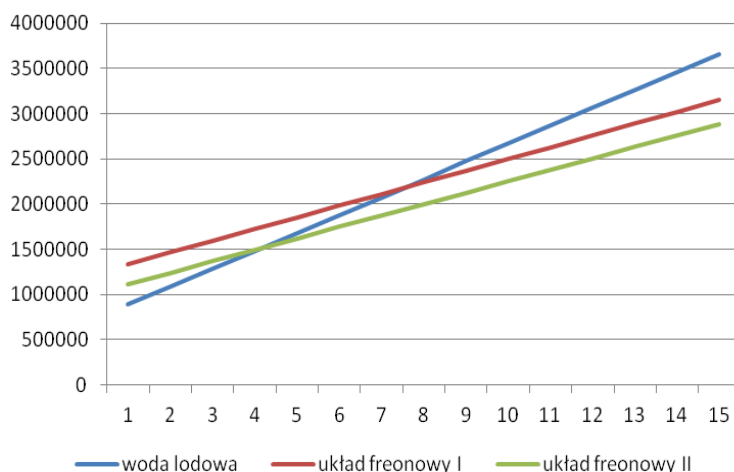


Rys. 5. Koszty inwestycyjne w PLN

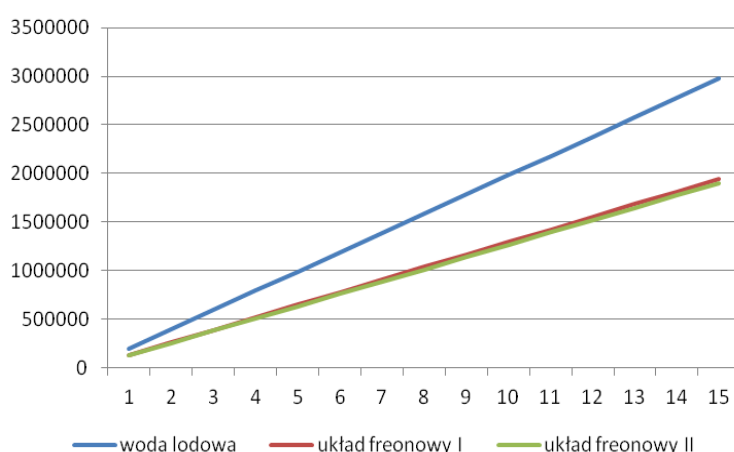
Uproszczoną kalkulację czasu zwrotu z inwestycji, pojmowanego jako czas potrzebny do zrównoważenia zwiększonych nakładów poniesionych na oszczędniejszy system dla 15-letniego okresu eksploatacji, przedstawiono na rysunku 6 i 7.

Tab. 5. Wartość netto analizowanych systemów w PLN

	koszt rocznej eksploatacji	różnica na korzyść układów freonowych
Woda lodowa	687.253	
Układ freonowy I	1.205.078	-517.825
Układ freonowy II	986.551	-299.298



Rys. 6. Porównanie zwrotu z inwestycji na przestrzeni lat w PLN



Rys. 7. Porównanie kosztów analizowanych systemów w okresie 15 lat w PLN

Wyraźnie widać, że po 5-7 latach (w zależności od wybranego rodzaju systemu freonowego) niższe koszty eksploatacji zrównoważą wyższe koszty zakupu i instalacji. Na następnym wykresie przedstawiono bezpośrednie porównanie kosztów pomiędzy trzema systemami (Air Products, 2013).

Można zauważyć, że na przestrzeni 15 lat, czyli czasu przyjmowanego jako czas „życia” produktu oszczędności mogą wynieść od 500 tys. zł do 1 mln zł. Są to pieniądze, które pozostaną u inwestora w wypadku wybrania systemu freonowego.

4. Podsumowanie

Przedstawione dane ekonomiczne pozwalają na stwierdzenie, że systemy freonowe bezsprzecznie stanowią lepsze rozwiązanie niż odpowiadające im systemy wody lodowej.

Wykazano, że dla prezentowanych rozwiązań systemy freonowe są efektywniejsze, sprawniejsze energetycznie i tańsze w eksploatacji. Nie bez znaczenia jest ich zerowy potencjał niszczenia warstwy ozonowej. Automatyka pozwala na znacznie większą kontrolę nad systemem i jest znacznie bardziej rozbudowana. Producentom pozostaje

jedynie zwiększanie dostępnych mocy agregatów i stałe doskonalenie pod kątem współczynników energetycznych (Lampe i in., 1981; Recknagel i Sprengel, 2009).

Natomiast woda lodowa nadal będzie znajdowała swe zastosowanie wszędzie tam, gdzie układ można połączyć z obiegiem grzewczym, czy wodnym budynku, a także tam, gdzie istotną rolę odgrywają koszty inwestycyjne.

Prezentowana analiza ma na celu przedstawienie wad i zalet zaprezentowanych rozwiązań, które pomogą w podejmowaniu decyzji przyszłym inwestorom. Zaprezentowano kilka poziomów inwestycji, na które należy zwrócić uwagę podejmując ostateczną decyzję.

Literatura

- Gładyszewska-Fiedoruk K., Manowski T. (2014). Charakterystyka wybranych systemów chłodniczych w pomieszczeniach biurowych. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, Vol. 5, Nr 1, 7-13.
- Jones W.P. (2001). Klimatyzacja. *Arkady*, Warszawa.
- Lampe G., Pfeil A., Schmittlutz R., Tokarz M. (1981). Projekt klimatyzacji a projekt budynku. *Arkady*, Warszawa.

- Müller J., Skrzyniowska D. (2006). Wady i zalety stosowania klimatyzacji komfortu – cz. II – systemy klimatyzacji. *Chłodnictwo & Klimatyzacja*, 6/2006.
- Porowski M., Szczechowiak E. (2006). Klimatyzacja z chłodnictwem. *Inżynieria Środowiska*, 07/2006.
- Porowski M., Szczechowiak E. (1999). Klimatyzacja pomieszczeń czystych. *Wyd. TerMedia*.
- Recknagel/Sprengel (2009). Ogrzewanie i klimatyzacja. *Poradnik*. *Wyd. EWF* 2009.
- Air Product Sp. z o.o. (2013). Katalog czynników chłodniczych. *Air Product Sp. z o.o.*

COMPARISON OF THE VARIOUS AIR-CONDITIONING SYSTEMS IN ANALYSED HOTEL SPACES – ECONOMICS INDICES

Abstract: The paper focuses on the investment costs and operating costs at different life systems and time. Return on investment have been shown too. By comparing the settings, it should be noted the advantage of a system based on direct evaporation of the refrigerant in the case of each of the operating modes. A surprise is lower heating cost by using freon system, because it would seem that the heat, combined with the ice water network will be cheaper. The difference in investment costs of presents systems comes to 100%. The lowest investment cost has stated for system with ice water. It can be observed that over 15 years, i.e. time necessary as a time of "life" of the product savings could amount from PLN 500 thousand to PLN 1 million in the case of freon system for the same object.

Praca naukowa realizowana w ramach prac finansowanych przez Politechnikę Białostocką – S/WBiŚ/4/2014.

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.

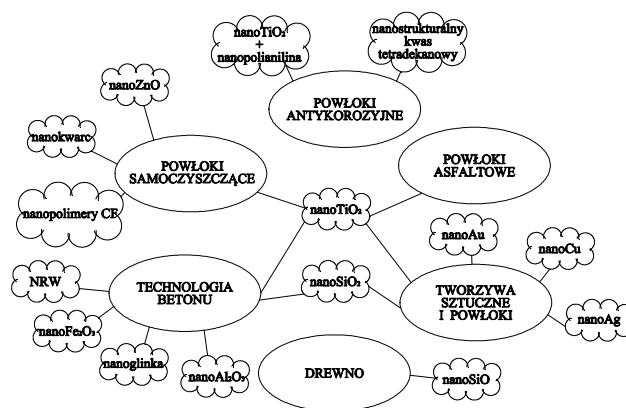
Słowa kluczowe: nanotechnologia, nanomateriały, nanomodyfikacje, nanoproducty.

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)
Nanocząsteczki tlenku krzemu	Preparat gruntujący	(Danielewska i in., 2007; www.basf.pl)
	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).

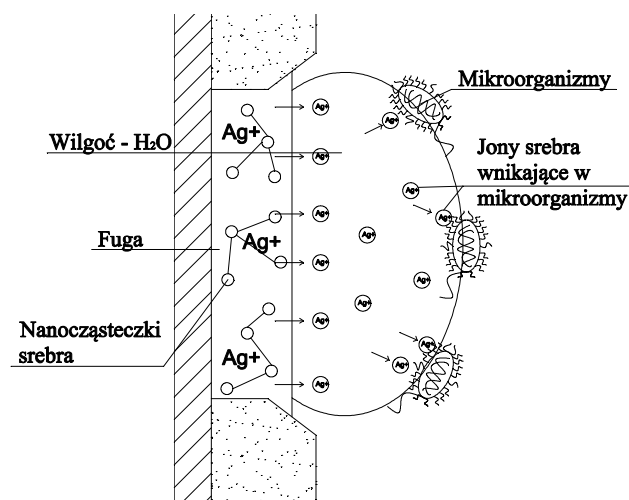
Opracowano również farby antibakteryjne (Langer i Langer, 2009a), które dopiero podczas wysychania samoistnie aktywują antyseptyczne nanocząstki metali. Nienasycone kwasy tłuszczowe obecne w farbie, pozwalają na przekształcenie się soli srebra i złota w bakteriobójcze nanodrobinki tych metali. Gdy w 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 rozprzewodzą 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 podłoża mineralnych, kamieni naturalnych, marmuru, gazobetonu, cegieł, dachówek, betonu czy klinkieru (van Broekhuizen i van Broekhuizen, 2009).

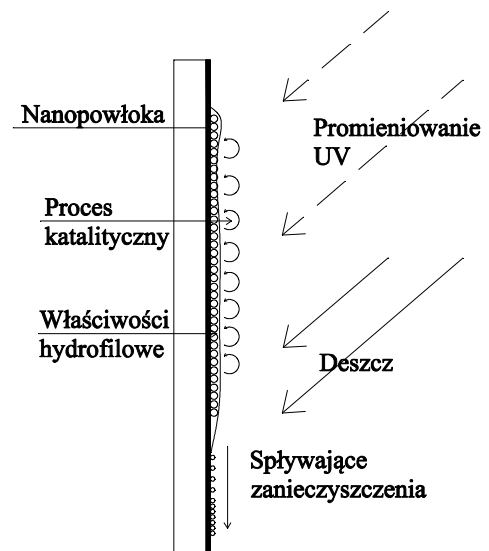
Wykorzystując nanotechnologię opracowano powłoki na bazie miceli. Micele mają średnicę około kilku nanometrów i składają się średnio z 30 do 100 molekuł. Te stabilne cząsteczki o kulistym kształcie, pochłaniają brud i zanieczyszczenia do swojego wnętrza. Obszar miceli można podzielić na dwie części. 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 tlenu 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 przeprowadzono 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 nanocząsteczek 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).

