



Materiały kompozytowe i możliwości ich zastosowania w budownictwie tradycyjnym i energooszczędnym

*redakcja
Stanisław Fic*



MONOGRAFIE

Materiały kompozytowe i możliwości
ich zastosowania w budownictwie
tradycyjnym i energooszczędnym

Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Budownictwa i Architektury
ul. Nadbystrzycka 40
20-618 Lublin

Materiały kompozytowe i możliwości ich zastosowania w budownictwie tradycyjnym i energooszczędnym

redakcja
Stanisław Fic



Politechnika Lubelska
Lublin 2014

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Bohdan Demczyna, Politechnika Lwowska
dr hab. inż. Justyna Jaroszyńska-Wolińska, prof. Politechniki Lubelskiej
dr hab. inż. Sergii Koval, prof. Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego

Redakcja naukowa:

dr hab. Inż. Stanisław Fic, prof. Politechniki Lubelskiej

Skład i redakcja techniczna: Foto Art Flash www.fotoartflash.pl

Monografia sfinansowana ze środków Fundacji Politechniki Lubelskiej

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2014

ISBN: 978-83-7947-095-2

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatorp.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 100 egz.

SPIS TREŚCI

Wprowadzenie	7
<i>Wpływ zaleceń zawartych w załącznikach krajowych do norm EC0 i EC1 na wymiarowanie konstrukcji żelbetowych na przykładzie stropu płytowo-belkowego kategorii użytkowania A, B i C2</i>	
Waldemar Budzyński	9
<i>Możliwości zastosowania polskich kruszyw węglanowych do betonów wysokowartościowych</i>	
Jacek Góra	21
<i>Charakterystyka wybranych materiałów pucolanowych wykorzystywanych jako częściowy zamiennik spoiwa cementowego</i>	
Stanisław Fic, Przemysław Brzyski	31
<i>Przegląd badań zapraw ciepłochronnych</i>	
Danuta Barnat-Hunek, Małgorzata Szafraniec	41
<i>Przegrody oszklone w budynkach energooszczędnych</i>	
Magdalena Grudzińska	57
<i>Wpływ impregnacji pokostem lnianym na nasiąkliwość kompozytu na bazie słomy lnianej i spoiwa wapiennego</i>	
Stanisław Fic, Przemysław Brzyski	67
<i>Ocena możliwości zastosowania elementów płaskich do numerycznego modelowania brył pracujących w płaskich stanach odkształcenia na przykładzie pustaka stropowego TERIVA</i>	
Maciej Szeląg	77
<i>Badania wpływu dodatków na właściwości materiałów na bazie cementu Sorela</i>	
Anna Tatarczak, Jarosław Brzozowski, Justyna Jaroszyńska-Wolińska	85
<i>Wpływ energii ultradźwięków i napełniaczy nieorganicznych na właściwości reologiczne nanopolimerów</i>	
Stanisław Fic, Andrzej Szewczak	107

Wprowadzenie

W prezentowanej monografii przedstawiono problematykę związaną z właściwościami fizyko-mechanicznymi materiałów budowlanych. Prezentowane artykuły zostały opracowane na podstawie badań przeprowadzonych w ostatnich 2 latach przez pracowników naukowych Katedry Budownictwa Ogólnego WBiA PL.

W artykułach autorzy przedstawili aktualny stan wiedzy wynikający z wytycznych Eurokodów, spełniających wymogi w zakresie ekologii oraz zrównoważonego rozwoju w budownictwie. Poszukiwanie nowych rozwiązań materiałowych i technologicznych przyczynia się do zmniejszenia emisji CO₂ oraz ograniczenia wydobycia surowców naturalnych zastępując je surowcami odpadowymi lub pochodzącymi z recyklingu. W opracowaniach przedstawiono między innymi ekologiczne materiały budowlane jako kompozyty oparte na odpadach pochodzących z produkcji rolniczej. W miejsce energochłonnego spoiwa cementowego zaproponowano spoiwa wapienne i magnezjowe wprowadzając do kompozytów odpowiednie domieszki i dodatki. Takie rozwiązania materiałowe pozwalają spełnić elementom budowlanym zarówno funkcje konstrukcyjne lub, wprowadzając modyfikacje w obszarze składników kompozytów, spełniają wymogi w zakresie izolacyjności np. ochrony cieplnej, akustycznej, przeciwpożarowej.

Zawarte w monografii artykuły i przytoczone w nich wyniki badań dotyczące materiałów budowlanych oraz zagadnień związanych z fizyką budowli mogą być pomocne specjalistom zajmującym się technologią kompozytów na bazie różnych spoiw w doborze składników, prognozowaniu właściwości fizyko-mechanicznych oraz studentom kierunku budownictwo.

Wpływ zaleceń zawartych w załącznikach krajowych do norm EC0 i EC1 na wymiarowanie konstrukcji żelbetowych na przykładzie stropu płytowo-belkowego kategorii użytkowania A, B i C2

Waldemar Budzyński¹

¹ Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: w.budzynski@pollub.pl

Streszczenie: W europejskich normach projektowania konstrukcji – Eurokodach - występują reguły dające konstruktorowi możliwość wyboru sposobu postępowania. W rezultacie, w zależności od podjętych decyzji, uzyskuje się różne, pod względem ilościowym rozwiązania. W artykule, na przykładzie stropu żelbetowego, przedstawiono różnice w efektach projektowania konstrukcji, wynikające z zastosowania lub nie w obliczeniach, uwag zawartych w załącznikach krajowych do norm EC i EC1. Wykazano, że różnice te są istotne.

Słowa kluczowe: obciążenia, Eurokod, projektowanie, żelbet

1. Wprowadzenie

Konstrukcja budynku powinna spełniać warunki zapewniające nieprzekroczenie stanów granicznych nośności oraz stanów granicznych użytkowalności w żadnym z jego elementów i w całej konstrukcji. Tak zdefiniowane warunki bezpieczeństwa konstrukcji uznaje się za spełnione, zgodnie z rozporządzeniem Ministra Infrastruktury [1], jeżeli konstrukcja ta odpowiada Polskim Normom dotyczącym projektowania i obliczania konstrukcji. W rozporządzeniu znajduje się wykaz norm w nim powołanych. Wynika z niego, że przy projektowaniu konstrukcji żelbetowych można stosować zarówno „stare” normy [2,3,4,5], jak i europejskie normy projektowania konstrukcji – Eurokody [6,7,8].

Ustalone w „starych” normach [3,4,5] jednoznaczne zasady projektowania powodują, że stosując przy projektowaniu konstrukcji żelbetowej algorytmy projektowe oparte na zasadach zgodnych z normą [2], uzyskuje się możliwe do przewidzenia, jednoznaczne rozwiązania ilościowe. Inaczej jest przy stosowaniu norm europejskich. Autorzy norm Eurokod zastosowali przy ich opracowywaniu inną, niż stosowaną dotychczas w Polsce, ideę. Przyjęli bowiem, że do norm należy wprowadzić możliwość podejmowania decyzji przez projektanta konstrukcji budowlanej. W konsekwencji, zarówno w normach ustalających ogólne zasady projektowania konstrukcji [7,8], jak i w normie zawierającej zasady projektowania konstrukcji żelbetowych [6], występują reguły dające konstruktorowi możliwość wyboru sposobu postępowania. W rezultacie, w zależności od podjętych decyzji, uzyskuje się różne rozwiązania, niekiedy istotnie różne pod względem ilościowym. Podejmowanie decyzji przez konstruktorów, w takich sytuacjach, nie jest łatwe, ponieważ z uwagi na złożony algorytm projektowy, nie da się poprawnie ocenić ilościowych wyników projektowania, bez przeprowadzenia obliczeń. Kon-

struktur, stosując przy projektowaniu „stare” normy, może w rozważaniach skorzystać z licznych przykładów obliczeniowych, które znaleźć można w literaturze, np [9,10,11], a nawet [12,13]. Korzystając z norm europejskich nie ma takiego komfortu, ponieważ przykładów takich jest niewiele, np. [14,15,16], a jeżeli są, to przedstawiają one, wyłącznie jedno z rozwiązań danego problemu, bez rozwiązań alternatywnych, które można by, zgodnie z regułami tych norm, zastosować. Autorzy norm europejskich przewidując trudności z adaptowaniem się inżynierów budownictwa do stosowania nowej idei projektowania konstrukcji, a także rozumiejąc specyfikę projektowania konstrukcji w poszczególnych krajach, wprowadzili do norm załączniki krajowe. Każdy kraj Unii Europejskiej, korzystając z załącznika krajowego, może wprowadzić specyficzne, obowiązujące jedynie w danym kraju, zasady szczegółowe do niektórych normowych reguł, przy czym reguły te, są w normach jednoznacznie wskazane. W załączniku krajowym można również wprowadzać komentarze, które mają pomagać konstruktorom w podejmowaniu decyzji przy projektowaniu. Okazuje się jednak, że te komentarze niekiedy nie są jednoznaczne i zamiast ułatwiać, wprowadzają dodatkowe komplikacje do projektowania.

W artykule, na przykładzie stropu o konstrukcji płytowo-belkowej, przedstawiono różnice w efektach projektowania konstrukcji żelbetowej, wynikające z zastosowania lub nie, w obliczeniach, uwag zawartych w załącznikach krajowych do norm EC [7] i EC1 [8]. Zasadniczo zostaną rozważone dwa problemy.

Pierwszy problem dotyczy przyjęcia właściwej kombinacji oddziaływań przy sprawdzeniu stanu granicznego nośności STR. Zgodnie z normą [7], w przypadku trwałych lub przejściowych sytuacji obliczeniowych, należy stosować kombinację oddziaływań (1)

albo, alternatywnie, mniej korzystną z dwóch podanych niżej, czyli (2) i (3)

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (1)$$

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \Psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2)$$

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3)$$

gdzie:

- $G_{k,j}$ - wartość charakterystyczna oddziaływania stałego,
- $Q_{k,1}$ - wartość charakterystyczna wiodącego oddziaływania zmiennego 1,
- $Q_{k,i}$ - wartość charakterystyczna towarzyszącego oddziaływania zmiennego i,
- $\gamma_{G,j}$ - współczynnik częściowy dla oddziaływania stałego j,
- $\gamma_{Q,i}$ - współczynnik częściowy dla oddziaływania zmiennego i,
- $\Psi_{0,i}$ - współczynnik dla wartości kombinacyjnej oddziaływania zmiennego i,
- ξ_j - współczynnik redukcyjny dla niekorzystnych oddziaływań stałych G.

W odniesieniu do tego zagadnienia, załącznik krajowy do normy [7] wprowadza następującą uwagę: „Zaleca się, aby przy sprawdzaniu stanów granicznych STR i GEO przyjmować jako miarodajną kombinację oddziaływań mniej korzystne wyrażenie z podanych (2) i (3). Wyrażenie (1) prowadzi z reguły do większego zużycia materiału”. Należy dodać, że nie jest do końca jasne, czy stosowane w normach Eurokod wyrażenie „zaleca się”, we wszystkich przypadkach należy traktować jako nakaz a nie wskazówkę przy stosowaniu, jak to było w „starych” normach. Pomimo tego, z załącznika krajowego wynika zachęta do stosowania przy sprawdzeniu stanu granicznego nośności STR jako miarodajnej kombinacji oddziaływań mniej korzystnej z (2) i (3).

Drugi problem, rozważany w artykule, dotyczy przyjmowanych w obliczeniach wartości charakterystycznych obciążeń użytkowych. Zgodnie normą [8], powierzchnie w budynkach zostały, odpowiednio do ich specyficznego użytkowania, podzielone na kategorie i opisane w tablicy 6.1 tej normy. Każdej kategorii użytkowania powierzchni przyporządkowano, w tablicy 6.2 normy [8], wartości równomiernie rozłożonych obciążeń charakterystycznych q_k , które należy stosować przy projektowaniu stropów. W przypadku wszystkich kategorii użytkowania podane zostały przedziały wartości, z komentarzem, że wartości zalecane zostały podkreślone. Należy to rozumieć, jako możliwość dobrania wartości obciążenia do konkretnej sytuacji projektowej, z jednoczesnym wskazaniem wartości typowej. Tak więc, w standardowym postępowaniu, powinno się przyjmować wartość podkreśloną obciążenia charakterystycznego. W odniesieniu do tego zagadnienia, załącznik krajowy wprowadza następującą uwagę: „Wartości charakterystyczne obciążeń użytkowych nie powinny być mniejsze niż dolne wartości graniczne podane w tablicy 6.2”. Wydaje się, że tak sformułowana uwaga nie jest do końca zrozumiała. Nie zawiera jasnego przekazu, jaką wartość z dopuszczalnego przedziału zaleca się stosować. Komentarz w tej sprawie można jednak znaleźć w podręczniku Starosolskiego [17]. Stwierdza on (str. 15 w [17]), że: „Ten zapis należy traktować jako zachęcenie do stosowania dolnej granicy podanych w [8] widełek obciążeń - a nie wartości zalecanych”. Należy podkreślić wagę zalecenia z załącznika krajowego, ponieważ w większości przypadków, poza kategoriami użytkowania C5 i D1, zalecana w nim wartość obciążenia użytkowego stropów, jest mniejsza od wartości zalecanej (podkreślonej) w normie [8]. Różnice w wartościach dochodzą do $2,0 \text{ kN/m}^2$, w przypadku kategorii użytkowania C3 (co oznacza, że wartość jest o 40% mniejsza). W przypadku kategorii C5 i D1 wartości obciążeń zalecane w normie i załączniku krajowym są zgodne.