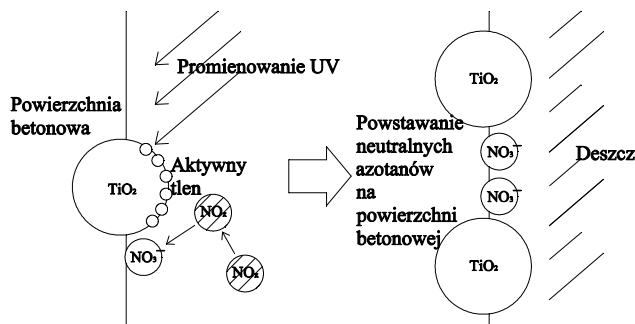
W betonach modyfikowanych polimerami korzystny może być nanomonitoring rozmieszczenia polimeru. Polimer, jeśli wprowadza się go w standardowy sposób, mostkuje potencjalne rysy na poziomie mikrometrycznym. Dodanie polimeru w ilości około 10% masy cementu sprawia, że wytrzymałość na rozciąganie wzrasta 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 rys 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 własnościami 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).

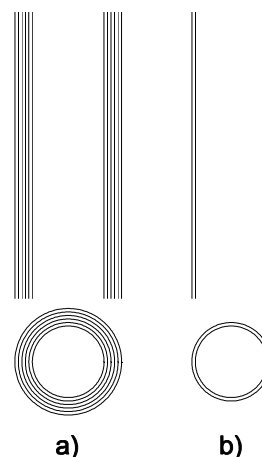
Nanotechnologia może być również stosowana w betonach ogniotrwałych oraz innych materiałach cementowych. Antonovič i inni (2010) opisuje wpływ nanostrukturalnych formacji materiałów wiążących przy produkcji betonów ogniotrwałych. Ograniczona ilość wody w utwardzonej strukturze zapewnia warunki do tworzenia 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 zacinu 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 nanomodifikacji 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.

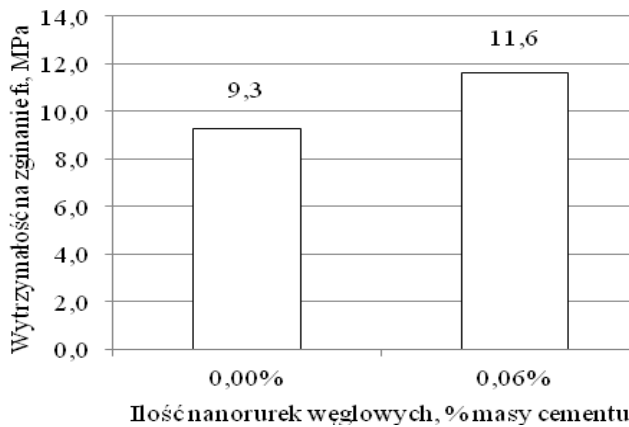
W wyniku przeprowadzonych badań ustalono, że użycie mieszadła magnetycznego spowodowało wzrost wytrzymałości zaprawy nie zawierającej dodatku nanocząsteczek o ponad 2%, natomiast zaprawy, do których dodawano nanorurki węglowe wykazały wytrzymałość większą nawet o 18%. Przeprowadzone badania wstępne pozwoliły na wytypowanie jako najefektywniejszej domieszki, domieszkę (d3) upłynniającą 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.

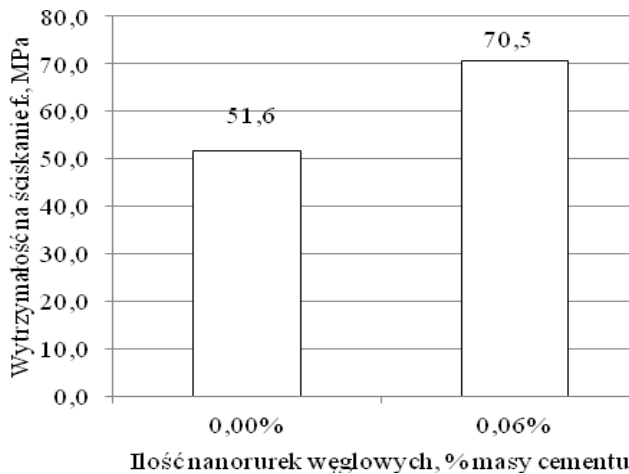
Przeprowadzone badania wykazały korzystny wpływ nanorurek węglowych na wytrzymałość na zginanie oraz wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych (rys. 6 i 7). Wytrzymałość na zginanie próbek zaprawy cementowej wzrosła o 24,7% w wyniku zastosowania nanocząsteczek w ilości 0,06% masy cementu. Natomiast 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. Aerozele, 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 TiO_2 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.

MODYFIKACJA STRUKTURY ŻELU CEMENTOWEGO WSKUTEK ODDZIAŁYWANIA POLIMETYLENO-NAFTALENOSULFONIANU SODU Z HYDRATOWANĄ POWIERZCHNIĄ ALITU (C₃S)

Mikołaj Syczewski^{a*}, Genadij Shirokiy^b, Pavel Juchnevskij^b

^a Wydział Techniczny, Wyższa Szkoła Agrobiznesu w Łomży, ul. Studencka 19, 18-402 Łomża

^b Faculty of Civil Engineering, Belarussian National Technical University, Niezavisimosty 150/15, Mińsk, Białoruś 220013

Streszczenie: Wprowadzenie domieszek chemicznych do materiałów cementowych przyczynia się do powstawania defektów w sieci krystalicznej hydrokrzemianów wapnia i powstawania struktury stopniowej, co prowadzi do zakłóceń ruchu dyslokacji i zwiększenia wytrzymałości kompozytu.

Słowa kluczowe: modyfikacja struktury żelu cementowego, domieszki chemiczne do betonu.

Struktura żelu cementowego tworzy się ze związków powstających w wyniku hydratacji klinkieru cementowego, a przede wszystkim krzemianu wapnia (około 75% objętości). Krzemian trójwapniowy jest głównym minerałem klinkieru portlandzkiego (gdzie znajduje się w postaci minerału zwanego alitem w ilości 45 - 65%) (Taylor, 1996). W alicie niektóre atomy krzemu zastąpione są atomami glinu, a dla skompensowania ładunku między nimi w odstępach znajdują się atomy magnezu. Takie zastępstwo zachodzi w co 18-tej cząsteczce C₃S, co pozwoliło na zaproponowanie formuły alitu – C₅₄Si₁₆AlMg. Siatka krystaliczna składa się z izolowanych tetraedrów [SiO₄]⁴⁻, jonów Ca²⁺ i O²⁻. Wprowadzony w siatkę jon Mg²⁺ zastępuje jon Ca²⁺, a Al³⁺ – Si⁴⁺ i Ca²⁺.

W technologii betonu szeroko wykorzystywane są domieszki chemiczne, które pozwalają uzyskać lepsze charakterystyki techniczne betonu. Przykładowo, w Rosji połowę spośród wszystkich domieszek stanowi produkcja polimetylenonaftalenosulfonianowego superplastyfikatora C-3 i domieszek kompleksowych. Domieszkę C-3 stanowi mieszanina polimetylenonaftalenosulfonianów sodu – PNS (Batrakov, 1998).

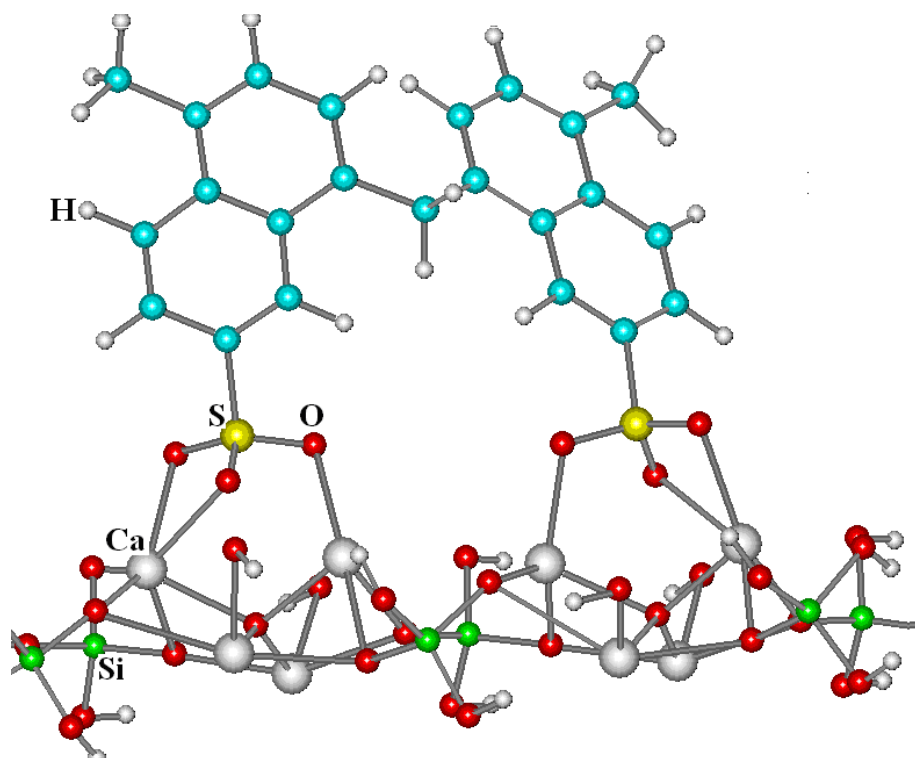
Uwodnione krzemiany wapnia w postaci żelu zapewniają wytrzymałość, trwałość i nieprzepuszczalność sztucznego kamienia. Z tego powodu, badania procesu wzajemnego oddziaływania domieszek uplastyczniających z uwodnionym krzemianem trójwapniowym ma duże znaczenie praktyczne w celu poznania mechanizmu uplastycznienia kompozytów cementowych, regulowania procesów wiązania i twardnienia oraz dla zapewnienia długotrwałej wytrzymałości materiałów w konstrukcjach. Ważne jest, aby wyjaśnić cechy struktury, na które

oddziałują domieszki chemiczne (modyfikatory) o różnej molekularnej i strukturalnej konformacji.

Tego typu informacje można uzyskać za pomocą modelowania molekularnego metodami kwantowo-chemicznymi. Wcześniejsze nieempiryczne kwantowo-chemiczne obliczenia autorów (Juchnevskij i in., 2010) wykonane zostały dla oddziaływania molekuł wody i plastifikatora – polimetylenonaftalenosulfonianu (PNS) sodu z powierzchnią alitu. Ustalono, że w środowisku wodnym sól sodowa dysocjuje i tworzące się hydratowane jony oddziałują z alitem oddzielnie. Przy tym, jon sodu hydratowany jest kilkoma molekułami wody i praktycznie oddziałuje z alitem, tak jak i wolna woda. Dzieje się tak z kilku przyczyn. Po pierwsze, dodatni ładunek hydratowanego kompleksu jest ekranowany przez tworzącą się sferę hydratowaną. Po drugie, molekuły wody tworzące daną sferę są sztywno zorganizowane, przez co nie mogą osiągnąć najkorzystniejszej pozycji do interakcji (rys. 1).

Jak wynika z rysunku 1, jedna grupa sulfonowa oddziałuje z dwoma sąsiednimi atomami wapnia na powierzchni. Przy tym, jeden z jonów wapnia powiązany jest z dwoma atomami tlenu grupy sulfonowej, a sąsiedni z jednym. Obliczenia kwantowo-chemiczne wykazują, że domieszka C-3 znacznie bardziej wiąże się z powierzchnią alitu niż cząsteczki wody i może powodować wypieranie jej z tej powierzchni.

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: mikołaj.syczewski@interia.pl



Rys. 1. Schemat oddziaływania hydratowanej powierzchni krzemianu trójwapieniowego z cząsteczką polimetylenonaftalenosulfonianowego superplastyfikatora C-3

Jak wiadomo, przy współdziałaniu cząsteczek wody z cząsteczkami cementu na ich powierzchni tworzy się warstwa solwacyjna, składająca się z warstwy adsorbcyjnej (bezpośrednio na powierzchni cząstek) i dyfuzyjnej (Ramachandran i in., 1996; Vovk, 2000). Grubość warstwy powłoki solwacyjnej zależy od mineralnego składu cementu, rozmiaru i kształtu cząstek, składu chemicznego zaadsorbowanych jonów i warunków zewnętrznych (ciśnienia atmosferycznego i temperatury). Jeżeli zawartość wody przekracza ilość niezbędną do wykształcenia powłoki solwacyjnej, część jej utrzymuje się między solwatowanymi cząstkami i w porach cementowego żelu.

Cząsteczki domieszki plastyfikatorów w chwili początkowej interakcji minerałów cementu z wodą są równomiernie rozmieszczone w wodzie zarobowej. W czasie hydrolizy cementu w procesie chemisorpcji, cząsteczki domieszki superplastyfikatora, kosztem niezwiązanych z powierzchnią grup sulfonowych, tworzą wokół cząstek fazy stałej strukturalizowaną hydratacyjną warstwę i wypierają część cząsteczek wody na zewnątrz warstwy adsorbcyjnej do warstwy dyfuzyjnej, gdzie są słabiej związane i znacznie mniej uporządkowane. Energia wiązania wapnia z tlenem grupy sulfonowej jest dwukrotnie wyższa od energii wiązania wapnia z tlenem z cząsteczki wody, dlatego też woda jest wypychana.

Elektrostatyczna składowa plastyfikującego efektu domieszki, określona poprzez wielkość momentu dipolowego cząsteczki i energię wiązania grupy funkcjonalnej z hydratowaną powierzchnią cementu, zapewnia plastyfikujący efekt zarówno przez wypieranie cząsteczek wody z warstwy adsorbcyjnej na ziarnach

cementu, jak i przez oddziaływanie elektrostatyczne wolnych grup funkcyjnych w segmentach domieszki w warstwie dyfuzyjnej.

Uwzględniając dane o wielkości adsorpcji domieszki C-3 na minerałach cementu portlandzkiego (Vovk, 2000) przeprowadzono teoretyczne obliczenia strukturalnej interakcji w układzie krzemian trójwapienowy – woda – domieszka.

Między adsorpcją (Γ , mol/m²) a powierzchnią zajmowaną przez jeden mol substancji (ω) w monowarstwie istnieje związek:

$$\omega = 1/\Gamma \quad (1)$$

albo dla maksymalnej ilości substancji:

$$\omega_{\infty} = 1/\Gamma^{\infty} \quad (2)$$

Pole powierzchni zajmowanej przez jedną cząsteczkę substancji można wyznaczyć ze wzoru:

$$\omega_m = \frac{1}{\Gamma N_A} \quad (3)$$

gdzie N_A jest liczbą Avogadra o wartości $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$.

Grubość monowarstwy domieszki opisuje wzór:

$$\lambda = \frac{M}{\omega \delta} \quad (4)$$

gdzie: M jest masą cząsteczkową substancji w g/mol, zaś δ jest gęstością substancji (domieszki).

Stopień hydratacji C_3S w początkowych godzinach twardnienia wynosi 7-8%, a powierzchnia właściwa według Vovka (2000) jest proporcjonalna do stopnia hydratacji i wynosi około $0,83 \text{ m}^2/\text{g}$. Dla ilości domieszki (w stosunku do masy minerału C_3S) wynoszącej 0,8% wartość adsorpcji C-3 na uwodnionym C_3S wynosi $6,4 \text{ mg/g}$ (Vovk, 2000) lub $0,0043 \text{ mmol/m}^2$, a pole powierzchni, którą zajmuje jedna cząsteczka wynosi $38,6 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$. Pole powierzchni, które zajmuje jedna cząsteczka domieszki C-3, przy stopniu polikondensacji równym 2, według obliczeń kwantowo-chemicznych (Juchnevskij i in., 2010) wynosi $S = a \cdot b = 7,4 \text{ \AA} \cdot 6,3 \text{ \AA} = 46,6 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ lub nieco więcej. Różnice wynikają z faktu, że domieszka C-3 zawiera PNS o innym rozkładzie masy cząsteczkowej i odpowiednio innymi wielkościami cząsteczek. Ponadto, przy maksymalnej adsorpcji, cząsteczki SP są nie tylko ułożone równoległe do powierzchni, ale utrzymują się na niej tylko częściowo. Przy tym, część centrów aktywnych na powierzchni jest ekranowana pętlami i ogonami zaadsorbowanych cząsteczek. Ponieważ ilość miejsc aktywnych na powierzchni minerału jest ograniczona, a liczba zaadsorbowanych cząsteczek wzrasta, pole powierzchni do adsorpcji cząsteczki zmniejsza się.

W celu lepszego zrozumienia działania wzmacniającego domieszek plastyfikatorów na strukturę cementu w betonie, oprócz badania mechanizmu plastyfikacji, ważne jest określenie mechanizmu krystalizacji i zmian w składzie fazy. W związku z tym, aktualny staje się problem wpływu domieszek na dyspersyjno-krystaliczną strukturę kamienia cementowego na poziomie cząsteczkowym.

Rzeczywisty kryształ składa się z zespołu wielu małych kryształów, które są nazywane ziarnami albo krystalitami (Gusiev i Rampel, 2000). Ziarno nie jest monolitycznym kryształem zbudowanym ze ściśle równoległych warstw atomów. W rzeczywistości składa się ono jakby z mozaiki poszczególnych bloków, w których krystalograficzne płaszczyzny obrócone są w stosunku do siebie pod małym kątem. Taka struktura ziarna nazywana jest strukturą mozaikową, a jej elementy składowe nazywane są blokami mozaiki.

Wielkość małych cząstek może być określona za pomocą mikroskopu elektronowego, sedymentacji, spektroskopii korelacyjnej fotonów, adsorpcji gazowej, pomiarów magnetycznych i innych metod (Gusiev i Rampel, 2000). Jedną z najbardziej dostępnych i rozpowszechnionych metod określania wielkości krystalitów i mikronaprężeń w polikrystalicznych błonach jest analiza poszerzeń rentgenowskich linii dyfrakcyjnych. Wielkość krystalitów D może być określana za pomocą prostej formuły Scherrera (Gorelik i in., 1994):

$$D = \frac{0,9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (5)$$

gdzie: λ jest to długość fali promieniowania, θ jest kątem dyfrakcji (kątem Bragga), a β jest szerokością refleksu dyfrakcyjnego mierzona w połowie jego wysokości skorygowaną o stałą aparaturową b .

Badania hydratowanego C_3S metodą dyfrakcji rentgenowskiej przeprowadzono na zautomatyzowanym dyfraktometrze DRON-7 (NPP „Burewestnik” w Sant-Petersburgu) z promieniowaniem CuK_α (długość fali $0,154 \text{ nm}$ w warunkach geometrii Bragga-Brentano $0 - 2\theta$ (2θ - kąt Bragga)¹. Wartości prądu i napięcia na lampie rentgenowskiej wynosiły odpowiednio 20 mA i 40 kV . Do analizy eksperymentalnych wyników badań wykorzystano pakiet programów do wsparcia badań eksperymentalnych PDWin (LP "standard" TCP). Identyfikację faz krystalicznych przeprowadzono z użyciem bazy JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards*).

Do krzemianu trójwapienia dodawano wodę przy $W/C=1,0$ i wodę z domieszką superplastyfikatora C-3 w ilości 1% masy krzemianu trójwapienia. Po okresie 28 dni wiązania i twardnienia próbek w naturalnych warunkach temperatury i wilgotności, suszono je na powietrzu przy temperaturze $20-25^\circ\text{C}$, a następnie kruszono w moździerz agatowym i przesiewano. Rentgenogram hydratowanego C_3S przedstawiono na rysunku 2, a dyfraktometryczne charakterystyki prób krzemianu trójwapieniowego w tablicy 1.

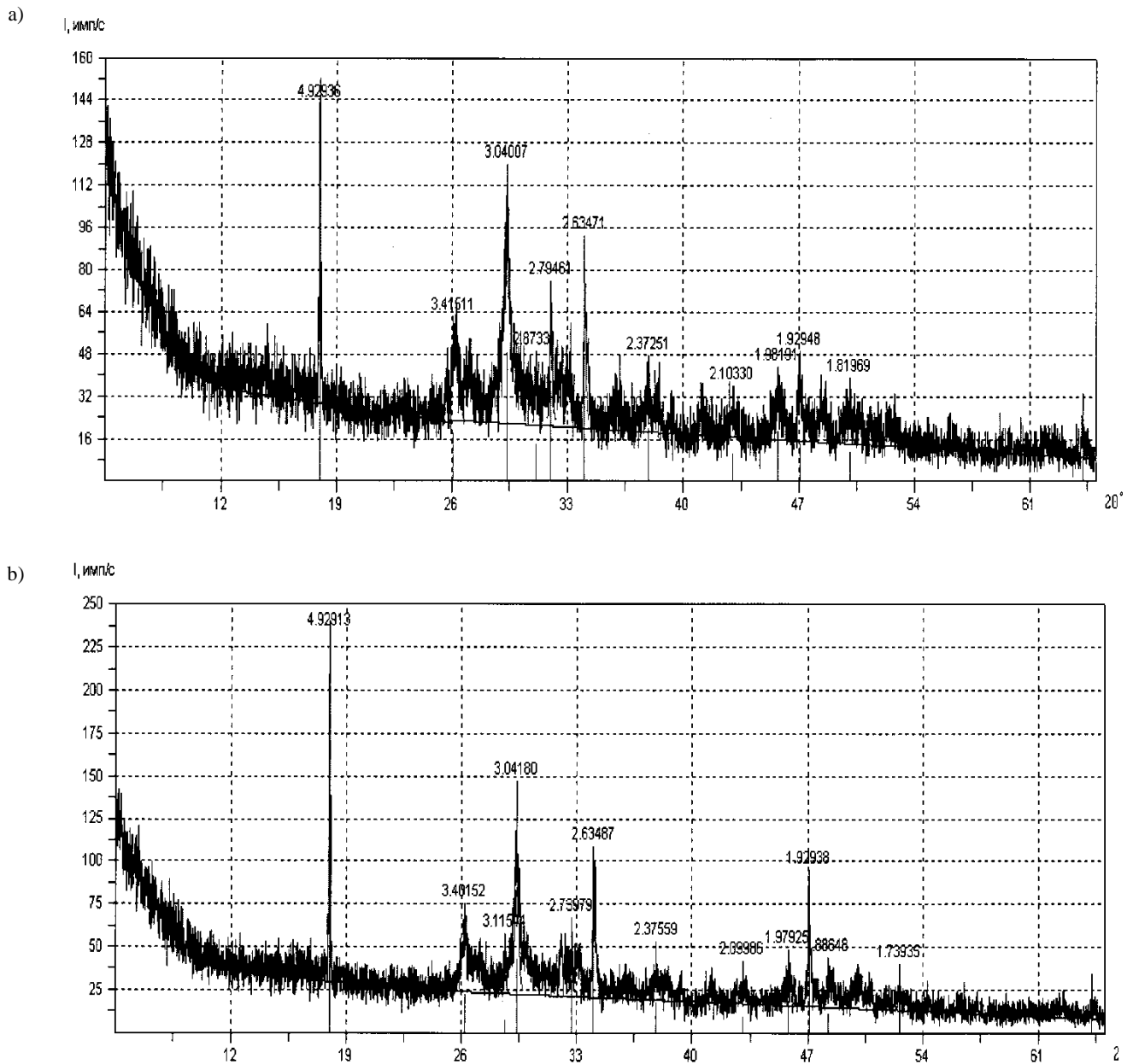
W procesie uwodnienia C_3S tworzą się hydrokrzemiany grupy C-S-H (I) typu tobermoryt i C-S-H (II) typu jennit. Dla C-S-H (I) charakterystyczne są piki z $d = 0,304 \text{ nm}$; $0,28 \text{ nm}$; $0,182 \text{ nm}$, a dla C-S-H (II) – $d = 0,340 \text{ nm}$; $0,283 \text{ nm}$; $0,183 \text{ nm}$ (Taylor, 1996). Rozmiary krystalitów obliczono na podstawie wzoru:

$$D = \frac{180\lambda}{\pi\beta \cos \theta} \quad (6)$$

gdzie: λ jest długością fali promieniowania, β jest szerokością połówkową piku na rentgenogramie (w radach), zaś θ jest kątem dyfrakcji.

Jak wynika z radiogramów (rys. 2), w próbce z domieszką wzrasta ilość C-S-H (I) – linia przy $d = 0,304$ i $0,28 \text{ nm}$ oraz maleje zawartość C-S-H (II) linia przy $d = 0,340 \text{ nm}$. Wraz z wprowadzeniem domieszki C-3 następuje zmniejszenie bloków mozaiki z $20-33 \text{ nm}$ do $15-17 \text{ nm}$, co prowadzi do znacznego wzrostu wytrzymałości twardniejącej struktury. Im mniejsze bloki mozaiki, tym większa jest ich aktywność chemiczna. Są one bardziej koherentnie związane z innymi fazami struktury i tym większą mają wytrzymałość. Kiedy bloki mozaiki są mocno zdezorientowane (obrócone względem siebie), to pod wpływem obciążenia zewnętrznego powstaje interferencja przemieszczeń i ich zanikanie. Taka interferencja wzmacnia strukturę.

¹ Badania przeprowadzono w NIL chemii fizycznej sylikatów naukowo-badawczego i projektowo-produkcyjnego republikańskiego przedsiębiorstwa (Instytut NIISM)

Rys. 2. Dyfraktogramy hydratowanego C_3S : a) bez domieszki, b) z domieszką 1% C-3Tab. 1. Dyfraktometryczne właściwości hydratowanego C_3S

Ilość domieszki	Dane eksperymentalne				
	Intensywność maximum pików α_1 , I_{max}	Położenie maximum pików α_1 , $2\theta_{max}$	Odległość międzypłaszczyznowa, d , nm	Szerokość połówkowa, rad	Rozmiar krystalitów, nm
Bez domieszki	22,9	26,17	0,340	0,449	20,16
	43,8	29,33	0,304	0,274	33,21
	18,8	31,99	0,279	0,140	-
	15,0	50,04	0,182	0,140	-
1% C-3	18,8	26,07	0,341	0,580	15,63
	48,9	29,35	0,304	0,515	17,67
	38,1	32,00	0,279	0,140	-
	11,9	50,08	0,182	0,140	-

Podsumowanie

Chemisorpcja polimetylenonaftalenosulfonianowego superplastyfikatora C-3 na powierzchni uwodnionego krzemianu trójwapniowego uwarunkowana jest wzajemnym oddziaływaniem jednej grupy sulfonowej z dwoma sąsiednimi atomami wapnia.

Przy tym, jeden z jonów wapnia związany jest z dwoma atomami tlenu grupy sulfonowej, a sąsiedni z jednym. Energia wiązań sulfogrupy w domieszce z powierzchnią krzemianu trójwapniowego jest znacznie większa od energii wiązań cząsteczek wody, które wypierane są z powierzchni cementowego minerału, co wspomaga plastyfikację układu.

W procesie adsorpcji nie wszystkie grupy funkcjonalne domieszki łączą się powierzchniowo. Część grup aktywnych i poszczególne segmenty domieszki są ukierunkowane w warstwę dyfuzyjną i przyczyniają się do tworzenia jego przestrzennej struktury.

Łańcuchy boczne i segmenty domieszek na skutek lateralnych oddziaływań wnoszą swój wkład w całkowitą energię sił interakcji w cementowo-wodnej kompozycji i odpowiednio do efektu plastyfikacji systemów cementowych.

Literatura

- Batratov W.G. (1998). Modificirovannye betony. Teoria i praktika. *Strojizdat*. Moskva.
- Gorelik S.S., Skakov J.A., Rasforgujev L.N. (1994). Rentgenograficheskij i elektronno-opticheskij analiz. *MISiS*. Moskva.
- Gusiev A.I., Rampel A.A. (2000). Nanokristalicheskie materialy. *Fizmatlit*. Moskva.
- Juchnevskij P.I., Zielenkovskij W.M., Soldatov W.S. (2010). Kvantovo-chimiczeskoje modelirovanije wzaimodejstvija polimetilennaflalinsulfonatov natria (dobavka C-3) s idrotirovannoj povierchnostju alita (C3S). *Technologia betonov*, Nr 5-6.
- Ramachandran W., Feldman R., Boduen J. (1996). Nauka o betonie. *Strojizdat*. Moskva.
- Taylor Ch. (1996). *Chimia cementa*. *Mir*. Moskva.
- Vovk A.I. (2000). Mechanizm adsorbicii superplastifikatorov na silikatnych i aluminatnych komponentach portlandcementsa. *Kolloidnyj žurnal*, Tom 62, Nr 3.

MODIFICATION OF CEMENT GEL STRUCTURE BY MEANS OF INTERACTION BETWEEN POLYETHYLENE-SODIUM SULFONATE WITH HYDRATED ALITE (C₃S) SURFACE

Abstract: Insertion of chemical admixtures to cement materials contributes in creation of defects in crystalline grid of calcium hydrosilicates and formation of alloy structure, which finally leads to interference in dislocation flow and increase in the composite strength.

WPŁYW TEMPERATURY I CZASU PRAŻENIA NA ZAWARTOŚĆ ZAPRAWY W KRUSZYWIE RECYKLINGOWYM

Maciej SWIRYDZIUK*

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

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań kruszywa recyklingowego frakcji 4/16 mm, które zostało poddane prażeniu w piecu ceramicznym. Dokonano mechanicznego odspojenia zaprawy cementowej od kruszywa w bębnie Los Angeles w celu uzyskania kruszywa wolnego od zaprawy cementowej. Wyniki badań wykazują, że można uzyskać kruszywo wtórne pozbawione zaprawy cementowej o jakości technicznej nie gorszej niż kruszywo naturalne.

Słowa kluczowe: kruszywo z recyklingu, recykling betonu, obróbka termiczna kruszywa, temperatura prażenia.

1. Wprowadzenie

Beton jest materiałem kompozytowym, który poprzez swoją uniwersalność znajduje powszechne zastosowanie w wielu gałęziach współczesnego budownictwa. Należy nadmienić, że kruszywo jest znaczącym składnikiem betonu i warunkuje wiele jego ważnych cech. W związku z tym, że objętość absolutna kruszywa w betonie zwykłym wynosi około 60-75%, właściwości fizyczne i mechaniczne kruszywa w sposób znaczący przekładają się na jakość techniczną betonu (Jamroży, 2000). Norma PN-EN 12620:2004 *Kruszywa do betonu*, definiuje kruszywo recyklingowe, określając je jako kruszywo powstałe w wyniku przeróbki nieorganicznego materiału zastosowanego uprzednio w budownictwie. Beton jest idealnym materiałem wtórnym nadającym się do kolejnego wykorzystania po odpowiedniej obróbce technologicznej.

Kruszywo recyklingowe powstałe z przekruszenia betonu ma gorsze właściwości w porównaniu z kruszywem naturalnym (Casuccio i in., 2008). Obniżoną jakość uzasadnia obecność w jego składzie 25-60% zaprawy cementowej (Hansen i Narud, 1983). Przylegająca zaprawa w dużej mierze przyczynia się do obniżenia gęstości kruszywa. Ponadto, kruszywo z recyklingu odznacza się dużą porowatością, wchłania znaczne ilości wody, co utrudnia projektowanie mieszanki

betonowej oraz kontrolowanie jej urabialności (Bołtryk i Pawluczuk, 2011). Skutecznym działaniem w celu poprawienia ich właściwości mogą być dodatkowe zabiegi technologiczne, na przykład prażenie. Taki zabieg ma na celu dehydrację zaprawy cementowej, co ułatwia jej odspojenie od kruszywa.

Przedmiotem badań było kruszywo wtórne uzyskane w wyniku recyklingu słupów prefabrykowanych. Kruszywo frakcji 4/16 mm zostało poddane prażeniu. Celem tego procesu było wykazanie, że można uzyskać kruszywo wtórne pozbawione zaprawy cementowej o jakości technicznej nie gorszej niż kruszywo naturalne.

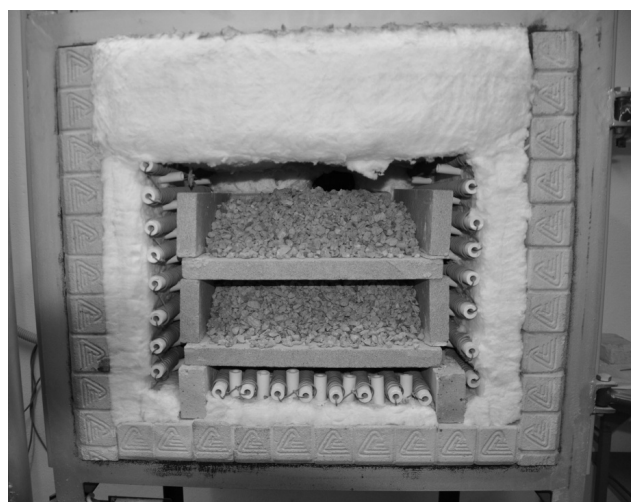
2. Metodologia badań własnych

Celem badań było uzyskanie informacji o wpływie czasu i temperatury prażenia na ilość odseparowanej zaprawy cementowej z ziaren kruszywa. Do badania użyto gruzu pochodzącego ze wstępnego rozkruszenia prefabrykowanych słupów żelbetowych znanego pochodzenia (rys. 1). Kruszywo wtórne zostało poddane dalszemu rozdrobieniu w kruszarce szczękowej do momentu uzyskania frakcji 4/16 mm. Frakcję kruszywa poniżej 4 mm potraktowano jako odpad technologiczny i nie wykorzystano w dalszych procesach. Prażenie kruszywa wtórnego wykonano w elektrycznym piecu ceramicznym (rys. 2).