W artykule zostaną porównane wyniki obliczeń projektowych stropów przeprowadzonych według dwóch wariantów. Pierwszy wariant, europejski – bez uwzględnienia zaleceń zawartych w załącznikach krajowych do norm [7] i [8]. Drugi wariant, polski – uwzględniający zalecenia zawarte w załącznikach krajowych do tych norm. W wariancie europejskim, przy sprawdzaniu stanu granicznego nośności zostanie uwzględniona kombinacja oddziaływań według równania (1), która w przypadku stropów kategorii użytkowania od A do D prowadzi do

większej sumarycznej wartości obciążeń niż mniej korzystna z wartości uzyskanych z kombinacji (2) i (3). Ponadto zostaną uwzględnione wartości obciążeń zmiennych zalecane (podkreślone) w tablicy 6.2 normy [8]. W wariancie polskim, przy sprawdzaniu stanu granicznego nośności zostanie uwzględniona mniej korzystna kombinacja oddziaływań według równań (2) i (3), natomiast jako wartości obciążeń zmiennych zostaną przyjęte dolne wartości graniczne z przedziałów wartości wskazanych w tablicy 6.2 normy [8].

2. Obliczenia

Przeprowadzono obliczenia, aby porównać wyniki projektowania konstrukcji żelbetowej według wariantu europejskiego i polskiego (scharakteryzowanych we wprowadzeniu). Przyjęto strop żelbetowy o konstrukcji płytowo-belkowej. W obliczeniach uwzględniono trzy kategorie użytkowania powierzchni: A (powierzchnie mieszkalne), B (powierzchnie biurowe) oraz C2 (miejsca zebrań – powierzchnie z zamocowanymi siedzeniami). W rozważaniach celowo wybrano te kategorie użytkowania, ponieważ obciążenia użytkowe stropów w tych kategoriach są najmniejsze co do wartości ze wszystkich uwzględnionych w tablicy 6.2 normy [8]. Wartości równomiernie rozłożonych obciążeń użytkowych q_k , przyjęte w obu wariantach obliczeniowych, dla rozważanych kategorii użytkowania, przedstawiono w tablicy 1, w której podano również zmianę procentową (zmniejszenie) wartości obciążenia przy przyjęciu wariantu polskiego zamiast europejskiego.

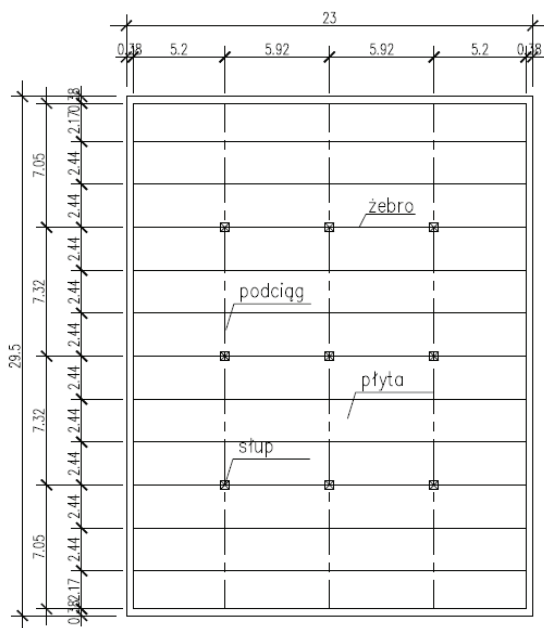
Tablica. 1. Wartości obciążeń użytkowych stropów przyjęte w obliczeniach

Kategoria użytkowania powierzchni	q_k [kN/m ²]		Zmiana (zmniejszenie) wartości [%]
	Wariant europejski (zgodnie z [8])	Wariant polski (zgodnie z załącznikami krajowym do [8])	
A	2,0	1,5	25,0
B	3,0	2,0	33,3
C2	4,0	3,0	25,0

W rozważaniach, czyli trzech przykładach obliczeniowych obejmujących wybrane kategorie użytkowania powierzchni, przyjęto pewne wspólne założenia, które przedstawiono poniżej.

Strop żelbetowy, monolityczny, jako jeden ze stropów wewnętrznych w budynku kilkukondygnacyjnym. Strop o konstrukcji płytowo-belkowej. Układ konstrukcyjny budynku mieszany. Strop oparty, w części środkowej, na monolitycznych, żelbetowych słupach oraz na zewnętrznej ścianie murowanej z cegły ceramicznej pełnej. Szerokość ścian zewnętrznych 38,0 cm. Strop oparty na ścianie za pośrednictwem monolitycznego, żelbetowego wieńca o szerokości 25,00 cm. Zewnętrzne wymiary budynku: długość $L = 29,50$ m, szerokość $B = 23,00$ m. Beton klasy wytrzymałości C25/30. Stal gatunku B 500 SP. Budynek ogrzewany. Klasa ekspozycji XC1. Przyjmując schemat statyczny stropu, kierowano się zaleceniami i uwagami, z podstawowych podręczników do projektowania konstrukcji żelbetowych (stro-

pów płytowo-belkowych) [9,12,13,15,17]. Przyjmując rozpiętości przęseł elementów konstrukcyjnych stropu uwzględniono zalecenia, aby rozpiętości płyty jednokierunkowo zbrojonej wynosiły w granicach od 1,6 do 3,2 m, rozpiętości żebra 5,0 ÷ 7,0 m, a podciągu 5,0 ÷ 8,0 m. Aby uzyskać bardziej równomierny rozkład sił wewnętrznych w elementach wieloprzęślowych, zastosowano zalecenie o zmniejszeniu długości skrajnych przęseł, w stosunku do przęseł środkowych, ale tak, aby nie przekroczyło ono 20%, co jest założeniem koniecznym przy obliczeniach statycznych prowadzonych z wykorzystaniem tablic współczynników Winklera. Przyjęto, że wszystkie wewnętrzne przęsła elementów konstrukcyjnych będą równej długości. Aby uzyskać korzystny rozkład sił wewnętrznych w podciągu, zgodnie z zaleceniami w [17], przyjęto, że rozstaw żeber środkowych będzie równy 0,33 długości środkowego przęsła podciągu oraz, że słupy podpierające podciąg będą usytuowane pod żebrami. We wszystkich przypadkach obliczeniowych uzyskano zbliżony schemat statyczny stropu. Strop składa się z 12-przęsłowej płyty ciągłej, jednokierunkowo zbrojonej, 4-przęsłowego żebra oraz 4-przęsłowego podciągu. Rozpiętości efektywne przęseł elementów konstrukcyjnych podano w tablicy 2. Przykładowo, na rysunku 1 przedstawiono schemat statyczny przyjęty w obliczeniach stropu kategorii użytkowania powierzchni B.



Rys. 1. Przyjęty schemat statyczny w obliczeniach stropu kategorii użytkowania powierzchni B

Ustalając wymiary przekroju poprzecznego belek stosowano zalecenia: wysokość przekroju żebra $h = (1/18 \div 1/15)l_{\text{eff}}$, wysokość przekroju podciągu $h = (1/15 \div 1/12)l_{\text{eff}}$, szerokość belki $b = (1/3 \div 1/2)h$. Ostatecznie przyjęto wymiary: żebra $b \times h = 20 \times 40$ cm oraz podciągi $b \times h = 30 \times 60$ cm. Ustalając grubość otulenia prętów zbrojeniowych betonom przyjęto, w przypadku płyty zmniejszenie klasy konstrukcji do S3 i przy klasie

ekspozycji XC1 minimalną grubość otulenia $c_{\min} = 10$ mm, natomiast w przypadku belek klasę konstrukcji S4 i minimalną grubość otulenia $c_{\min} = 20$ mm (uwzględniając jednocześnie średnicę prętów $\Phi \leq 20$ mm). Dodatek, ze względu na odchyłkę dopuszczalną, w całym stropie przyjęto $\Delta c_{\text{dev}} = 5$ mm i ostatecznie grubość nominalną otulenia prętów zbrojeniowych betonom przyjęto: w płycie $c_{\text{nom}} = 15$ mm i w belkach $c_{\text{nom}} = 25$ mm.

Tablica 2. Rozpiętości efektywne przęseł elementów konstrukcyjnych stropów

Kategoria użytkowania powierzchni	Płyta		Żebro		Podciąg	
	Przęsło skrajne [m]	Przęsło środkowe [m]	Przęsło skrajne [m]	Przęsło środkowe [m]	Przęsło skrajne [m]	Przęsło środkowe [m]
A	2,10	2,33	5,59	5,66	7,15	7,35
B	2,16	2,33	5,33	5,92	7,18	7,32
C2	2,16	2,33	5,25	6,00	7,18	7,32

Ustalając obciążenia działające na strop uwzględniono indywidualne rozwiązania wynikające z kategorii użytkowania stropu. Obciążenia stałe przyjęto zgodnie z normą [8]. We wszystkich przypadkach przyjęto, od spodu stropu, tynk cementowo-wapienny grubości 1,5 cm oraz na stropie izolację w postaci styropianu 3 lub 5 cm i warstwę wyrównawczą w postaci zaprawy cementowej 3 lub 5 cm. Rodzaj podłogi dostosowano do specyficznego użytkowania i przyjęto: parkiet drewniany jesionowy, przy kategorii użytkowania powierzchni A, natomiast terakotę, przy kategorii użytkowania powierzchni B i C2. W niniejszych obliczeniach projektowych nie stawiano szczególnych wymagań optymalizacyjnych. Jednak dobierając grubość płyty, kierowano się uwagą z [17], że każdy centymetr grubości płyty istotnie zwiększa sumaryczne obciążenia działające zarówno na poszczególne elementy konstrukcyjne stropu, jak i inne elementy konstrukcji budynku. W układach płytowo-belkowych nośność płyty wynikająca z nośności strefy ściskanej betonu jest zwykle słabo wykorzystana (stopień zbrojenia zwykle nie przekracza 0,5%). Grubość płyty wynika z nieprzekroczenia warunku stanu granicznego ugięcia. Przyjmując wstępnie grubość płyty zwykle zakłada się, że czym lepsza jest klasa betonu i mniejszy udział obciążeń długotrwałych w obciążeniach, tym wartość stosunku (l_{eff}/d) może być większa. W obliczeniach uwzględniono zalecenia z [9,13,15] i grubość płyty ustalano korzystając z tablic pomocniczych, w których podana jest korelacja pomiędzy grubością, rozpiętością i całkowitym obciążeniem charakterystycznym płyty, przy których ugięcie nie powinno zostać przekroczone. W tych rozważaniach stosowano metodę iteracji, ponieważ ustalenie całkowitego obciążenia charakterystycznego, wymagało wstępnego przyjęcia grubości płyty. W rozważaniach, dla każdej kategorii użytkowania, rozpatrzono dwa warianty obliczeniowe, różniące się wartością obciążenia użytkowego (tabl. 1). W konsekwencji, we wszystkich kategoriach użytkowania, uzyskano różne grubości płyty, które podano w tablicy (tabl. 3), w zależności od rozpatrywanego wariantu obliczeniowego. W przypadku wszystkich kategorii

użytkowania, w polskim wariancie obliczeniowym, grubość płyty była mniejsza o 1,0 cm.

Tablica 3. Całkowite obciążenie charakterystyczne oraz grubości płyt w zależności od kategorii użytkowania powierzchni i wariantu obliczeniowego

Kategoria użytkowania powierzchni	Całkowite obciążenie charakterystyczne, [kN/m ²]		Grubość płyty, [cm]	
	Wariant europejski	Wariant polski	Wariant europejski	Wariant polski
A	6,740	5,990	9,0	8,0
B	7,810	6,560	9,0	8,0
C2	9,259	8,009	10,0	9,0

We wszystkich przypadkach obliczeniowych uwzględniono w obciążeniach ciężar przestawnych ścianek działowych. Zgodnie z zaleceniem normy [8], jeżeli konstrukcja stropu pozwala na poprzeczny rozdział obciążeń, ciężar własny przestawnych ścianek działowych może być uwzględniony jako obciążenie równomiernie rozłożone q_k i dodane do obciążeń użytkowych ustalonych zgodnie z tablicą 6.2 normy [8]. Przy czym, ekwiwalentna wartość obciążenia równomiernie rozłożonego, zależy od charakterystycznej wartości ciężaru własnego ścianek działowych wyznaczonego na 1 metr bieżący ścianki i jest podana w normie [8]. W niniejszych rozważaniach, we wszystkich przypadkach, przyjęto wartość ekwiwalentnego równomiernie rozłożonego obciążenia $q_k = 1,20$ kN/m², czyli największą z możliwych zgodnie z normą [8].

Zgodnie z zaleceniem normy [7], wartości obliczeniowe obciążeń stałych są różne, w zależności od efektu jaki wywołują obciążenia. Jeżeli efekt jest niekorzystny (zwiększenie sił wewnętrznych), to obciążenia charakterystyczne G_k mnoży się przez współczynnik $\gamma_{Gj,sup}$ (dla kombinacji oddziaływań (3) jeszcze dodatkowo przez ξ_j). Jeżeli efekt jest korzystny (zmniejszenie sił wewnętrznych) G_k mnoży się przez $\gamma_{Gj,inf}$. W obliczeniach, przy sprawdzaniu stanu granicznego nośności STR, zgodnie z tablicą A1.2(B) normy [7], przyjęto następujące wartości współczynników: $\gamma_{Gj,sup} = 1,35$, $\gamma_{Gj,inf} = 1,00$, $\xi_j = 0,85$, $\gamma_{Q,1} = 1,50$ oraz, przy kategorii użytkowania A, B i C2, $\psi_{0,1} = 0,7$. Z uwagi na to, że w przykładach obliczeniowych występuje jedynie jedno obciążenie zmienne, będące sumą obciążenia użytkowego i ekwiwalentnego obciążenia od ścianek działowych, kombinacja obciążeń (1), w przypadku niekorzystnym (sup), przyjmie postać:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj,sup} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} = \sum_{j \geq 1} 1,35 G_{k,j} + 1,50 Q_{k,1} \quad (4)$$

a w przypadku korzystnym (inf):

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj,inf} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} = \sum_{j \geq 1} 1,00 G_{k,j} + 1,50 Q_{k,1} \quad (5)$$

Natomiast, kombinacje (2) i (3), w przypadku niekorzystnym (sup), odpowiednio:

$$\begin{aligned} \sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj, sup} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \Psi_{0,1} Q_{k,1} &= \sum_{j \geq 1} 1,35 G_{k,j} + 1,50 \cdot 0,7 Q_{k,1} = \\ &= \sum_{j \geq 1} 1,35 G_{k,j} + 1,05 Q_{k,1} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{Gj, sup} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} &= \sum_{j \geq 1} 0,85 \cdot 1,35 G_{k,j} + 1,50 Q_{k,1} = \\ &= \sum_{j \geq 1} 1,15 G_{k,j} + 1,50 Q_{k,1} \end{aligned} \quad (7)$$

a w przypadku korzystnym (inf), odpowiednio:

$$\begin{aligned} \sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj, inf} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \Psi_{0,1} Q_{k,1} &= \sum_{j \geq 1} 1,00 G_{k,j} + 1,50 \cdot 0,7 Q_{k,1} = \\ &= \sum_{j \geq 1} 1,00 G_{k,j} + 1,05 Q_{k,1} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj, inf} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} &= \sum_{j \geq 1} 1,00 G_{k,j} + 1,50 Q_{k,1} = \\ &= \sum_{j \geq 1} 1,00 G_{k,j} + 1,50 Q_{k,1} \end{aligned} \quad (9)$$

W przypadku wszystkich kategorii użytkowania, w polskim wariancie obliczeniowym, bardziej niekorzystną kombinacją oddziaływań, w przypadku niekorzystnym (sup), była kombinacja wyrażona równaniem (7), natomiast w wariancie europejskim kombinacja (4). W związku z tym, w przypadku korzystnym (inf), stosowano, odpowiednio, w wariancie polskim kombinację (9) a w wariancie europejskim (5).

Obliczenia statyczne, w przypadku wszystkich elementów konstrukcyjnych, wykonano stosując analizę liniowo-sprężystą, wykorzystując tablice współczynników Winklera zgodnie z [13]. Obliczając maksymalne wartości momentów zginających, oraz wartości sił poprzecznych stosowano niekorzystną kombinację oddziaływań (sup), odpowiednio, w wariancie europejskim (4) oraz polskim (7). Natomiast obliczając minimalne wartości momentów stosowano korzystną kombinację oddziaływań (inf), odpowiednio w wariancie europejskim (5) oraz polskim (9). W tablicy 4 zestawiono wartości całkowitych, niekorzystnych i ko-

rzystnych, obliczeniowych obciążeń działających na płyty stropów. W tablicy 5 zestawiono wartości niekorzystnych całkowitych obciążeń obliczeniowych działających na żebra i podciąg, we wszystkich przypadkach obliczeniowych. Zestawienie takie, i porównanie między kategoriami użytkowania, jest uprawnione, ponieważ schematy statyczne stropów w poszczególnych kategoriach użytkowania, są prawie identyczne (tabl. 2). W tablicy 4 i 5 podano również procentowe zmniejszenie wartości obciążenia całkowitego poszczególnych elementów konstrukcyjnych po zastosowaniu w obliczeniach wariantu polskiego.

W tablicy 6 podano wartości maksymalnych momentów zginających w powtarzających się przęsłach M_3 i nad powtarzającymi się podporami M_C w płytach, we wszystkich przypadkach obliczeniowych. Z zestawienia wynika, że w przypadku wszystkich kategorii użytkowania, przyjęcie wariantu polskiego skutkuje mniejszymi wartościami momentów zginających. Zmiana procentowa wartości momentów, pomiędzy wariantem europejskim i polskim, jest identyczna jak zmiana procentowa wartości obciążeń całkowitych w płytach (tabl. 4). Identyczne zmiany procentowe między wartościami sił wewnętrznych (momentów M i sił poprzecznych V), jak w przypadku obciążeń (tabl. 5), pomiędzy wariantem europejskim i polskim, wystąpiły również w żebach i podciągach (w tabl. 7 przedstawiono wartości wybranych momentów w podciągach).

Tablica 4. Całkowite, niekorzystne (sup) i korzystne (inf), obciążenie obliczeniowe płyt w zależności od kategorii użytkowania powierzchni i wariantu obliczeniowego

Kategoria użytkowania powierzchni	Całkowite, niekorzystne, obciążenie obliczeniowe [kN/m ²]			Całkowite, korzystne, obciążenie obliczeniowe [kN/m ²]	
	Wariant europejski	Wariant polski	Zmiana (zmniejszenie) wartości, [%]	Wariant europejski	Wariant polski
A	9,579	7,833	18,0	8,340	7,340
B	11,174	8,656	23,0	9,910	8,160
C2	13,280	10,680	20,0	11,859	10,109

Tablica 5. Całkowite, niekorzystne (sup), obciążenie obliczeniowe żebier i podciągów w zależności od kategorii użytkowania powierzchni i wariantu obliczeniowego

Kategoria użytkowania powierzchni	Całkowite, niekorzystne, obciążenie obliczeniowe żebier, [kN/m]			Całkowite, niekorzystne, obciążenie obliczeniowe podciągów, [kN]		
	Wariant europejski	Wariant polski	Zmiana (zmniejszenie) wartości, [%]	Wariant europejski	Wariant polski	Zmiana (zmniejszenie) wartości, [%]
A	25,877	21,308	18,0	160,359	132,665	17,0
B	29,671	23,231	22,0	189,421	149,515	21,0
C2	34,923	28,275	19,0	223,218	181,541	19,0

Znając wartości sił wewnętrznych przeprowadzono obliczenia potrzebnej ilości zbrojenia, a następnie przyjęto zbrojenie. Ilość zbrojenia wynikająca z obliczeń pozostaje w jednoznacznej korelacji z wartościami sił wewnętrznych. Dlatego zmiana procentowa ilości zbrojenia obliczonego, pomiędzy wariantem europejskim

skim i polskim, jest identyczna jak zmiana procentowa wartości sił wewnętrznych (obciążeń – tabl. 4 i 5). Natomiast zależność ta zmienia się przy przyjmowaniu zbrojenia. Wynika to z wielu, oczywistych, uwarunkowań, np. określonej, dostępnej średnicy prętów, możliwości zmieszczenia prętów w jednej warstwie przy przyjętej średnicy prętów, wymagań konstrukcyjnych itp. Ostatecznie, wariantów zbrojenia może być w konkretnym przypadku wiele. Dlatego, w artykule, nie podaje się przyjętych rozwiązań zbrojenia, a jedynie ogólne tendencje, które zaobserwowano. W przypadku wszystkich kategorii użytkowania, zaobserwowano interesującą prawidłowość dotyczącą zbrojenia płyt. Pomimo tego, że zbrojenie obliczeniowe w wariancie polskim wyszło mniejsze niż w wariancie europejskim, to należało przyjąć zbrojenie większe (sumaryczne zbrojenie było większe od 2% do 10% w przypadku kategorii B). Sytuacja taka wystąpiła, z uwagi na konieczność spełnienia wymagania konstrukcyjnego, dotyczącego maksymalnego rozstawu prętów ($s_{maks,slabs} \leq 2h$) przy, jednocześnie, dostępnej w sprzedaży minimalnej średnicy prętów $\Phi 6$, i przy mniejszej grubości płyty w wariancie polskim (tabl. 3). W przypadku przyjętego zbrojenia żeber i podciągów, zbrojenie w wariancie polskim zawsze było mniejsze niż w europejskim (różnica wyniosła od 10% do 25%). W przypadku wszystkich kategorii użytkowania, summaryczna ilość zbrojenia stropu była mniejsza w wariancie polskim niż w europejskim. Różnica ta wynosiła od 7% do 12% w przypadku kategorii B (największa zmiana wartości obciążenia użytkowego z rozważanych kategorii - tabl. 1).

W obliczeniach dokonano sprawdzenia stanów granicznych użytkowalności. We wszystkich przypadkach płyty sprawdzano metodami dokładnymi, a żebra i podciągi metodami uproszczonymi. Nie został przekroczony żaden stan graniczny. Należy dodać, że optymalizacja przekrojów nie była celem przy projektowaniu.

Tablica 6. Wartości momentów zginających w powtarzających się (środkowych) przekrojach płyt w zależności od kategorii użytkowania powierzchni i wariantu obliczeniowego

Kategoria użytkowania powierzchni	M_1 [kNm]			M_c [kNm]		
	Wariant europejski	Wariant polski	Zmiana (zmniejszenie) wartości, [%]	Wariant europejski	Wariant polski	Zmiana (zmniejszenie) wartości, [%]
A	3,464	2,836	18,0	4,985	4,063	18,0
B	4,159	3,177	24,0	5,836	4,507	23,0
C2	5,053	4,035	20,0	7,111	5,675	20,0

Tablica 7. Wartości momentów zginających w wybranych przekrojach podciągów w zależności od kategorii użytkowania powierzchni i wariantu obliczeniowego

Kategoria użytkowania powierzchni	M_1 [kNm]			M_B [kNm]		
	Wariant europejski	Wariant polski	Zmiana (zmniejszenie) wartości, [%]	Wariant europejski	Wariant polski	Zmiana (zmniejszenie) wartości, [%]
A	295,520	244,860	17,0	349,274	289,233	17,0
B	354,929	279,199	21,0	415,890	327,523	21,0
C2	420,506	341,773	19,0	491,649	399,691	19,0

3. Wnioski

Przeprowadzono obliczenia projektowe żelbetowych stropów konstrukcji płytowo-belkowej, aby stwierdzić, czy zastosowanie przy projektowaniu zaleceń zawartych w załącznikach krajowych do norm PN-EN 1990:2004 Eurokod i PN-EN 1991-1-1:2004 Eurokod 1, ma istotne znaczenie. Rozważono kategorie użytkowania powierzchni A, B i C2. Na podstawie wyników obliczeń sformułowano wnioski, podane poniżej.

1) Uwzględnienie przy projektowaniu zaleceń z załączników krajowych (warianant polski) powoduje istotne zmniejszenie wartości obciążeń, a w konsekwencji sił wewnętrznych i sumarycznego zbrojenia stropów. Korzyść jest tym większa im większe jest zmniejszenie wartości obciążenia użytkowego (w rozważanych przykładach dla kategorii B). Zmniejszenie ilości zbrojenia daje wymierne korzyści finansowe. W rozważanych kategoriach użytkowania, uzyskano zmniejszenie ilości zbrojenia od 7% do 12%.

2) Konsekwencją zmniejszenia wartości obciążenia użytkowego, co wynika z zastosowania zalecenia z załącznika krajowego, jest mniejsza grubość płyty (o 1 cm), w porównaniu do obliczeń zgodnych z zaleceniami europejskimi. Zmniejsza to wartość całkowitego obciążenia, co jest tym istotniejsze im wartość obciążenia użytkowego jest mniejsza. Ponadto istotnie zmniejsza to ilość użytego do wykonania stropu betonu (w przykładach o 6,5 m³).