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: maciej.swirydziuk@gmail.com



Rys. 1. Wstępne kruszenie słupów prefabrykowanych użytych w badaniu



Rys. 2. Proces prażenia kruszywa recyklingowego w elektrycznym piecu ceramicznym

Opracowano dwuczynnikowy plan eksperymentu polisekcyjno-rotalno-quasi-uniformalny dla dwóch wielkości wejściowych, w którym liczba obiektów doświadczalnych $n = 10$ (...). Jest to jeden z typów planów centralnych kompozycyjnych. Określa go ustalona liczba kombinacji wartości unormowanych, kodowanych, wynoszących: $0, \pm 1, \pm 1,414$. Zbiór wielkości wejściowych tworzą dwie zmienne niezależne na pięciu poziomach zmienności:

- X_1 – temperatura prażenia: 400, 459, 600, 741, 800 [°C]
- X_2 – czas prażenia: 30, 36, 50, 64, 70 [min].

Wartości kodowane zmiennych wejściowych przedstawiono w tabeli 1.

Układ punktów badawczych w przyjętym planie eksperymentu przedstawiono na rysunku 3, a macierz eksperymentu dla wartości kodowanych – w tabeli 2.

Funkcji obiektu została zapisana w postaci wielomianu drugiego stopnia:

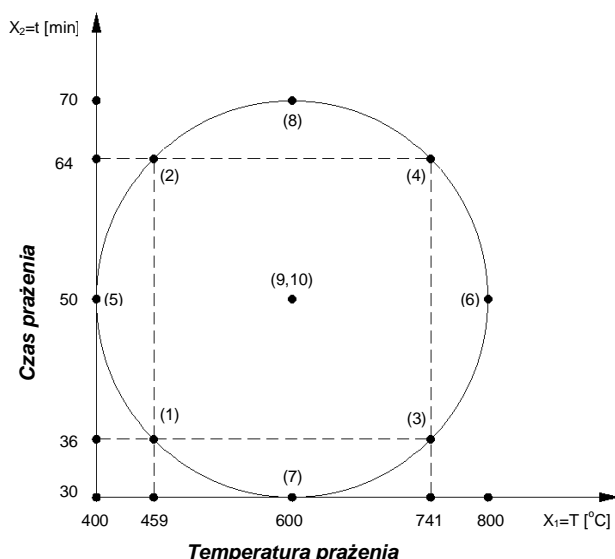
$$z = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 \quad (1)$$

Tab. 1. Wartości kodowane zmiennych wejściowych

X_1 – temperatura prażenia		X_2 – czas prażenia	
400°C	-1,414	30 min	1,414
459°C	-1	36 min	-1
600°C	0	50 min	0
741°C	+1	64 min	+1
800°C	+1,414	70 min	+1,414

Tab. 2. Macierz eksperymentu dla wartości kodowanych

Lp	X_1	X_2	$X_1 X_2$	X_1^2	X_2^2
1	-1	-1	+1	+1	+1
2	-1	+1	-1	+1	+1
3	+1	-1	-1	+1	+1
4	+1	+1	+1	+1	+1
5	-1,414	0	0	+2	0
6	+1,414	0	0	+2	0
7	0	-1,414	0	0	+2
8	0	+1,414	0	0	+2
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0



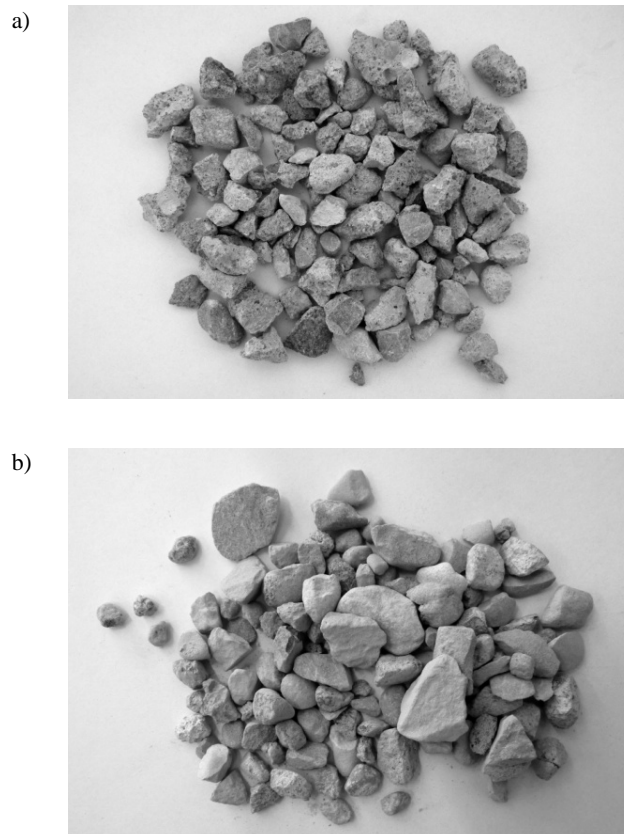
Rys. 3. Plan eksperymentu

Obróbka termiczna kruszywa recyklingowego miała na celu wywołanie procesu dehydratacji cementu. W związku z tym, że kruszywo recyklingowe zawiera znaczne ilości zaprawy cementowej zabieg ten pozwolił na łatwiejsze odspojenie zaprawy od kruszywa. Pod wpływem obróbki termicznej cząsteczki wody zawarte w zaprawie cementowej zostały usunięte, w wyniku czego zaprawa utraciła zdolności wiążące. Badanie przeprowadzono w zakresie temperatur od 459°C do 800°C.

W celu mechanicznego odspojenia zaprawy cementowej od kruszywa wykorzystano bęben Los Angeles. Według PN-EN 1097-2 *Badanie mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Metody oznaczania odporności na rozdrabnianie*, bęben służy do oznaczenia odporności na rozdrabnianie kruszyw naturalnych i pochodzenia sztucznego stosowanych w budownictwie.

Badania przeprowadzono według PN-EN 1097-2:2000. Odstępstwem od normy była masa próbki kruszywa recyklingowego w ilości 30 kg na jeden cykl. W badaniu wykorzystano 11 stalowych kul o średnicy 45 mm i wadze 400 g, których głównym zadaniem było odbicie kamienia cementowego. Silnik bębna zapewnił prędkość obrotową 31 obr/min, a całkowity cykl dla pojedynczej serii trwał 500 obrotów. Po wykonaniu ustalonej liczby obrotów kruszywo wraz z pyłem zaprawy cementowej wysypano do kuwety,

wyjęto kule, a następnie przesiano w celu uzyskania frakcji 4/16 mm. Uzyskano dobrej jakości kruszywo wtórne, zbliżone do kruszywa naturalnego (rys. 4).



Rys. 4. Kruszywo recyklingowe: a) przed prażeniem, b) po prażeniu i odspojeniu w bębnie LA

Odzyskaną zaprawę można ponownie wykorzystać, po uprzednim przesianiu i zmieleniu, jako częściowy zamiennik cementu w nowo projektowanych zaprawach. Prowadzone są badania dotyczące stopnia wykorzystania zaprawy z recyklingu, jako zamiennika cementu.

3. Wyniki badań

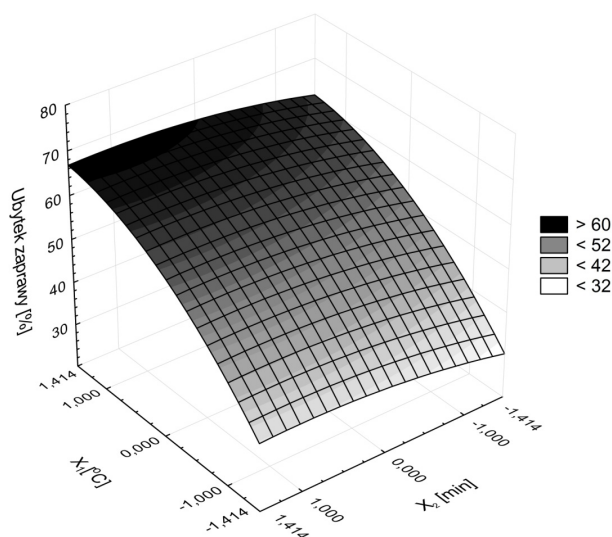
W tabeli 3 zamieszczono wyniki badań uzyskane dla poszczególnych serii badawczych.

Tab. 3. Wyniki badań laboratoryjnych – odpad zaprawy cementowej od kruszywa po bębnie LA

Seria	I	II	II	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Temp. Prażenia [°C]	459	459	741	741	400	800	600	600	600	600
Czas prażenia [min]	36	64	36	64	50	50	30	70	50	50
Bęben LA [liczba obrotów]	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Masa próbki początkowej [kg]	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Odpad zaprawy cementowej [kg]	11,4	12,9	17,7	19,2	11,7	20,4	16,8	17,7	17,1	17,1
Odpad zaprawy cementowej [%]	38	43	59	64	39	68	56	59	57	57

Na podstawie analizy statystycznej przeprowadzonej w programie Statistica ustalono równanie regresji (2) opisujące procentowy odpad zaprawy cementowej od ziaren kruszywa w zależności od zmiennych: temperatury i czasu prażenia. Współczynnik determinacji modelu R^2 został oznaczony na poziomie 0,96. Interpretację graficzną obiektu badania dla wartości kodowanych rozpatrywanych czynników przedstawiono na rysunku 5.

$$z = 57,0 + 10,2889 \cdot x_1 + 1,7805 \cdot x_2 + 0 \cdot x_1 \cdot x_2 - 2,9687 \cdot x_1^2 - 0,8437 x_2^2 \quad (2)$$



Rys. 5. Odpad zaprawy cementowej od ziaren kruszywa w zależności od czynników zmiennych: X_1 – temperatura prażenia [°C] oraz X_2 – czas prażenia [%]

Na podstawie wartości liczbowych w równaniu regresji (2) przy zmiennych X_1 i X_2 należy stwierdzić, że temperatura prażenia ma istotny wpływ na ubytek zaprawy recyklingowej. W temperaturze 800°C uzyskano „najczystsze kruszywo”, to jest największy procent ubytku zaprawy cementowej. Wraz ze wzrostem temperatury i czasu prażenia rośnie ilość odspojonej zaprawy recyklingowej. Najlepszym tego przykładem są wyniki

serii VI, w której 68% masy próbki stanowi usunięta z kruszywa zaprawa recyklingowa. Stanowi to wzrost o około 79%, w porównaniu z najniższą temperaturą prażenia 459°C. Oznacza to, że kruszywo w tej serii jest materiałem „czystym”, w dużej mierze wolnym od zaprawy. Wynik ten uzyskano w czasie 50 min prażenia. Najgorszy wynik otrzymano w przypadku serii I, w której czas prażenia był najkrótszy rzędu 36 min, a temperatura prażenia wynosiła 400°C. Odpad zaprawy był na poziomie 38% masy próbki.

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz stwierdza się, że prażenie, a następnie obróbka mechaniczna kruszywa recyklingowego w bębnie Los Angeles ma korzystny wpływ na proces usuwania zaprawy z kruszywa recyklingowego. Zmniejszona zawartość zaprawy w kruszywie prawdopodobnie wpłynie korzystnie na parametry fizyczne i mechaniczne betonów je zawierających, w porównaniu z betonami wytworzonymi na kruszywie recyklingowym bez dodatkowej obróbki technologicznej.