Literatura

- [1] *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie; z późniejszymi zmianami*
- [2] *PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.*
- [3] *PN-82/B-02000 Obciążenia budowli. Zasady ustalania wartości.*
- [4] *PN-82/B-02001 Obciążenia budowli. Obciążenia stałe.*
- [5] *PN-82/B-02003 Obciążenia budowli. Obciążenia zmienne technologiczne. Podstawowe obciążenia technologiczne i montażowe.*
- [6] *PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.*
- [7] *PN-EN 1990:2004 Eurokod: Podstawy projektowania konstrukcji.*
- [8] *PN-EN 1991-1-1:2004 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-1: Oddziaływania ogólne. Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach.*
- [9] Kamiński M., Pędziwiatr J., Styś D., *Konstrukcje betonowe. Projektowanie belek, słupów i płyt żelbetowych*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 2004.
- [10] Grabiec K., Bogucka J., Grabiec-Mizera T., *Obliczanie przekrojów w elementach betonowych i żelbetowych według PN-B-03264:1999*, Arkady 2002.
- [11] Sieczkowski J., Sieczkowski J., *Przykłady obliczeń konstrukcji murowych i żelbetowych*, WSiP 2001.
- [12] Kobiak J., W. Stachurski W., *Konstrukcje żelbetowe*, T.1. Arkady 1987
- [13] Grabiec K., *Konstrukcje betonowe. Przykłady obliczeń statycznych*, PWN 1992
- [14] *Praca zbiorowa, Podstawy projektowania konstrukcji żelbetowych i sprężonych według Eurokodu 2*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne 2006
- [15] Pędziwiatr J., *Wstęp do projektowania konstrukcji żelbetowych wg PN-EN 1992-1-1:2008*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne 2010
- [16] Knauff M., *Obliczanie konstrukcji żelbetowych według Eurokodu 2*, PWN 2012
- [17] Starosolski W., *Konstrukcje żelbetowe według Eurokodu 2 i norm związanych*, T.1. Wyd. 13, PWN 2012

The effect of recommendations contained in the national annexes to the standards EC0 and EC1 on the design of reinforced concrete structures on the example of the beam-and-slab floor categories of use A, B and C2

Waldemar Budzyński¹

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: w.budzynski@pollub.pl

Abstract: In the european standards of the design of structures – Eurocodes – there are rules giving the designer ability to choose how to proceed. As a result, depending on the decisions are obtained different quantitatively solutions. In this article, on the example of the reinforced concrete floor, shows the differences in the effects of the design of structures, resulting from the application or not in the calculations, recommendations contained in the national annexes to the standards EC0 and EC1. It has been shown that these differences are important.

Keywords: loads, Eurocode, design of structures, reinforced concrete

Możliwości zastosowania polskich kruszyw węglanowych do betonów wysokowartościowych

Jacek Góra

*Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: j.gora@pollub.pl*

Streszczenie: W artykule przedstawiono zagadnienia dotyczące możliwości stosowania kruszyw węglanowych do betonów wysokowartościowych. Zaprezentowano wyniki badań własnych, w których rozważano wpływ trzech polskich kruszyw łamanych (dolomitowego, bazaltowego i granitowego) na właściwości wytrzymałościowe betonów. Wszystkie wyniki poddano analizie statystycznej. Wpływ kruszywa dolomitowego na wytrzymałość na ściskanie BWB okazał się bardziej korzystny niż granitowego. Wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu betonów z kruszywem dolomitowym były największe. Należy uznać pełną przydatność polskich kruszyw węglanowych, w zakresie właściwości wytrzymałościowych, do betonów wysokowartościowych.

Słowa kluczowe: beton wysokowartościowy, łamane kruszywo węglanowe, przyczepność, właściwości wytrzymałościowe betonu.

1. Wprowadzenie

Pomimo wielu korzystnych właściwości kruszyw węglanowych dość sceptycznie podchodzi się do możliwości stosowania tych kruszyw do betonów konstrukcyjnych wysokiej jakości. Można przypuszczać, że jest to wynikiem dużej zmienności właściwości kruszyw węglanowych w zależności od złoża, zazwyczaj niższą wytrzymałością skały w porównaniu do bazaltu lub granitu, uznawanych powszechnie za najlepszy surowiec skalny do produkcji kruszyw, czy obawą przed wystąpieniem szkodliwej w przypadku betonu reakcji alkalia-węglany. Brak zaufania do tych kruszyw jest nieuzasadniony. Wytrzymałość na ściskanie zbitych wapieni i dolomitów w wielu złożach znacznie przekracza 100 MPa (tabl. 1), nie ustępując lub nawet przewyższając w wielu przypadkach wytrzymałość granitów, czy bazaltów. Skały granitowe i bazaltowe mogą ulegać niekorzystnym zjawiskom (np. wietrzenie granitów, zgorzel słoneczna w bazaltach) pogarszającym ich właściwości w stopniu wykluczającym przydatność na kruszywo do betonów. Również w przypadku tych skał można podać przykłady dużego zróżnicowania cech mineralnych i fizykochemicznych w zależności od złoża, a także możliwości wystąpienia szkodliwych oddziaływań chemicznych między kruszywem i alkalią z zaczynu cementowego (reakcja alkalia-krzemionka w niektórych złożach granitów). Każdy surowiec skalny przeznaczony do produkcji kruszywa należy poddać badaniu właściwości własnych, a przede wszystkim badaniom betonu z danym kruszywem. Decyzja o przydatności kruszywa do betonu określonej jakości powinna być podejmowana wyłącznie na podstawie wyników tych badań, niezależnie od pochodzenia (rodzaju) skały.

2. Kruszywa węglanowe a właściwości betonu

Skały węglanowe są coraz powszechniej przeznaczane na kruszywo łamane do betonu, co wynika z obszerności zasobów tego surowca oraz uwarunkowań ekonomicznych. W Polsce eksploatowanych jest wiele złóż wapieni zbitych i dolomitów, z których uzyskuje się kruszywa o właściwościach umożliwiających produkcję betonów wysokiej jakości (tabl. 1). Skały węglanowe są stosowane do produkcji kruszywa łamanego w wielu krajach, a betony wykonywane z zastosowaniem tych kruszyw cechują wysoce korzystne właściwości techniczne oraz trwałość. Jednak z uwagi na możliwość występowania w betonie szkodliwych oddziaływań chemicznych pomiędzy kruszywem a alkaliowymi znajdującymi się w cemencie należy zarówno skałę w złożu jak i otrzymane z niej kruszywo badać pod kątem oceny wrażliwości obydwu materiałów na tego typu reakcje [1, 2, 3].

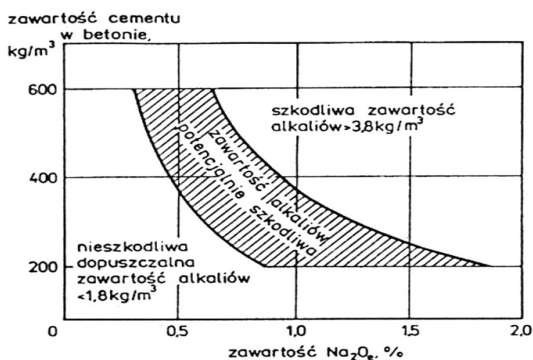
Z szerokich badań ekspansji alkalicznej polskich skał węglanowych z 25 rozpoznanych złóż wynika, że są one niereaktywne lub słabo reaktywne i odporne na działanie alkaliów. Wyjątek stanowią dwa złoża dolomitów (Zachełmie i Korzeczeko) i dwa wapieni porowatych (Karsy i Trawniki) o zawartości krzemionki przekraczającej 20% [3]. Z uwagi na długotrwałość szkodliwych oddziaływań alkalia-kruszywo i ujawnianie się efektów po wielu latach należy w przypadku kruszyw potencjalnie reaktywnych minimalizować skutki tych reakcji poprzez odpowiedni dobór składników betonu i technologię wykonywania.

Reakcja alkalia-kruszywo węglanowe może powodować uszkodzenia struktury betonu poprzez ekspansję, spowodowaną zwiększającą się objętością produktów reakcji (wapienie krzemionkowe) lub pęcznieniem odsłoniętych minerałów ilastych pod wpływem wody (reakcja dedolomityzacji). W konsekwencji powoduje to zarysowanie, pękanie, czy nawet zniszczenie betonu.

Z uwagi na powolność tych procesów, które mogą się ujawniać dopiero po kilku latach, bardzo ważnym jest wyeliminowanie potencjalnych szkodliwych oddziaływań chemicznych w betonie już na etapie określania przydatności danego surowca skalnego na kruszywo do betonu poprzez odpowiednie badania [4, 5, 6, 7].

Jednym z zalecanych sposobów zapobiegania szkodliwym skutkom tych reakcji jest ograniczanie w betonie zawartości alkaliów poprzez stosowanie cementów niskoalkalicznych. Przyjmuje się, że zawartość alkaliów w takich cementach w przeliczeniu na równoważnik Na_2O_e ($\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O}$) w procentach wagowych nie powinna przekraczać wartości 0,6%. Tego typu ograniczenie może okazać się jednak niewystarczające w przypadku dużych zawartości cementu w 1 m^3 betonu. W betonach wysokowartościowych zawartość wagowa Na_2O_e (zakładając zawartość na poziomie 0,6%) może przekraczać 3 kg/m^3 . Z tych powodów zaproponowano, aby za bezpieczną zawartość Na_2O_e w 1 m^3 betonu uznać $1,8 \text{ kg}$ (rys. 1) [8]. Natomiast przekroczenie wartości $3,8 \text{ kg/m}^3$ jest zdecydowanie szkodliwe w przypadku stosowania kruszyw reaktywnych z alkaliowymi. W zakresie pośrednim wielkość ekspansji zależy od reaktywności kruszywa i zawartości rozpuszczalnych alkaliów

w cemencie. Cementy z dodatkami pucolanowymi (popioły lotne, mikrokrzemionka) oraz hydraulicznymi (żużle), a także cementy hutnicze, mogą w bardzo dużym stopniu ograniczać szkodliwą ekspansję w betonie z kruszywem reaktywnym [9].



Rys. 1. Graniczne zawartości alkaliów w betonie w przypadku stosowania kruszyw reaktywnych [10]

W przypadku kruszywa węglanowego w wyniku wzajemnego oddziaływania węgla wapnia i zaczynu cementowego następuje zwiększenie szczelności i przyczepności w warstwie kontaktowej, co z kolei powoduje zwiększenie wytrzymałości i polepszenie trwałości betonu [11]. Warto podkreślić, że betony z kruszywami węglanowymi charakteryzują się wieloma cennymi właściwościami [12, 7]:

- zwiększoną przyczepnością zaczynu cementowego do kruszywa,
- mniejszą nasiąkliwość i przepuszczalnością,
- mniejszymi odkształceniami termicznymi (np. o ok. 60% w stosunku do betonu z granitem, kwarcytem, czy piaskowcem krzemionkowym),
- niskim skurczem i pęczaniem,
- wydzielaniem bardzo małej ilości promieniowania radioaktywnego,
- wyższą odpornością na korozję siarczanową wynikającą z dobrej wodoszczelności.

Ogólnie uznaje się, że do betonów wysokowartościowych należy stosować kruszywa zwykle bardzo dobrej jakości, przy czym nie tylko wytrzymałość ziaren kruszywa ma istotne znaczenie, lecz również przyczepność do zaczynu cementowego. Stwierdzono, że charakterystyka mineralna kruszywa grubego ma wpływ na wytrzymałość otrzymywanego betonu, ale brak jest prostych wytycznych dotyczących wyboru kruszywa [14]. Kruszywa pochodzące ze skał magmowych lub osadowych węglanowych o wytrzymałości powyżej 100-120 MPa mogą być przydatne także do betonów wysokiej wytrzymałości [15, 16]. Pogląd ten w przypadku kruszyw węglanowych wymaga potwierdzenia na drodze doświadczalnej, gdyż dotąd nie opublikowano szerszych wyników badań betonów wysokowartościowych wykonywanych z tego typu rodzimych kruszyw.

Tablica 1. Właściwości wybranych skał osadowych i metamorficznych [6, 13]

Rodzaj skał i miejsce występowania	Strata prążeń, %	Skład chemiczny, %					Gęstość, kg/dm ³	Porowatość, %	Nasiąkliwość, %	Ścieralność na tarczy <i>Boelmege</i> , cm	Wytrzymałość na ściskanie, MPa
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
WAPIENIE ZBITE											
Morawica k. Kielc	42,2		0,6	53,3	0,7	0,2	2,69	4,1	1,4	0,4	90
Jaźwica k. Kielc	43,3	1,0	0,5	54,4	0,5	ślady	2,72	1,8	0,89	0,59	97
Karwów k. Opatowa	43,6	0,8	0,3	53,1	1,7	1,1	2,75	2,1	0,3	0,81	98
Dębska Wola k. Kielc	42,2			52,7	1,0	brak	2,68	3,3	0,12	0,60	78
Gómo k. Kielc							2,70	1,46	0,71	0,39	105
Kowala k. Kielc	41,8	4,4	1,3	51,4	2,1	0,1				0,6	75
Jaworznia k. Kielc	43,5	1,2	0,5	53,9	0,5	-	2,74	1,5	0,21	0,43	83
Bielawy k. Bydgoszczy	18-55	7-23	0,3	41-52	1,5	0,5-1,2	2,69	3,5	3,7	0,7	45
Ostrówka k. Kielc	43,3	0,2	0,1	54,9	0,3	-	2,70	0,4	0,10	0,6	140
Borsuki k. Lublina	42,1	21,8		32,8	2,1	ślady	2,67	7,0	5,90	0,28	26
Czatkowice k. Krzeszowic		0,3	1,7				2,69	0,6	0,28	0,45	114
Goraźdże		5,5	1,61	50,7	0,7	ślady	2,69	9,05	2,41	0,97	38
Strzelce Opolskie		0,6-12	0,5-5,5	44-55	0,2-6,2	ślady	2,73	15,74	3,07	2,20	36
Kamień Śląski Izbnicko		0,5	0,1-1,0	55,1	0,3	ślady	2,71	6,27	0,72	0,91	41
Tarnów Opolski		0,5-6,2	0,4-2,6	42-54	0,5-8,7	ślady	2,70	9,31	1,02	0,79	38
Góra Polom		7,0	-	46,0	6,0	42,7	2,72	0,56	0,20	0,42	120
Góra Silesia	42,3	7,0	-	55,0	0,3-5,9	44,5	2,73				
Dębnik		1,4	0,4	57,8	0,9		2,69	0,4	0,6	0,65	93
WAPIENIE (trawertyn)											
Raciszyn k. Działoszyna	42,9	1,5	0,7	54,3	0,4	0,5	2,70	3,7	0,65	0,39	58
WAPIENIE LEKKIE POROWATE											
Trawniki k. Lublina	31,2	23,1		40,1	0,2	ślady	2,59	41,3	24,1	1,0	16
Karsy k. Kielc	27,3	34,7	1,0	34,6	0,4	0,4	2,50	42,0	26,0	1,43	15
Pińczów k. Kielc	43,3	3,8	0,9	52,5	0,8	ślady	2,68	35,5	16,3	2,12	10
Józefów k. Biłgoraja	43,1	2,0	0,9	53,1	0,6	9,4	2,65	45,7	17,7	2,37	3
DOLOMITY											
Korzecko k. Kielc	45,4	2,2					2,7	2,9	0,7	0,63	69
Laskowa k. Kielc	46,0	2,1					2,83	1,6	0,3	0,47	120
Zagnańsk k. Kielc		5,7	-	32,0	16,8	brak	2,85		0,3		215
Radkowice k. Kielc			0,7	32,6	19,1	brak	2,86	3,3	0,8	0,35	135
Nielepice k. Krakowa	42,7	1,8			18,7	nie okr	2,69	5,2	1,12	0,44	102
Chełmce k. Kielc	45,4	3,3					2,82	0,4	0,3	0,36	200
Piekary Śląskie				54,0	0,5		2,83	17,3	5,9	1,4	70
Rędziny k. Wrocławia	45,6	2,5	1,4	30,0	19,0	nie okr	2,86	0,35	0,2	1,0	153
Libiąż k. Chrzanowa		0,4-1,9					2,83	4,9	1,9	0,28	64
Tenczynek k. Krzeszowic	46,0			32	19,8		2,81	2,13	0,3	0,33	126
Podleśna k. Zawiercia		1,7	0,1-2,9	29-33	14-22		2,86	3,49	0,49	0,55	90
Imielin				31,4	19,4	0,6	2,83	7,1	2,32	0,5	65
Bolećcin			1,3	32,6	18,5	0,1	2,79	13,7	5,65	1,07	43

Liczne przykłady wyników badań zagranicznych [4, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24] potwierdzają jednak przydatność kruszyw węglanowych do betonów konstrukcyjnych wysokiej jakości, w tym betonów wysokowartościowych o bardzo dobrych parametrach użytkowych. Obszerne zasoby rodzimych wapieni i dolomitów zbitych o właściwościach nie ustępujących kruszywom ze skał magmowych dają podstawy do prowadzenia badań nad wykorzystaniem tych kruszyw do wykonywania betonów wysokowartościowych. Zdaniem niektórych badaczy [7] wśród skał używanych do produkcji kruszywa do betonów ze względu na korzystne właściwości wyróżniają się właśnie zbite skały węglanowe i bazalty.

3. Wyniki badań i ich omówienie

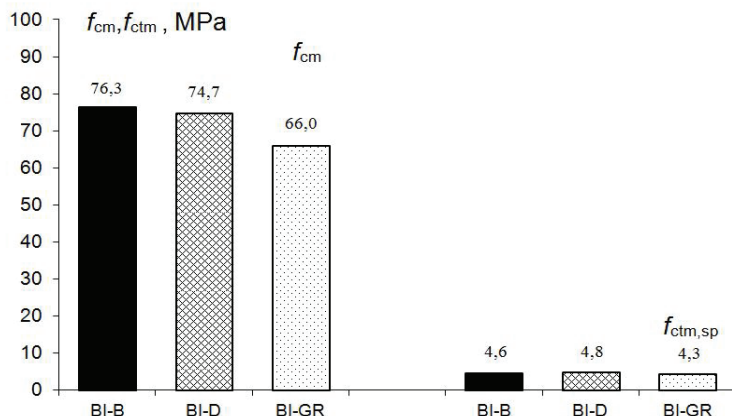
Badania przeprowadzono w zakresie betonów o stałej wartości $w/c = 0,28$ z zastosowaniem łamanego kruszywa grubego dolomitowego (D) z Laskowej k/Kielc oraz celem porównania granitowego (GR) z Granicznej k/Strzegomia i bazaltowego (B) ze złoża Gracze [25, 26]. W porównywanych betonach przyjęto zasadę zachowania tej samej objętości kruszywa grubego. Stopień ciekości mieszanek odpowiadał tradycyjnej konsystencji półcieklej oraz klasom konsystencji S2/S3 zgodnie z PN-EN 206-1 [27]. Zawartość powietrza w mieszankach betonowych określona metodą ciśnieniową była mniejsza od 1,5%. W badaniach stosowano próbki walcowe o średnicy podstawy 150 mm i wysokości 300 mm. Równoległości powierzchni ściskanych uzyskano poprzez szlifowanie. Wiek betonów w chwili badania wynosił 28 dni. W celu uwydatnienia wpływu kruszywa na rozpatrywane właściwości betonów, zrezygnowano w badanych betonach z dodatku pyłów krzemionkowych, zazwyczaj stosowanych w betonach wysokowartościowych.

Poniżej zamieszczono wyniki badań betonów o porównywalnym składzie, różniącymi się rodzajem zastosowanego cementu. W betonach wysokowartościowych oznaczonych jako BI stosowano cement portlandzki CEM I 42,5 HSR NA (rys. 2), a w betonach BII cement portlandzki CEM I 42,5R (rys. 3).

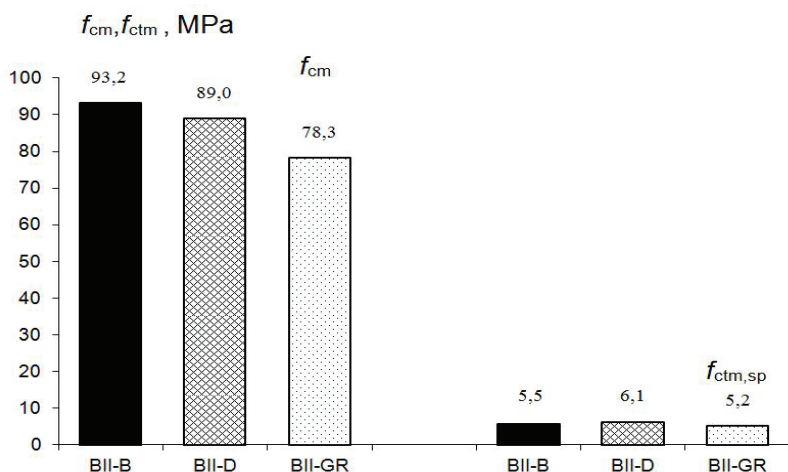
Według PN-EN 206-1 [27] betony BI-B oraz BI-D spełniają wymagania dotyczące klasy C70/85, a BI-GR klasy niższej C60/75. Z kolei betony wykonane z cementem CEM I 42,5R sklasyfikowano, w każdym przypadku, o klasę wyżej: BII-D i BII-B należą do klasy C80/95, natomiast BII-GR do C70/85. Relacje pomiędzy wytrzymałościami średnimi porównywanych betonów w seriach BI i BII są takie same – najwyższe wartości określono w betonach z kruszywem bazaltowym, nieznacznie mniejsze w betonach z kruszywem dolomitowym (przy statystycznie nieistotnych różnicach, zgodnie z testem NIR [25]), a statystycznie istotnie mniejsze w betonach z kruszywem granitowym.

Porównując wytrzymałości średnie na rozciąganie również nie stwierdzono statystycznie istotnych różnic pomiędzy betonami z kruszywem dolomitowym i bazaltowym, przy czym większe wartości uzyskano stosując dolomit. Natomiast w obydwu seriach BI i BII, wyraźnie mniejsze wartości określono w betonach z kruszywem granitowym, przy statystycznie istotnych różnicach w porównaniu do dolomitu i bazaltu.

Analizując przytoczone wyniki badań warto odnotować bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe betonów z kruszywem dolomitowym, porównywalne z wynikami betonów z kruszywem bazaltowym. Zaskakująco słabe wytrzymałości określono przy zastosowaniu do betonów kruszywa granitowego. Poniżej dokonano próby wyjaśnienia otrzymanych zależności.



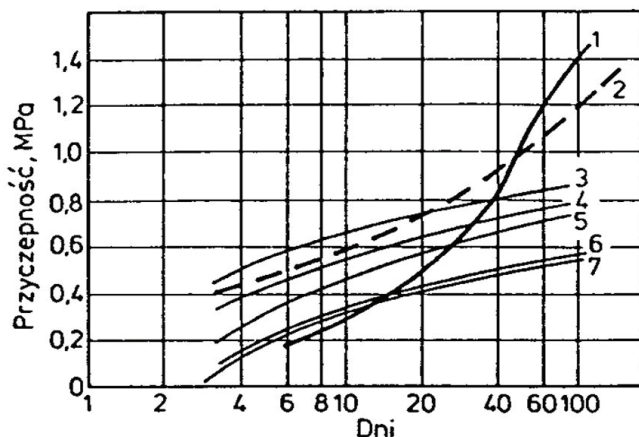
Rys. 2. Średnie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu betonów wysokowartościowych BI z cementem CEM I 42,5 HSR NA po 28 dniach twardnienia



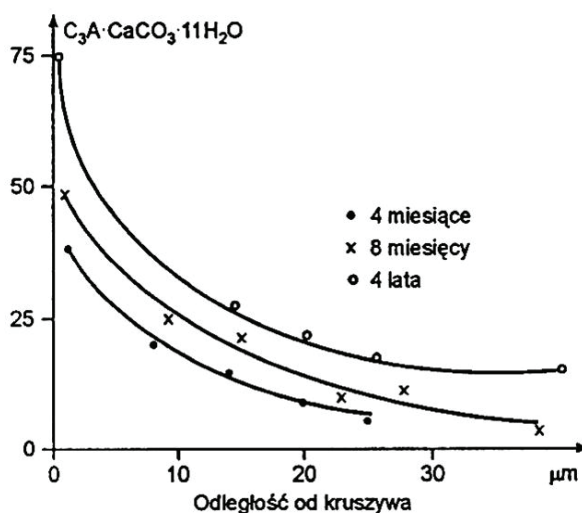
Rys. 3. Średnie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu betonów wysokowartościowych BII z cementem CEM I 42,5R po 28 dniach twardnienia

W obecności skał węglanowych zawierających kalcyt, stwierdzono występowanie reakcji z zaczynem cementowym, w wyniku której następuje uszczelnienie struktury warstwy kontaktowej i wzrost przyczepności zaczynu do kruszywa (rys. 4). Zmiany w tym obszarze, w obecności kruszyw węglanowych, dotyczą dysorientacji kryształów portlandytu, a także powstawania karboglinitu $C_3A \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O$ (rys. 5). Fakt oddziaływań chemicznych wapień-zaczyn cemen-

towy stwierdzono na podstawie ubytków powstałych na polerowanej powierzchni tej skały. Korzystne zmiany w zakresie przyczepności, wpływającej na właściwości wytrzymałościowe betonu, można zaobserwować już około 20 dnia dojrzewania zaczynu (rys. 4).



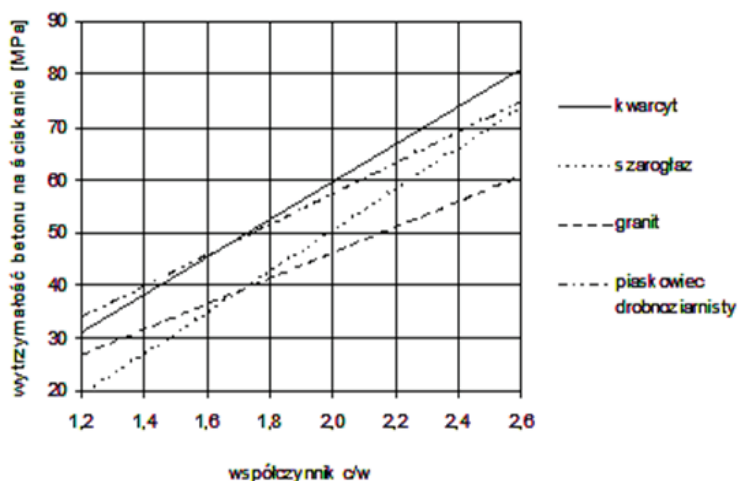
Rys. 4. Wpływ rodzaju kruszywa na przyczepność do zaczynu z cementu portlandzkiego o $w/c = 0,35$ [29]: 1 – wapień polerowany, 2 – wapień łamany, 3 – kwarc polerowany, 4 – kwarc, żwir naturalny, 5 – kalcyt polerowany, 6 – skałki polerowane, 7 – granit polerowany



Rys. 5. Zawartość karboglinianu $C_3A \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O$ w strefie kontaktowej [30]

Wskaźnik rozkruszenia, będący miarą wytrzymałości na miażdżenie, zastosowanego w badaniach kruszywa granitowego jest 3,5-krotnie większy, niż w przypadku kruszywa bazaltowego [25]. Ponadto powierzchnia przełamu ziaren kruszywa granitowego jest szklista [13], w przeciwieństwie do kruszywa bazaltowego, którego ziarna charakteryzują się mikroszorstkością [28], co powoduje lepszą przyczepność zaczynu cementowego do tych ziaren. Stwierdzono, że

w przypadku betonów z kruszywem granitowym wzrost wartości współczynnika c/w powoduje mniejsze przyrosty wytrzymałości na ściskanie, a przy $c/w = 2,6$ różnica w stosunku do betonu z kruszywem kwarcytowym osiąga 25% [31].