Najistotniejszym czynnikiem mającym wpływ na ilość odpadu zaprawy była temperatura prażenia. W temperaturze 800°C otrzymano „najczystsze kruszywo”. Największy procent ubytku zaprawy cementowej rzędu 68% uzyskany w temperaturze 800°C stanowi wzrost ubytku o około 79%, w porównaniu z temperaturą prażenia 459°C.

Uzyskane rezultaty pozwalają uznać prowadzone badania za przydatne i obiecujące w kontekście przydatności kruszyw z recyklingu do produkcji betonu.

Literatura

- Hansen T.C., Narud H. (1983). Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete International – Design and Constructions*, 5/1983.
- Jamroz Z. (2000). *Beton i jego technologie*. PWN, Warszawa-Kraków.

- Casuccio M., Torrijos M. C., Giaccio G., Zerbino R. (2008). Failure mechanism of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 22/2008.
- Bołtryk M., Pawluczuk E. (2011). Modyfikacja wybranych właściwości betonów cementowych na kruszywie z recyklingu. *Inżynieria i Budownictwo*, 6/2011.

**THE INFLUENCE OF ROASTING TEMPERATURE
AND TIME ON A CONTENT OF CEMENT MORTAR
IN RECYCLED AGGREGATE**

Abstract: The paper presents the test results of recycled aggregate fraction 4/16 mm which was roasted in a ceramic furnace. Ten cement mortars were mechanically separated from aggregate in the Los Angeles trommel. The purpose of these processes was to obtain an aggregate free from mortar cement. The test results show that it is possible to get a recycled aggregate without a mortar cement of the similar technical quality as natural aggregate.

WZMACNIANIE ŚCIAN ZEWNĘTRZNYCH W BUDYNKACH WIELKOPŁYTOWYCH

Dariusz TOMASZEWICZ*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok
Wydział Techniczny, Wyższa Szkoła Agrobiznesu, ul. Studencka 19, 18-402 Łomża

Streszczenie: Celem artykułu jest analiza wybranej metody wzmocnień ścian warstwowych istniejących budynków wielkopłytowych. Przedstawiono kilku sposobów wzmocnień ścian warstwowych stosowanych w praktyce budowlanej, a w szczególności system, który jest używany do wzmocniania ścian w budynkach wielkopłytowych w mieście Łomży. Jest to system COPY-ECO, dla którego przeprowadzono obliczenia statyczne kotew.

Słowa kluczowe: system OWT, wzmocnianie ścian zewnętrznych, warstwa fakturowa, wieszak, kotwa chemiczna.

1. Wprowadzenie

Potrzebą chwili jest wzmocnianie ścian warstwowych budynków wielkopłytowych. Ekspertyzy przeprowadzane w kraju, obrazują w mniejszym lub w większym stopniu zużycie techniczne elementów ścian warstwowych (Orłowski i in., 2011). Dotyczy to w głównej mierze tak zwanych „wieszaków”, które łączą ze sobą warstwy ściany, którymi są: warstwa fakturowa i warstwa konstrukcyjna oraz wypełnienie pomiędzy nimi w postaci izolacji termicznej, przeważnie styropianu. W Łomży wzmocniane są budynki wielkopłytowe wzniesione w zmodernizowanym systemie OWT-67/N, w którym ściany podłużne konstrukcyjne mają najmniejszą grubość spośród wszystkich systemów budownictwa wielkopłytowego. Wynosi ona tylko 60 mm. W związku z powyższym, zakotwienia muszą być zaprojektowane w dostosowaniu do takiej grubości ścian. Ekspertyza techniczna miała na celu ocenę stanu technicznego wieszaków i prawidłowości ich rozmieszczenia, grubości otuliny zbrojenia oraz zasięgu karbonatyzacji betonu w grupie sześciu budynków w mieście Łomży (Orłowski i in., 2011). Uchybienia głównie dotyczyły zbyt cienkiej otuliny oraz niewłaściwego rozmieszczenia wieszaków w płytach. Zdecydowano się na wzmocnienie ścian warstwowych systemem dwukotwowym COPY-ECO. W warstwowych ścianach podłużnych budynku zmieniono kąt nachylenia kotwy ukośnej z 30° do 45°. System dwukotwowy, składający się z kotwy poziomej i ukośnej, odwzorowuje kształt i pracę wieszaka.

2. Przegląd metod wzmocniania ścian zewnętrznych w budynkach wielkopłytowych

Wzmocnianie ścian zewnętrznych budynków wielkopłytowych, scharakteryzowanych szczegółowo w normie BN-79/8812-01 *Konstrukcje budynków wielkopłytowych*. Projektowanie i obliczenia statyczno-wytrzymałościowe polega na osadzeniu kotew w otworze wykonanym w betonowej konstrukcji ściany. Są one łącznikami warstwy fakturowej z warstwą konstrukcyjną (Instrukcja ITB nr 360, 1999). Przegląd metod wzmocniania ścian zewnętrznych budynków wielkopłytowych ograniczony tu został tylko do wzmocnień systemu OWT. Wymiary charakteryzujące przegrody pionowe w systemach OWT zostały zawarte w tablicy 1. Zakotwienia w systemie Wk-70 zostały omówione w pracy Krentowskiego i Tribiły (2008).

Niektóre typy zakotwień są stosowane tylko do zamocowań punktowych (rys. 1). Jest to najbardziej popularne rozwiązanie, stosowane przez większość firm budowlanych.



Rys. 1. Kotwa chemiczna HWB-H Ø22×190 mm do wzmocniania ścian zewnętrznych w budynkach wielkopłytowych (www.hilti.pl)

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: d.tomaszewicz@doktoranci.pb.edu.pl

Tab. 1. Grubości warstw ścian zewnętrznych w systemach OWT (Dzierżewicz i Starosolski, 2010)

Lp.	Wyszczególnienie	Grubość warstw [mm]			
		w wersji podstawowej		w wersji zmodernizowanej	
		OWT-67	OWT-75	OWT-67/N	SBP
ściany szczytowe typ Wz					
1	warstwa fakturowa	50	60	50	60
	izolacja termiczna	50	60	70	80
	warstwa wewnętrzna (konstrukcyjna)	140	150	140	150
	całkowita grubość ściany	240	270	260	290
ściany podłużne typ Z					
2	warstwa fakturowa	50	60	50	60
	izolacja termiczna	50	60	70	80
	warstwa wewnętrzna (konstrukcyjna)	60	75	60	75
	całkowita grubość ściany	160	195	180	215
filarki międzyokienne (lekkie ścianki osłonowe jako płyty szkieletowe)					
3	okładzina zewnętrzna i wewnętrzna	6 + 12 = 18	6 + 12 = 18	6 + 12 = 18	6 + 12 = 18
	izolacja termiczna	50	60	70	80
	razem	68	78	88	98

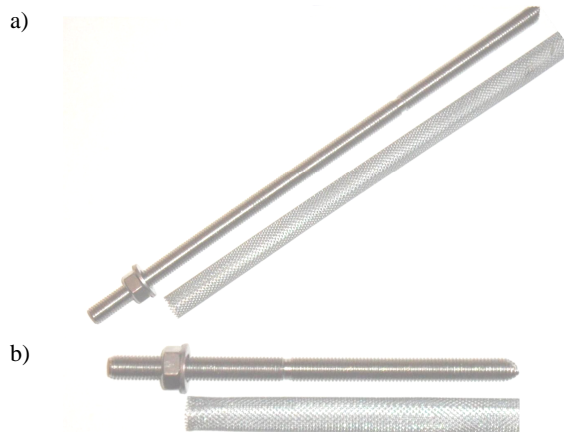
Kotwa HWB do zamocowań poziomych jest dopuszczona do stosowania we wszystkich systemach płyt trójwarstwowych, na przykład: W-70; Wk-70; OWT-67/N; WUF-T czy też System Szczeciński. Należy montować ją w podłożu betonowym o klasie nie niższej niż B 15 (C 12/15) (www.hilti.pl). Kotwy chemiczne HWB posiadają Aprobata Techniczną ITB AT-15-6173/2010.

System COPY-ECO składa się z dwóch kotew: poziomej i ukośnej. Odwzorowują one pracę wieszaka, a ich konstrukcja pozwala na montaż w ścianach, których warstwa konstrukcyjna posiada ma zaledwie 70 mm grubości. Rozwiązanie COPY-ECO może być stosowane między innymi w budynkach wykonanych w systemach w W-70 i OWT. System wzmocnienia ścian warstwowych budynków wielkopłytowych COPY-ECO posiada Aprobata Techniczną ITB AT-15-6916/2009. Widok kotew COPY-ECO do wzmocnienia płyt balkonowych oraz ścian osłonowych i szczytowych jest przedstawiony na rysunkach 2 i 3.

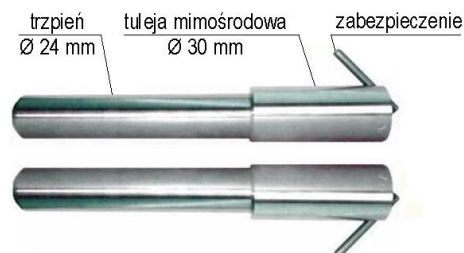
Innym rodzajem wzmocnień ścian zewnętrznych są kotwy EJOT WSS (<http://www.ejot.pl>). Kotwy EJOT WSS (rys. 4) wykonane są z wysokogatunkowej stali nierdzewnej, która gwarantuje niezmienność swoich parametrów przez minimum 60 lat. Stosować je należy w podłożu betonowym (zarówno zarysowanym jak i niezarysowanym) o klasie betonu nie niższej niż B15 (C12/15). Kotwy EJOT WSS mają Aprobata Techniczną ITB AT-15-4836/2011 oraz Europejską Aprobata Techniczną ETA-99/0007.



Rys. 2. Widok kotwy wzmocniającej M20×330 mm COPY-ECO stosowanej przy wzmocnianiu płyt balkonowych



Rys. 3. Widok systemu kotew COPY-ECO wzmocniających zewnętrzne płyty ścienne budynków wielkopłytowych: a) kotew pozioma M12×190 mm, b) kotew ukośna M12×330 mm

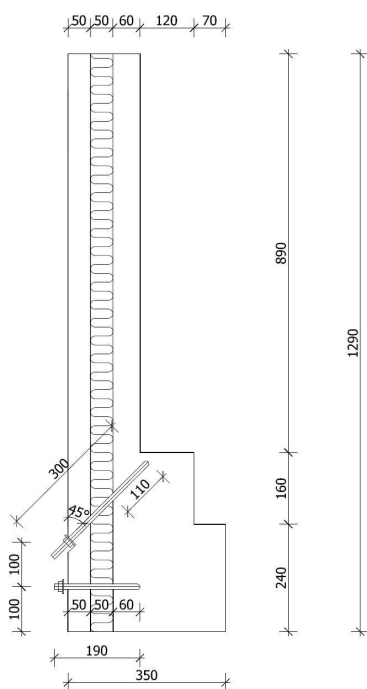
Rys. 4. Widok ogólny kotew EJOT WSS do wzmocnienia ścian trójwarstwowych (www.ejot.pl)

Stosowany jest także system wzmacniania zewnętrznych ścian warstwowych budynków wielkopłytowych za pomocą kotew K2 (rys. 5) (www.inwestbud.com.pl), mocowanych w podłożu z betonu C12/15. Kotwa K2 posiada Aprobata Techniczną ITB AT-15-8130/2009.

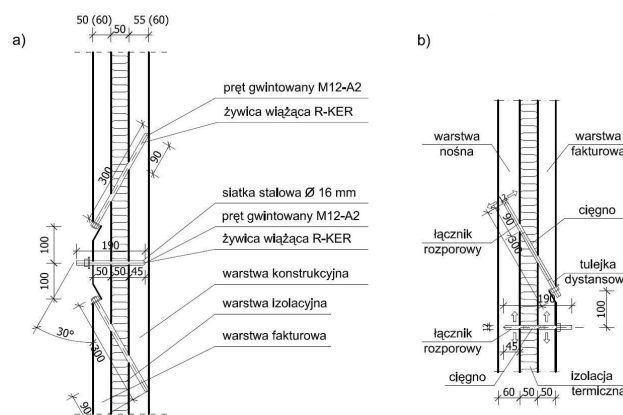


Rys. 5. Widok kotwy K2 do wzmacniania ścian trójwarstwowych (www.inwestbud.com.pl)

Na rysunkach 6 i 7 pokazane zostało zastosowanie stalowych łączników rozporowych (kotew) z gwintowanym ciągnem M12. Zadaniem cięgna ukośnego jest przeniesienie do warstwy konstrukcyjnej obciążeń rozciągających, pochodzących od ciężaru własnego warstwy fakturowej. Natomiast ciągnem poziome może przenosić te obciążenia rozciągające, które wystąpiłyby w przypadku odspojenia warstwy fakturowej (Instrukcja ITB nr 360, 1999; Instrukcja ITB nr 374, 2002).



Rys. 6. Schemat rozmieszczenia kotew COPY-ECO



Rys. 7. Schemat połączeń stalowymi cięgnami: a) rozwiązania dla ścian klatek schodowych, b) rozwiązania dla płyt ścian szczytowych

3. Obliczenie elementów zbrojonych na docisk

Ściany budynków wielkopłytowych w systemie OWT-67/N wykonywano z betonu o średniej wytrzymałości 15 MPa. Jego odpowiednikiem zgodnie z normą PN-88/B-06250 *Beton zwykły* był beton klasy B 17,5. Obecnie jest to beton klasy B 15 odpowiadający klasie betonu C 12/15 według norm PN-B-03264:2002 *Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie* i PN-EN 206-1:2003 *Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność*. W analizowanych płytach ściennych wieszaki o średnicy pręta $\varnothing 12$ mm ze stali St0 kotwiono prętami $\varnothing 8$ mm ze stali St0S. Płyty ścienne systemu OWT były wykonywane z betonu B 20 (C16/20) (Orłowski i in., 2011).

Poniżej pokazano tok obliczeń sprawdzających dla kotew chemicznych systemu COPY-ECO.

Przy projektowaniu zamocowań należy wykazać, że wartość obliczeniowa obciążenia nie przekracza wartości nośności obliczeniowej połączenia zgodnie ze wzorem (2).

3.1. Sprawdzenie wytrzymałości betonu na docisk w płytach OWT dwukotwowego łącznika wklejanego COPY-ECO

- Wyznaczenie długości docisku betonowego podłoża przez łącznik stalowy

$$a_d = 3 \cdot a \leq 0,4 \cdot h_{ef} \quad (1)$$

$$a_d = 3 \cdot 12 \text{ mm} = 36 \text{ mm} \leq 0,4 \cdot 110 \text{ mm} = 44 \text{ mm}$$

gdzie: d jest to zewnętrzna średnica trzpienia stalowego łącznika w mm, a h_{ef} jest długością, na jakiej jest osadzony trzpień stalowego łącznika w warstwie nośnej ściany w mm.

- Obliczenie pola powierzchni rozdziału

$$A_{c1} = (3,6 \text{ cm} + 4,4 \text{ cm} \cdot 2) + (3,6 \text{ cm} \cdot 2 + 4,4 \text{ cm}) = 24 \text{ cm}^2$$

- Obliczenie pola powierzchni docisku

$$A_{c0} = 36\text{mm} \cdot 76\text{mm} = 1584\text{mm}^2 = 15,84\text{cm}^2$$

- Sprawdzenie stanu granicznego nośności przekroju poddanego działaniu obciążeń miejscowych według PN-B-032064:2002:

$$N_{Sd} \leq N_{Rd} = \alpha_u \cdot f_{cud} \cdot A_{c0} \quad (2)$$

gdzie: N_{Sd} jest siłą działającą prostopadle na powierzchnię docisku A_{c0} , wyznaczoną dla miarodajnej kombinacji obciążeń obliczeniowych w kN, N_{Rd} jest nośnością obliczeniową z uwagi na siłę podłużną w kN, f_{cud} jest wytrzymałością betonu na docisk w MPa, zaś współczynnik α_u zależy od rozkładu obciążenia na powierzchni docisku i wyznaczany jest według wzoru:

$$\alpha_u = \frac{1}{3} \cdot \left(2 + \frac{\sigma_{u,\min}}{\sigma_{u,\max}} \right) \quad (3)$$

$$\alpha_u = \frac{1}{3} \cdot \left(2 + \frac{5,21\text{MPa}}{7,91\text{MPa}} \right) = 0,886$$

gdzie: $\sigma_{u,\min}$ są to minimalne naprężenia docisku w kPa, $\sigma_{u,\max}$ są to maksymalne naprężenia docisku w kPa.

Zgodnie z Aprobata Techniczną AT-15-6916/2009 przyjęto nośność obliczeniową kotwy M12 równą $N = 12,5\text{kN}$ i obliczono:

$$\sigma_{u,\min} = \frac{N}{A_{c1}} = \frac{12,50\text{kN}}{0,0024\text{m}^2} = 5,21\text{MPa}$$

$$\sigma_{u,\max} = \frac{N}{A_{c0}} = \frac{12,50\text{kN}}{0,00158\text{m}^2} = 7,91\text{MPa}$$

- Wytrzymałość betonu na docisk obliczono według wzoru:

$$f_{cud} = v_{cu} \cdot f_{cd} \quad (4)$$

gdzie: f_{cd} jest wytrzymałością charakterystyczną betonu klasy C12/15 na ściskanie równą $f_{cd} = 8,0\text{MPa}$, v_{cu} jest współczynnikiem korekcyjnym do wytrzymałości obliczeniowej betonu w przypadku działania obciążeń miejscowych, obliczonym według wzoru

$$v_{cu} = \omega_u - \frac{\sigma_{cum}}{f_{cd}} \cdot (\omega_u - 1) \quad (5)$$

- Wyznaczenie naprężenia średniego na powierzchni rozdziału

$$\sigma_{cum} = \frac{N}{a_d \cdot b_d} = \frac{\sigma_{u,\min} + \sigma_{u,\max}}{2} = 6,56\text{MPa} \quad (6)$$

Określenie wartości współczynnika korekcyjnego:

$$v_{cu} = 1,231 - \frac{6,56\text{MPa}}{8,0\text{MPa}} \cdot (1,231 - 1) = 1,13$$

Zatem wytrzymałość betonu na docisk wynosi:

$$f_{cud} = 1,13 \cdot 15,0\text{MPa} = 16,95\text{MPa}$$

$$N_{Sd} = 21,26\text{kN}$$

$$\leq N_{Rd} = 0,886 \cdot 16,95\text{N/mm}^2 \cdot 1584\text{mm}^2 = 23,78\text{kN}$$

Warunek SGN przekroju poddanego obciążeniom miejscowym został spełniony.

- Wyznaczenie ugięcia stalowego łącznika

$$y = \frac{M_{Sd} \cdot l_t^2}{3EJ} = \frac{V_{Sd} \cdot (1,1 \cdot l_o)^3}{3 \cdot W_{el}} \leq 2\text{mm} \quad (7)$$

$$l_o = h_i + 0,5 \cdot h_f \quad [\text{mm}] \quad (8)$$

$$l_o = 50\text{mm} + 0,5 \cdot 50\text{mm} = 75\text{mm}$$

gdzie: V_{Sd} jest to wartość obliczeniowa zewnętrznej siły ścinającej od ciężaru własnego warstwy fakturowej i wewnętrznej izolacji termicznej w kN, W_{el} jest wskaźnikiem wytrzymałości przekroju kotwy M12, przyjętym według Katalogu technicznego firmy Koelner (2012) i równym $W_{el} = 109,20\text{mm}^3$, l_o jest długością wspornika stalowego łącznika w mm, h_i jest grubością wewnętrznej warstwy izolacji termicznej i wynosi $h_i = 50\text{mm}$, h_f jest grubością warstwy fakturowej ściany i wynosi $h_f = 50\text{mm}$.

- Wyznaczenie niezbędnej liczby dodatkowych łączników

$$n = \frac{G_{d,1} + G_{d,2}}{N} \geq 2 \quad (9)$$

gdzie: $G_{d,1}$ jest wartością obliczeniową obciążenia ciężarem własnym warstwy fakturowej i ciężarem wewnętrznej warstwy termoizolacyjnej oraz dodatkowej warstwy termoizolacyjnej przy termorenowacji ścian w kN, $G_{d,2}$ jest wartością obliczeniową obciążenia ciężarem własnym dodatkowej warstwy termoizolacyjnej w kN, N jest nośnością obliczeniową połączenia, wyznaczoną z warunku wytrzymałości betonowego podłoża lub ugięcia stalowego łącznika w kN.

Następnie sporządzono zestawienie obciążeń stałych od ścian zewnętrznych systemu OWT-67/N przykładowego budynku wielokopłytowego zlokalizowanego w Łomży (tab. 2).

Tab. 2. Zestawienie obciążeń stałych od ścian zewnętrznych systemu OWT-67/N

Lp.	Obciążenie	Wartość charakterystyczna	Współczynnik obciążenia γ	Wartość obliczeniowa
1	Warstwa fakturowa grubości 5 cm: $0,05 \text{ m} \cdot 25 \text{ kN/m}^3$	1,25 kN/m ²	1,1	1,375 kN/m ²
2	Warstwa docieplenia ze styropianu grubości 6 cm: $0,06 \text{ m} \cdot 0,45 \text{ kN/m}^3$	0,027 kN/m ²	1,2	0,032 kN/m ²
3	Zaprawa klejąca z wtopioną siatką zbrojącą z włókna szklanego i wykończeniowa cienkowarstwowa wyprawa zewnętrzna klejowo – tynkarska: $0,005 \text{ m} \cdot 22 \text{ kN/m}^3$	0,11 kN/m ²	1,3	0,143 kN/m ²
Razem: $q_d = 1,55 \text{ kN/m}^2$				

- Obliczono ciężar całkowity płyty ściennej szczytowej o wymiarach $4,97 \times 2,76 \text{ m}$

$$G = V = 4,97 \text{ m} \cdot 2,76 \text{ m} \cdot 1,55 \text{ kN/m}^2 = 21,26 \text{ kN}$$

- Określono obliczeniowe obciążenie poziome w_o od ssania wiatru według zależności

$$w_o = 1,3 \cdot C \cdot q_k \cdot \beta \cdot \chi_w \quad (10)$$

$$w_o = 1,3 \cdot (-0,7) \cdot 0,25 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,8 \cdot 0,8 = -0,3276 \text{ kN/m}^2$$

gdzie: C jest współczynnikiem aerodynamicznym według PN-77/B-02011 *Obciążenia w obliczeniach statycznych*. Obciążenie wiatrem, przyjęto $C = -0,7$, q_k jest charakterystycznym ciśnieniem prędkości wiatru dla I strefy obciążenia, przyjęto $q_k = 0,25 \text{ kN/m}^2$, β jest współczynnikiem działania porywów wiatru, przyjęto $\beta = 1,8$, χ_w jest współczynnikiem przeliczeniowym zmiany nierównomiernego rozkładu ciśnienia prędkości wiatru na rozkład równomierny, uwzględniającym współczynnik ekspozycji, przyjęto $\chi_w = 0,8$.