Rys. 6. Wpływ rodzaju kruszywa i współczynnika c/w na wytrzymałość betonu na ściskanie [31]

4. Wnioski końcowe

Przeprowadzone badania wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie betonów wysokowartościowych są zgodne z zagranicznymi wynikami badań, w których wykazano pełną przydatność kruszyw węglanowych do BWW. W betonach z kruszywem dolomitowym osiągnięto klasy C70/85 oraz C80/95 bez konieczności stosowania pyłów krzemionkowych, takie same, jakie osiągnięto stosując kruszywo bazaltowe. Wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu BWW z kruszywem dolomitowym były największe. Dobre właściwości wytrzymałościowe betonów z kruszywem węglanowym, porównywalne z właściwościami betonów z kruszywem bazaltowym, można tłumaczyć zwiększoną przyczepnością zaczynu cementowego do tych kruszyw [29], wynikającą z reaktywności chemicznej kalcytu zawartego w kruszywie. Słabe właściwości wytrzymałościowe betonów z kruszywem granitowym mają związek z gruboziarnistą strukturą skały i jej dużą podatnością na rozkruszenie, a także gorszą przyczepnością zaczynu do powierzchni ziaren kruszywa.

Literatura

- [1] Hobbs D. W., *Alkali-silica reaction in concrete*, Thomas Telford Ltd., London 1988
- [2] Hooton R. D., *Permeability and pore structure of cement pastes containing fly ash, slag and silica fume*, ASTM Symposium, Denver 1984
- [3] Piasta J., *Zachowanie się kruszyw węglanowych w betonach z cementami o różnej zawartości alkaliów*, zeszyty naukowe Politechniki Świętokrzyskiej B-8, Kielce 1980.
- [4] Neville A. M., *Właściwości betonu*, Polski Cement, Kraków 2000.
- [5] Owsiak Z., *Reakcje kruszyw krzemionkowych z alkaliami w betonie*, Ceramika, Polski Biuletyn Ceramiczny, Vol. 72, Kraków 2002.

- [6] Piasta J., *Technologia betonów z kruszyw łamanych*, Arkady, Warszawa 1974.
- [7] Piasta J., Piasta W. G., *Beton zwykły*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1994.
- [8] Kurdowski W., *Chemia cementu*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1991.
- [9] Nixon P., Page C., *Pore Solution Chemistry and Alkali Aggregate Reaction*, ACI SP100-94, Atlanta 1987.
- [10] Oberholster R. E., Van Aardt J. H. P., Brandt M. P., *Durability of Cementitious Systems*, Applied Science Publishers, London 1983.
- [11] Maso J. C., *The Bond between Aggregates and Hydrated Cement Paste*, 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Sub-theme VII-1, Paris 1980.
- [12] Jamróży Z., *Beton i jego technologie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2003.
- [13] Kozłowski S., *Surowce skalne Polski*, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1986.
- [14] Aïtcin P. C., Mehta P. K., *Effect of coarse-aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete*, ACI Materials Journal, Vol. 87/1990.
- [15] Mierzwa J., *Niektóre aspekty wpływu kruszywa na właściwości wytrzymałościowe betonów*, Konferencja „Beton na progu nowego milenium”, Polski Cement, Kraków 2000.
- [16] Piasta J., Piasta W., *Kruszywa a betony wysokiej wytrzymałości*, Przegląd Budowlany nr 89/1992.
- [17] Alexander M. G., *Aggregates and the Deformation Properties of Concrete*, ACI Materials Journal, Vol. 93/1996.
- [18] Cetin A., Carrasquillo R., *High-Performance Concrete: Influence of Coarse Aggregates on Mechanical Properties*, ACI Materials Journal, No. 3/1998.
- [19] Donza H., Cabrera O., Irassar E. F., *High-strength concrete with different fine aggregate*, Cement and Concrete Research, Vol. 32/2002.
- [20] Larrard F., Belloc A., *The Influence of Aggregate on the Compressive Strength of Normal and High Strength Concrete*, ACI Materials Journal, No. 5/1997.
- [22] Sengul Ö., Tasdemir C., Tasdemir M., *Influence of Aggregate Type on Mechanical Behavior of Normal- and High-Strength Concretes*, ACI Materials Journal, Vol. 99/2002.
- [23] Wu K.-R., Chen B., Yao W., Zhang D., *Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete*, Cement and Concrete Research, Vol. 31/2001.
- [24] Zhon F. P., Lydon F. D., Barr B. I. G., *Effect of Coarse Aggregate on Elastic Modulus and Compressive Strength of High Performance Concrete*, Cement and Concrete Research, Vol. 25/1995.
- [25] Góra J., *Wpływ kruszyw węglanowych, granitowych i bazaltowych na doraźne właściwości mechaniczne i odkształceniowe betonów zwykłych oraz wysokowartościowych*, praca doktorska, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2005.
- [26] Piasta W., Budzyński W., Góra J., *Wytrzymałość na rozciąganie betonów zwykłych i wysokiej wytrzymałości z kruszywami ze skał magmowych i osadowych*, Przegląd Budowlany 10/2011.
- [27] PN-EN 206-1:2014-04 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [28] Grzeszczyk S., Matuszek-Chmurowska A., *Wpływ rodzaju kruszywa na mikrostrukturę warstwy przejściowej i właściwości betonów wysokowartościowych*, 50 Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, T. 3, Warszawa-Krynica 2004.
- [29] Zimbelmann R., *A Contribution to the Problem of Cement-Aggregate Bond*, Cement and Concrete Research, Vol. 15/1985.
- [30] Grandet J., Ollivier J. P., *Orientation des hydrates au contact des granulates*, 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris 1980.
- [31] Alexander M. G., *Fracture energies of interfaces between cement paste and rock, and application to the engineering behaviour of concrete*, Proceedings International RILEM Conference, Noordwijk, Netherlands, E & FN Spon, London 1991.

Usability of polish carbonate aggregates to high-performance concretes

Jacek Góra

Department of General Construction, Faculty of Civil Engineering and Architecture,
Lublin University of Technology, e-mail: j.gora@pollub.pl

Abstract: The article presents the problem of usability of carbonate aggregates to high-performance concretes. High performance concretes were tested to find an effect of the three different polish crushed aggregates (basalt, granite and dolomite) on concrete strength properties. All the results were analyzed statistically. The effect of dolomite aggregate on compressive strength of HPC was much more advantageous than that of granite aggregate. Splitting tensile strength of high-performance concretes with dolomite aggregate was significantly higher than that of concretes with basalt and granite aggregate. The usefulness of polish carbonate aggregates to high-performance concretes in the field of the strength properties should be accepted.

Keywords: high-performance concrete, carbonate crushed aggregate, adhesion, strength properties of concrete.

Charakterystyka wybranych materiałów pucolanowych wykorzystywanych jako częściowy zamiennik spoiwa cementowego

Stanisław Fic¹, Przemysław Brzyski²

¹Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: s.fic@pollub.pl

²Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: p.brzyski@pollub.pl

Streszczenie: W związku z dążeniem do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych propagowany jest zrównoważony rozwój w budownictwie. Wśród spoiw najpowszechniej stosowany jest cement, który emituje znaczne ilości dwutlenku węgla do atmosfery. Możliwa jest częściowa zamiana cementu na materiały pucolanowe, będące często odpadem przemysłowym lub naturalnym materiałem mineralnym. Częściowa redukcja cementu na rzecz pucolan, może wpłynąć na poprawę niektórych właściwości mieszanek, czy też stwardniałych zapraw i betonów, np. może zająć poprawa urabialności, wodoszczelności, mrozoodporności czy właściwości mechanicznych oraz odporności na agresję chemiczną. Zredukowana zostaje ilość CO₂ emitowanego do atmosfery, gdyż sztuczne pucolany (popiół lotny oraz mikrokrzemionka) są produktem ubocznym działań przemysłowych, a więc ogranicza się w ten sposób też problem z ich składowaniem.

W niniejszym artykule skupiono się na przeglądzie materiałów pucolanowych sztucznych i naturalnych (popiół lotny, mikrokrzemionka, popiół z łusek ryżowych, metakaolinit), które są stosowane jako częściowy zamiennik cementu. Opisane zostały metody ich pozyskiwania oraz ich wpływ na właściwości docelowych materiałów budowlanych.

Słowa kluczowe: budownictwo zrównoważone, dodatki mineralne

1. Wprowadzenie

Podstawowym spoiwem budowlanym jest cement portlandzki. Udział przemysłu cementowego w globalnej emisji gazów cieplarnianych wynosi 3%, czyli 1,4 mld ton ekwiwalentu CO₂ [8]. Produkcja 1 tony klinkieru powoduje emisję 510 kg dwutlenku węgla do atmosfery [8]. Emisja CO₂ z przemysłu cementowego stanowi ponad 50% ogólnej emisji z przemysłu oraz jest na trzecim miejscu całkowitej, zaraz po emisji dwutlenku węgla z samochodów spalinowych oraz emisji użytkowej. Do wyprodukowania 1 kg cementu potrzeba ok. 1,5 kg surowców [5]. Produkcja cementu przyczynia się do globalnego ocieplenia oraz wyczerpywania zasobów energii nieodnawialnej. Może również przyczynić się do degradowania lokalnego środowiska naturalnego. Dlatego też wskazana jest redukcja ilości klinkieru na tonę cementu poprzez wykorzystanie odpadów przemysłowych jako składników cementu w ilościach nie wpływających na pogorszenie jego właściwości lecz ich modyfikację, odpowiednią do celów zastosowania danego cementu. Tym sposobem można wpłynąć na obniżenie emisji CO₂. Przykładem mogą być wysoce reaktywne materiały pucolanowe. Są to materiały o utajonych właściwościach wiążących, gdyż same zmieszane z wodą nie wiążą, natomiast reagują z portlandytem (Ca(OH)₂), tworząc w ten sposób produkt o właściwościach hydraulicznych. Głównym składnikiem pucolan jest reaktywna krzemionka w fazie amorficznej.

W wyniku hydratacji cementu, będącej reakcją chemiczną składników zawartych w cemencie (głównie krzemianów wapnia) z wodą otrzymywane są głównie uwodnione krzemiany wapnia (oznaczane jako CSH) oraz portlandyt (oznaczany jako CH). Największy udział objętościowy wśród produktów ma faza CSH, która to decyduje o wytrzymałości cementu, natomiast ilość CH stanowi około 25% objętości otrzymanych produktów hydratacji. Portlandyt jest związkiem rozpuszczalnym w wodzie, zwiększa porowatość betonu, a także przyczynia się do obniżenia jego odporności na agresję chemiczną. Dodatek pucolanowy do mieszanki spowoduje zainicjowanie reakcji między amorficzną krzemionką zawartą w pucolanach z wodorotlenkiem wapnia, będącym produktem hydratacji cementu. Reakcja pucolanowa doprowadzi do zwiększenia fazy CSH oraz zmniejszenia ilości CH.

Wyróżnia się pucolany naturalne (jako surowce, występujące w przyrodzie lub poddane kalcynacji w celu uaktywnienia pucolanowego) oraz pochodzenia sztucznego, głównie będących odpadami przemysłowymi. Termin pucolana został zaczerpnięty od nazwy miejscowości Pozzuola, położonej w pobliżu Wezuwiusza, gdzie znajdowały się liczne pokłady materiałów o wspomnianych właściwościach. Naturalne pucolany wulkaniczne stosowali starożytni Rzymianie jako dodatek do zapraw wapiennych, poprawiając właściwości mechaniczne oraz odporność spoiwa powietrznego na działanie wody.

W artykule przedstawiono i scharakteryzowano główne materiały pucolanowe wykorzystywane w technologii betonu, metody ich otrzymywania, wpływ na właściwości betonu/zapraw oraz zwrócono uwagę na ekologiczny aspekt ich wykorzystania.