- Obliczono obciążenie poziome od ssania dla płyty

$$w_o = -0,3276 \text{ kN/m}^2 \cdot 4,97 \text{ m} \cdot 2,76 \text{ m} = -4,49 \text{ kN}$$

- Ugięcie kotwy stalowej obliczono według wzoru (7)

$$y = \frac{21670 \text{ N} \cdot (1,1 \cdot 75 \text{ mm})^3}{3 \cdot 210000 \text{ N/mm}^2 \cdot 2034,72 \text{ mm}^4} = 7,84 \text{ mm} > 2 \text{ mm}$$

gdzie: E jest modułem sprężystości podłużnej (Younga) pręta stalowego kotwy M 12 równym $E = 210 \text{ GPa} = 210000 \text{ N/mm}^2$, J jest momentem bezwładności dwóch kotew M12, wynoszącym:

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{64} = \frac{3,14 \cdot 2 \cdot (12 \text{ mm})^3}{64} = 2034,72 \text{ mm}^4$$

Wniosek z obliczeń jest następujący: Warunek dla momentu bezwładności dwóch kotew nie został spełniony.

Wobec czego zaprojektowano zastosowanie ośmiu kotew M12.

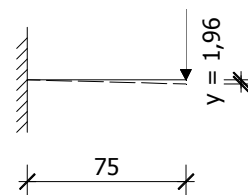
- Wyznaczenie ugięcia kotwy stalowej (rys. 8)

$$y = \frac{21670 \text{ N} \cdot (1,1 \cdot 75 \text{ mm})^3}{3 \cdot 210000 \text{ N/mm}^2 \cdot 8138,88 \text{ mm}^4} = 1,96 \text{ mm} < 2 \text{ mm}$$

gdzie J jest momentem bezwładności obliczonym dla ośmiu kotew M12:

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{64} = \frac{3,14 \cdot 8 \cdot (12 \text{ mm})^3}{64} = 8138,88 \text{ mm}^4$$

Wniosek z powtórnych obliczeń: Warunek dla momentu bezwładności ośmiu kotew został spełniony



Rys. 8. Schemat ugięcia stalowego wspornika w płycie szczytowej

Na koniec ustalono niezbędną liczbę dodatkowych łączników zgodnie ze wzorem (9):

$$n = \frac{G}{N} = \frac{21,26 \text{ kN}}{12,50 \text{ kN}} = 1,70$$

Okazało się, że w badanej płycie należy zamontować jeszcze dwie dodatkowe kotwy.

4. Interpretacja obliczeń na podstawie Eurokodu 2

Obliczenia według PN-EN 1992-1-1:2008 *Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków* czyli Eurokodu 2 (EC2) mają zastosowanie tylko do konstrukcji z betonu o minimalnej klasie C20/25. Płyty OWT z wybranej grupy budynków nie spełniały tych wymagań, zatem obliczenia zostały przedstawione dla betonu klasy C 20/25.

- Określenie nośności na docisk na podstawie EC2 i normy niemieckiej DIN 1045-1:2008-08

$$F_{Rdu} = A_{c0} \cdot f_{cd} \cdot \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 3,3 \cdot f_{cd} \cdot A_{c0} \quad (11)$$

gdzie f_{cd} jest obliczeniową wytrzymałością na ściskanie betonu klasy C20/25 (B25), obliczoną według wzoru:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{20MPa}{1,5} = 13,3MPa \quad (12)$$

gdzie: f_{ck} jest wytrzymałością charakterystyczną betonu na ściskanie; ponieważ według wytycznych do Europejskich Aprobat Technicznych minimalną klasą betonu w płytach zewnętrznych powinna być klasa C20/25, przyjęto $f_{ck} = 20,0$ MPa, γ_c jest częściowym współczynnikiem bezpieczeństwa dla betonu według PN-B-03264:2002, przyjęto $\gamma_c = 1,5$.

Wartość współczynnika ω określająca zwiększenie wytrzymałości betonu na ściskanie została określona w sposób następujący:

$$\omega = \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} = 3,3 \quad (13)$$

$\omega = 3,3$ jest to wartość przyjmowana jako wiążąca w krajach Unii Europejskiej.

Wartość wyznaczona dla systemu dwukotwowego:

$$\omega_u = \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} = \sqrt{\frac{24,0cm^2}{15,84cm^2}} = 1,231 < 2,5$$

Wartość współczynnika ω wyznaczana jest też zgodnie z wyrażeniami przedstawionymi przez Bauschingera, Gwozdiewa (Kamiński, 1996) oraz według norm:

- francuskiej

$$\omega = 4 - 5 \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} + 2 \cdot \frac{A_{c1}}{A_{c0}} \quad (14)$$

- niemieckiej oraz polskiej zgodnie ze wzorem (13).
- Obliczenie nośności na docisk według EC2 według wzoru (11)

$$F_{Rdu} = A_{c0} \cdot f_{cd} \cdot \omega = 0,001584m^2 \cdot 13,3MN/m^2 \cdot 1,231 = 25,91kN$$

- Sprawdzenie warunku nośności na docisk

$$F_{Rdu} = 25,91kN \leq 3,3 \cdot 10,67MN/m^2 \cdot 0,001584m^2 = 55,77kN$$

Wniosek z obliczeń jest następujący: Warunek nośności na docisk został spełniony

5. Podsumowanie

Spośród szerokiej gamy dostępnych łączników (kotew) do wzmacniania ścian warstwowych budynków wielkopłytowych często używany jest system COPY-ECO. Jest to system dwu kotew: poziomej i ukośnej, mający na celu „odwzorowanie” układu i pracy tak zwanej „wieszaków”, czyli prętów zbrojeniowych, łączących warstwę fakturową z warstwą konstrukcyjną. Pozostałe opisane systemy są również wykorzystywane przy wzmocnieniach budynków wielkopłytowych i bez wątplenia mają swoje zalety, jednak poza analizowanym systemem mają one jedynie charakter wzmocnień punktowych.

Autor artykułu obecnie prowadzi badania, których celem jest określenie nośności łączników COPY-ECO na wrywanie (metoda niszcząca) na obiekcie w terenie oraz w warunkach laboratoryjnych. Planowane jest też przeprowadzenie próby wrywania kotwy ukośnej z zastosowaniem specjalnie do tego celu wykonanego stelażu.

Literatura

- Dzierżewicz Z., Starosolski W. (2010). Systemy budownictwa wielkopłytowego w Polsce w latach 1970-1985. *Wolters Kluwer business*. Warszawa.
- Instrukcja ITB nr 360/99 (1999). Badania i ocena betonowych płyt warstwowych w budynkach mieszkalnych. Warszawa.
- Instrukcja ITB nr 374/2002 (2002). Metodyka oceny stanu technicznego wielkopłytowych warstwowych ścian zewnętrznych. Dodatkowe połączenia warstwy fakturowej z warstwą konstrukcyjną wielkopłytowych ścian zewnętrznych. Warszawa.
- Kamiński M. (red.) (1996). Podstawy projektowania konstrukcji żelbetowych według Eurokodu 2. *Wydawnictwo Naukowe PWN*, Warszawa – Wrocław.
- Katalog techniczny firmy KOELNER S.A. (2012). Edycja 7, www.koelner.pl
- Krentowski J., Trybiłło R. (2008). Usuwanie stanów zagrożenia zewnętrznych ścian warstwowych budynków mieszkalnych. *Przegląd Budowlany*, 2/2008, 34-39
- Orłowski Z., Orłowski M., Wasilewski A., Tomaszewicz D. (2011). Ocena stanu technicznego wieszaków mocujących warstwę fakturową w budynkach ŁSM w Łomży. Białystok, wrzesień 2011.

REINFORCING OF THE EXTERNAL WALL IN THE BUILDINGS OF LARGE SLAB

Abstract: The topic of the paper is to analyze the chosen method of reinforcing of the walls in the existing buildings with layered walls. The paper presents several methods of layered wall reinforcements used in construction practice and, in particular, the system, which is used to strengthen of the walls for panel buildings in Lomza. It is the COPY-ECO system, for which the calculations of static anchors were carried out.

Abstracts Vol. 5 No. 3

Katarzyna GŁADYSZEWSKA-FIEDORUK, Tomasz MANOWSKI

Comparison of the various air-conditioning systems in analysed hotel spaces – economics indices

The paper focuses on the investment costs and operating costs at different life systems and time. Return on investment have been shown too. By comparing the settings, it should be noted the advantage of a system based on direct evaporation of the refrigerant in the case of each of the operating modes. A surprise is lower heating cost by using freon system, because it would seem that the heat, combined with the ice water network will be cheaper. The difference in investment costs of presents systems comes to 100%. The lowest investment cost has stated for system with ice water. It can be observed that over 15 years, i.e. time necessary as a time of "life" of the product savings could amount from 500 thousand to \$ 1 million in the case of freon system for the same object.

Natalia STANKIEWICZ, Małgorzata LELUSZ

Nanotechnology in civil engineering – application review

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 Białostok 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.

Mikołaj SYCZEWSKI, Genadij SHIROKIY, Pavel JUCHNEVSKIJ

Modification of cement gel structure by means of interaction between polyethylene-sodium sulfonate with hydrated alite (C3S) surface

Insertion of chemical admixtures to cement materials contributes in creation of defects in crystalline grid of calcium hydrosilicates and formation of alloy structure, which finally leads to interference in dislocation flow and increase in the composite strength.

Maciej SWIRYDZIUK

The influence of roasting temperature and time on a content of cement mortar in recycled aggregate

The paper presents the test results of recycled aggregate fraction 4/16 mm which was roasted in a ceramic furnace. Ten cement mortars were mechanically separated from aggregate in the Los Angeles trommel. The purpose of these processes was to obtain an aggregate free from mortar cement. The test results show that it is possible to get a recycled aggregate without a mortar cement of the similar technical quality as natural aggregate.

Dariusz TOMASZEWICZ

Reinforcing of the external wall in the buildings of large slab

The topic of the paper is to analyze the chosen method of reinforcing of the walls in the existing buildings with layered walls. The paper presents several methods of layered wall reinforcements used in construction practice and, in particular, the system, which is used to strengthen of the walls for panel buildings in Lomza. It is the COPY-ECO system, for which the calculations of static anchors were carried out