2. Materiały pucolanowe

2.1. Popiół lotny

Przemysł energetyczny w Polsce oparty jest głównie na węglu kamiennym. Produktem ubocznym powstającym w czasie procesu spalania węgla kamiennego czy też brunatnego jest popiół lotny. Jest on otrzymywany przez elektrostatyczne lub mechaniczne odseparowanie cząstek frakcji pyłastej z gazów odlotowych z elektrowni. Popiół lotny jest składnikiem powszechnie stosowanych cementów portlandzkich CEM II tzw. popiołowych. W Polsce wytwarzane jest prawie 20 mln ton popiołów lotnych i żużli paleniskowych. Większa ich część spełnia wymagania stawiane w normach i nadaje się jako dodatek lub zamiennik spoiwa w betonach [3]. Dlatego też, z uwagi na łatwy dostęp w Polsce oraz jego niską cenę, popiół lotny jest najpopularniejszym pucolanowym zamiennikiem części cementu. Jedna tona popiołu lotnego w składzie cementu lub betonu do przynosi redukcję około 400 kg emisji gazów cieplarnianych. W Polsce i Europie głównie w technologii cementu i betonu wykorzystuje się popioły lotne krzemionkowe, pochodzące ze spalania węgla kamiennego. Mniej popularne są popioły lotne

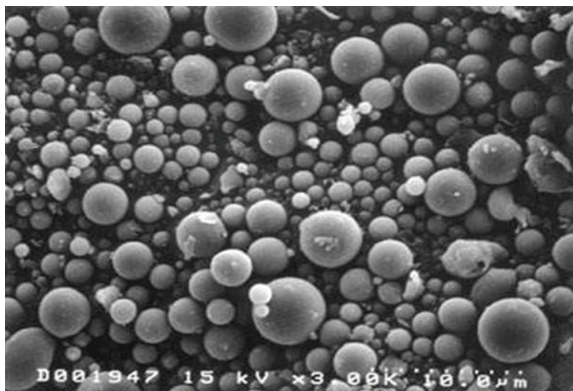
wapienne, pochodzące głównie ze spalania węgla brunatnego. Nie są one jeszcze przebadane w takim stopniu jak krzemionkowe.

Popiół lotny składa się głównie z reaktywnego dwutlenku krzemu (SiO_2) i tlenku glinu (Al_2O_3), ale istotne są też Fe_2O_3 oraz CaO . Jeśli suma trzech pierwszych wymienionych składników stanowi ponad 70% objętości w jednostce popiołu to jest on klasyfikowany jako materiał pucolanowy (klasa F), natomiast jeśli suma przekracza 50% a zawartość CaO jest większa niż 20% to popiół posiada właściwości zarówno pucolanowe jak i hydrauliczne (głównie popiół lotny wapienny) [7]. Powierzchnia właściwa ziaren popiołu mieści się w przedziale 4000-7000 cm^2/g , natomiast ich gęstość właściwa wynosi około 2,2 g/cm^3 [6]. Skład chemiczny przykładowego popiołu lotnego krzemionkowego podano w tabeli (tabela 1).

Tabela 1. Skład chemiczny krzemionkowego popiołu lotnego [3]

Lp.	Zawartość składnika, % masy									
	Strata praż.	SO_3	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	Na_2O eq.
1	1,79	0,70	3,56	49,9	28,6	6,66	2,77	1,27	3,48	3,56

Ziarna popiołu lotnego mają kształt kulisty (rys.1) co przyczynia się do poprawy urabialności mieszanki, a w konsekwencji daje możliwość zmniejszenia ilości wody zarobowej o 2-3% na każde 10% popiołu wprowadzonego zamiast cementu [7].



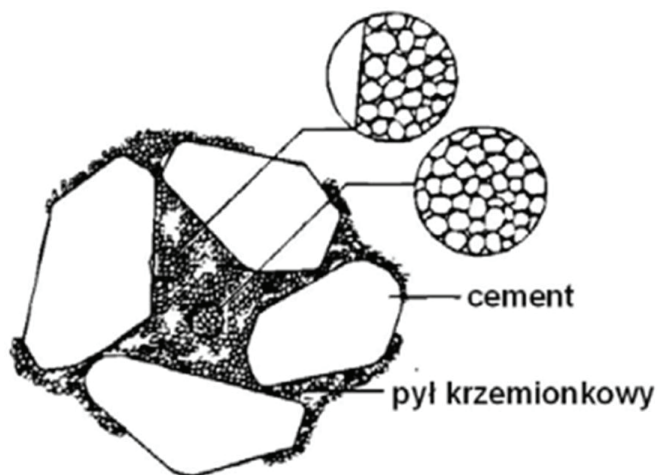
Rys 1. Ziarna popiołu lotnego w powiększeniu x2000 (SEM) [11]

Popioły lotne z klasy F poprawiają odporność betonu na korozję siarczanową. Popioły lotne spowalniają przyrost wczesnej wytrzymałości na ściskanie betonu, jednak zwiększają późną wytrzymałość (po 56 dniach) o kilka procent w stosunku do betonów bez dodatku popiołu [4]. W innych badaniach stwierdzono, że dodatek popiołu lotnego do mieszanki betonowej, zmniejsza jej lepkość i poprawia właściwości samozagęszczalne. Jednak dodatek popiołów w ilości powyżej 30% masy cementu znacznie obniża wytrzymałość na ściskanie betonu [2].

2.2. Mikrokrzemionka

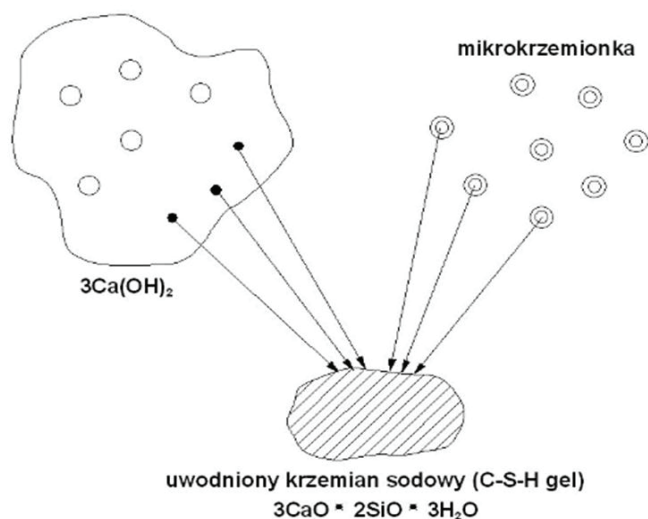
Kolejną pucolaną przemysłową jest pył krzemionkowy (mikrokrzemionka) powstający jako odpad w procesie produkcji krzemu oraz stopu żelazokrzemu. Podczas produkcji, w wysokiej temperaturze powstają opary SiO , które następnie w niskiej temperaturze otoczenia utleniają się i skraplają w postaci drobnych kulistych cząstek niekrystalicznej krzemionki (SiO_2). Krzemionka w fazie amorficznej jest znacznie bardziej aktywna niż jej formy krystaliczne, a bardzo małe wymiary cząstek przyspieszają dodatkowo reakcję z wodorotlenkiem wapnia. Bardzo drobne uziarnienie (około 100 razy mniejsza średnica niż ziaren cementu) i silnie rozwinięta powierzchnia właściwa ziaren (ok. $20000 \text{ cm}^2/\text{g}$) bezpostaciowej krzemionki decydują o jej wysokiej aktywności pucolanowej. Gęstość właściwa pyłu krzemionkowego wynosi około $2,2 \text{ g/cm}^3$ [6].

Mikrokrzemionka głównie stosowana jest jako częściowy zamiennik cementu w spoiwie (5–10% masy cementu) w produkcji betonów wysoko wartościowych. Produkt dostępny jest w formie suchego pyłu lub w formie zawiesiny, zawierającej 42–60% masowo pyłu krzemionkowego [7]. Obecność tej pucolany w betonie powoduje zwiększenie gęstości matrycy, poprzez ograniczenie wielkości porów. Pył krzemionkowy wypełnia puste przestrzenie pomiędzy ziarnami cementu oraz szczeliny w warstwie portlandytu poprawiając tym samym warstwę przejściową na styku kruszywa z matrycą (rys.2).



Rys 2. Wypełnienie przestrzeni między ziarnami cementu pyłem krzemionkowym [6]

Mikrokrzemionka, jako wysoce reaktywna pucolana potrafi przekształcić 50% wodorotlenku wapnia obecnego w matrycy cementowej w ciągu pierwszych 28 dni dojrzewania (przy zamianie 10% masy cementu na mikrokrzemionkę) [7]. Na poniższym schemacie zobrazowano reakcję pucolanową z udziałem mikrokrzemionki (rys.3).



Rys 3. Schemat obrazujący reakcję pucolanową z udziałem mikrokrzemionki [6]

Wadą mikrokrzemionki jest jej cena – wyższa niż średnia cena cementu lub pozostałych omawianych materiałów pucolanowych.

W tabeli 2 podano skład chemiczny przykładowego pyłu krzemionkowego.

Tabela 2. Skład chemiczny mikrokrzemionki [1]

Zawartość składnika, % masy							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Strata praż.
92,2	0,69	1,73	0,4	1,19	1,25	0,43	1,18

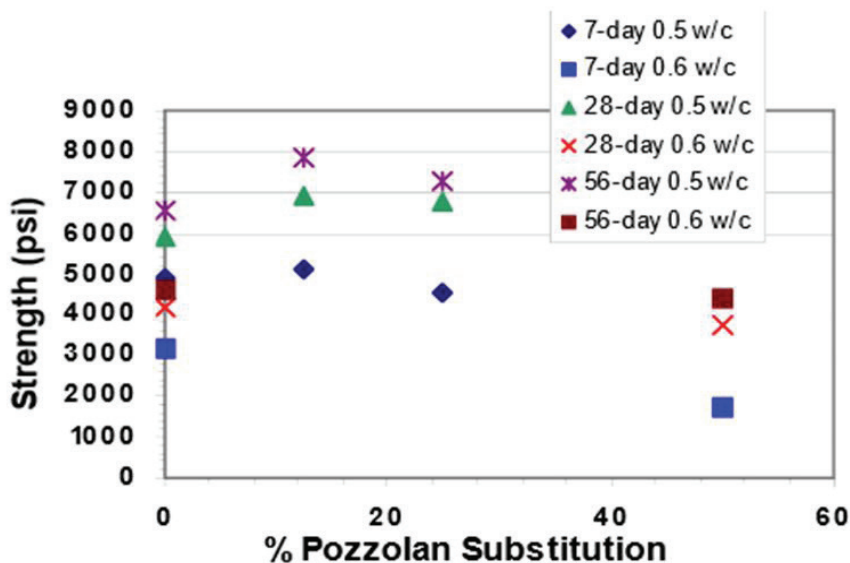
2.3. Popiół z łusek ryżowych

W Indiach powszechne jest wykorzystywanie lokalnych odpadów naturalnych w postaci łusek ryżowych. Z każdej tony ryżu otrzymuje się 200 kg łuski ryżowej, a po wypaleniu ok. 40 kg popiołu [10]. Powolne ich spalanie w kontrolowanej temperaturze od 500°C do 700°C powoduje powstawanie szklistego porowatego popiołu krzemionkowego o bardzo dużej powierzchni właściwej, sięgającej 50000 cm²/g, pomimo tego, że wymiary ziaren są stosunkowo duże: 10-75 μm. Ziarna popiołu powstałego ze spalania łusek ryżowych wykazują dużą wodożądność. Zawartość amorficznej krzemionki w tej pucolanie waha się w granicach 85–90%. W poniższej tabeli 3 przedstawiono skład chemiczny przykładowego popiołu z łusek ryżowych.

Tabela 3. Skład chemiczny popiołu z łusek ryżowych [10]

Zawartość składnika, % masy								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	inne	Strata praż.
90,45	1,5	1,34	1,1	0,4	0,96	0,2	1,3	2,75

Wiele badań wykazało, że nawet mała ilość (5-10%) popiołu jako zamiennik cementu może znacznie polepszyć urabialność, wytrzymałość, wodoszczelność betonu wykonanego na bazie takiego spoiwa. Beton staje się odporny na agresję chemiczną oraz korozję zbrojenia. Najwyższa zalecana zawartość popiołu z łusek ryżowych w spoiwie, która nie pogorszy właściwości użytkowych i wytrzymałościowych betonu to 25% masy cementu [5]. W przykładowych badaniach najwyższą wytrzymałość na ściskanie uzyskano zamieniając 12,5% oraz 25% masy cementu popiołem. Wytrzymałość ta była wyższa niż wytrzymałość próbek kontrolnych bez popiołu (rys.3).



Rys 4. Wytrzymałość na ściskanie betonu z różną procentową zawartością popiołu z łusek ryżowych (1000 psi = około 6,9 MPa) [5]

Dane statystyczne dowodzą, że popiół z łusek może być potencjalnym, globalnie dostępnym materiałem pucolanowym, gdyż w ciągu okresu ponad 40 lat obserwowany jest wzrost produkcji popiołu z łusek ryżowych na całym świecie [5].

1.4. Metakaolinit (Metakaolin)

Metakaolinit jest stosunkowo nowym, naturalnym materiałem pucolanowym dodawanym do zapraw i betonów i jego wpływ na właściwości wymienionych materiałów jest ciągle szeroko badany. Omawiany produkt powstaje w wyniku prażenia gliny kaolinitowej ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) (rys.4) w kontrolowanych warunkach temperaturowych, czyli w około 600÷850°C. W tym zakresie temperatury prażenia, kaolin przekształca się metakaolinit, będący w fazie szklistej (amorficznej). Wyższa temperatura może doprowadzić do zmniejszenia aktywności pucolanowej materiału.

Otrzymany produkt charakteryzuje się białą lub kremową barwą. Jego ciężar właściwy wynosi około $2,6 \text{ g/cm}^3$, natomiast powierzchnia właściwa około $12000\text{-}15000 \text{ cm}^2/\text{g}$, która, dla porównania, dla cementu wynosi niewiele ponad $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$.



Rys 5. Skała kaolinitowa [11]

W przeciwieństwie do pucolan będących odpadami przemysłowymi, metakaolin oprócz wysokiej zawartości reaktywnej krzemionki (SiO_2) zawiera również wysoki poziom reaktywnego tlenku glinu (Al_2O_3), które w reakcji z $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (będącym produktem hydratacji cementu oraz przeważającym składnikiem spoiwa wapiennego), przekształcają się w uwodniony krzemian wapnia (CSH) oraz uwodniony glinokrzemian wapnia (C_2ASH_8), decydujące o wzroście wytrzymałości spoiw cementowych lub wapiennych modyfikowanych metakaolinem. Ta wysoce reaktywna pucolana zwiększa mrozoodporność stwardniałego betonu/zaprawy. Przy niskim stosunku W/C metakaolin zmniejsza objętość porów, wypełniając wolne przestrzenie między większymi ziarnami cementu, a więc tym samym ogranicza absorpcję wody. Badania pokazują, że 8% masy cementu zamienione na metakaolinit daje optymalną reakcję pucolanową, natomiast zwiększając ilość zamiennika do 20% można całkowicie wyeliminować obecność CH. Reakcja pucolanowa za sprawą metakaolinu inicjuje dość szybko, w ciągu pierwszych 7 dni dojrzewania betonu i jest kontynuowana pomiędzy 7 a 28 dniem dojrzewania [9].

W poniższej tabeli 4 podano skład chemiczny przykładowego metakaolinitu.

Tabela 4. Skład chemiczny meta kaolinitu [1]

Zawartość składnika, % masy						
SiO_2	Al_2O_3	CaO	K_2O	Fe_2O_3	Na_2O	Strata praż.
51,2	45,3	0,05	0,16	0,6	0,21	0,51

3. Podsumowanie

Wykorzystując odpady przemysłowe i naturalne materiały możliwe jest ograniczenie zawartości cementu portlandzkiego w betonach/zaprawach, nie pogarszając ich właściwości w porównaniu z betonami opartymi tylko na spoiwie cementowym, a często poprawiając ich niektóre właściwości. Oprócz pozytywnego wpływu pucolan na charakterystykę materiału docelowego, ważny jest pozytywny wpływ środowiskowy – wykorzystanie odpadów oraz ograniczenie emisji CO_2 poprzez zmniejszenie zapotrzebowania na cement.

Kilku procentowa zamiana cementu na pucolanę pozwala ograniczyć zapotrzebowanie mieszanki na wodę, gdyż dodatek pucolany poprawia urabialność świeżej mieszanki. Z drugiej strony pucolany o dużej powierzchni właściwej (głównie mikrokrzemionka i popiół z łusek ryżowych) są wysoce wodożądne i przy dużej ich zawartości możliwe jest zwiększenie zawartości wody w mieszance bez wpływu na właściwości stwardniałego betonu/zaprawy. Wysoka wodożądność przyczynia się do absorpcji i przechowywania dużej ilości wody, która może być wykorzystana w procesie hydratacji cementu. Przy dużej zawartości pucolany zaleca się również stosowanie plastyfikatorów poprawiających urabialność mieszanki, zwłaszcza w przypadku betonów wysokiej wytrzymałości, gdzie istotne jest przyjęcie możliwie najmniejszego stosunku w/c.

Materiały pucolanowe, zamieniając wodorotlenek wapnia na fazę CSH, poprawiają warstwę przejściową w betonie, ograniczają nasiąkliwość poprzez zmniejszenie porowatości materiału, co jest również związane z poprawą mrozoodporności oraz ograniczoną dyfuzją chlorków. Dodatek pucolan do mieszanki ogranicza wystąpienie reakcji alkalia-krzemionka w betonie/zaprawie. Zmniejszenie ilości CH w porach stwardniałego betonu zwiększa jego odporności na korozję siarczanową. Obecność pucolan prowadzi również do ograniczenia wykwitów węglanowych na powierzchni elementu betonowego, za sprawą zmniejszonej ilości Ca(OH)_2 w porach materiału.

Wybór materiału pucolanowego podejmowany jest głównie po przeanalizowaniu jego dostępności w regionie a także opłacalności pod względem ekonomicznym, np. w krajach uprzemysłowionych bardziej opłacalne są sztuczne pucolany natomiast w krajach rozwijających się, gdzie dostępne są złoża naturalnych pucolan, zwłaszcza na terenach wulkanicznych, lub rolnictwo oparte jest na uprawach ryżu, właśnie pucolany naturalne są bardziej opłacalne. Każda pucolana poprawia spójność i efektywność mieszanki oraz wpływa mniej lub bardziej pozytywnie na właściwości stwardniałego betonu/zaprawy w zależności od stopnia reaktywności puculanowej materiału.

Literatura

- [1] Jian-Tong Ding, Zongjin Li, *Effects of Metakaolin and Silica Fume on Properties of Concrete*, Aci Materials Journal, Technical Paper, Title no. 99-M39, 2002.
- [2] Freidenberg P., Freidenberg E., *Wpływ popiołów lotnych na wybrane właściwości betonów podwodnych*, Przegląd budowlany, 10/2007.
- [3] Giergiczny Z., *Popiół lotny w składzie cementu i betonu. Monografia*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
- [4] Halbiniak J., *Projektowanie składu betonów z dodatkiem popiołów lotnych oraz ich wpływ na tempo przyrostu wytrzymałości*. Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym, 2(10) 2012, s.29–36.
- [5] Harris R.A., Eatmon T.D, Jr., Seifert C., *Natural Pozzolans for sustainable development: Environmentally Friendly Concrete Technology*, Paper Presented AT Southwestern Social Science Association Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, March 23–26, 2005.
- [6] Jasiczak J., Mikołajczak P., *Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami*. Przegląd tendencji krajowych i zagranicznych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Alma Mater, 2003.
- [7] Neuwald A.D., *Supplementary cementitious materials. What are SCMs and how can you use them to your advantage?* Part I: Pozzolan SCMs, MC September/October 2004.
- [8] Uliasz-Bocheńczyk A., Mokrzycki E., *Emisja dwutlenku węgla w przemyśle cementowym*. Polityka energetyczna, T. 6. Kraków, 2003.
- [9] www.metakaolin.info
- [10] www.ricehuskash.com
- [11] www.wikipedia.eng

Characteristics of selected pozzolanic materials used as a partial replacement for cement binder

Stanisław Fic¹, Przemysław Brzyski²

¹ Department of General Building Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: s.fic@pollub.pl

² Department of General Building Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: p.brzyski@pollub.pl

Abstract: In connection with the search for ways to reduce greenhouse gases emission the sustainable development in the construction industry is promoted. Among binders the most commonly used is cement, which emits significant quantities of carbon dioxide to the atmosphere. It is possible to partial replacement of cement per pozzolanic materials, which often are industrial waste or natural mineral material. Partial reduction of cement for the pozzolans, can improve some properties of the compound, or hardened mortar and concrete, eg. it may be to improve workability, water resistance, frost resistance and mechanical properties and resistance to chemical attack. The amount of CO₂ which is emitted into the atmosphere is reduced, because the artificial pozzolans (fly ash and microsilica) are a byproduct of industrial activities, and thus is limited in this way also the problem of their disposal

This article focuses on a review of artificial and natural pozzolanic materials (fly ash, microsilica, rice husk ash, metakaolinite), which are used as a partial replacement for cement. Describes the methods of obtaining and their influence on the properties of the target materials.

Key words: sustainable construction, mineral additives

Przegląd badań zapraw ciepłochronnych

Danuta Barnat-Hunek¹, Małgorzata Szafraniec²

¹ Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: d.barnat-hunek@pollub.pl

² Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska
e-mail: szafraniec.malgorzata@pollub.edu.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono przegląd polskich i zagranicznych badań dotyczących cech fizycznych i mechanicznych zapraw ciepłochronnych w zależności od dodatku użytego do ich wykonania. Dokonano analizy porównawczej wpływu dodatków polepszających termoizolacyjność takich jak: keramzyt, perlit ekspandowany, zeolit, pianka poliuretanowa z recyklingu, spienione granulki szklane, perlit ekspandowany i pumeks hutniczy, pył krzemionkowy, popiół lotny, granulat korkowy, trociny na właściwości fizyczne i mechaniczne zapraw ciepłochronnych. Badania wykazały, że częściowa zamiana piasku na wypełniacze lekkie znacząco wpływa na parametry fizyczne i mechaniczne zaprawy.

Słowa kluczowe: zaprawy lekkie, przewodność cieplna, właściwości fizyczne i mechaniczne

1. Wprowadzenie

Wzrost świadomości ekologicznej społeczeństwa powoduje, iż poszukiwane są rozwiązania mające na celu zmniejszenie zapotrzebowania budynków na ciepło. Przykładem takiego działania jest zastąpienie zwykłych zapraw zaprawami ciepłochronnymi, których celem jest zmniejszenie ucieczki ciepła przez przegrody zewnętrzne. W zaprawach tych stosowane są składniki polepszające izolacyjność termiczną, które mogą w różnorodny sposób wpływać na cechy fizyczne i mechaniczne materiału.

Lekka zaprawa ciepłochronna to mieszanka cementowa lub cementowo-wapienna z dodatkiem składników polepszających izolacyjność termiczną. Przy wykonaniu takich zapraw stosuje się oprócz tradycyjnych składników lekkie wypełniacze i kruszywa takie jak granulki styropianowe, perlit, wermikulit lub keramzyt oraz dodatków i domieszek uszlachetniających. Lekkie wypełniacze przyczyniają się do zmniejszenia współczynnika przewodzenia ciepła. Taka zaprawa w stanie suchym charakteryzuje się gęstością pozorną nie przekraczającą 950 kg/m^3 , wytrzymałością na ściskanie większą niż 3 MPa , współczynnikiem przewodzenia ciepła mniejszym niż $0,18 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ oraz nasiąkliwością wagową nieprzekraczającą 45% [1]. Zmiana piasku na wypełniacze lekkie znacząco wpływa na parametry fizyczne i mechaniczne zaprawy. Proporcjonalne zwiększanie objętościowego udziału lekkich wypełniaczy w zaprawie, kosztem piasku, obniża jej parametry wytrzymałościowe i zmniejsza ciężar, ale poprawia termoizolacyjność, odporność ogniową i zdolność pochłaniania hałasu. Zwiększa się również porowatość zapraw w stosunku do tradycyjnych zapraw cementowych i wapiennych. Porowatą mikrostrukturę zaprawy z perlitem i keramzytem przedstawiono na Rys. 1.



W przypadku dodatku perlitu wzrasta odporność zaprawy na podciąganie kapilarne, poprawia się jej przyczepność do podłoża i zwiększa zdolność do pełzania. Zastosowanie zapraw lekkich **ogranicza możliwości ucieczki ciepła** (niweluje mostki cieplne), przez co pozwala na **zredukowanie kosztów ogrzewania** w porównaniu ze zwykłą zaprawą murarską. Ponieważ zaprawa posiada gorsze własności termoizolacyjne niż elementy ściennie, należy dążyć do uzyskania możliwie cienkich spoin. Ponadto jest to stosunkowo drogi materiał, dlatego należy rozważyć zasadność jego stosowania i jego rodzaj. Podczas prac budowlanych należy uwzględnić fakt, że zaprawy ciepłochronne zawierają wypełniacz w postaci granulek styropianu, perlitu, keramzytu, dlatego powinno się je dokładnie mieszać, by nie nastąpiło rozwarstwienie składników.

Tabela 1. Wady i zalety zapraw ciepłochronnych

Zalety zapraw ciepłochronnych	Wady zapraw ciepłochronnych
- likwidują mostki termiczne - są łatwe w obróbce - wysokoplastyczne - stabilne po nałożeniu - paroprzepuszczalne - mrozoodporne - wodoodporne - odporne na działanie grzybów i glonów	- nie należy ich stosować do murowania: fundamentów, ścian piwnic, ścian stykających się z gruntem, ścian do wysokości 50 cm ponad gruntem ze względu na ich wysoką nasiąkliwość; - stosowane materiały, które zastępują tradycyjne nasiączywo w zaprawach, posiadają niższą gęstość i lepszą urabialność przy użyciu specjalnych domieszek do cementu (m.in. skrobi modyfikowanej), co powoduje większe zużycie wody przy sporządzaniu zapraw niż w tradycyjnych zaprawach [4, 5].

Ze względu na możliwość zastosowania zapraw ciepłochronnych w budownictwie energooszczędnym w literaturze zagranicznej można zaobserwować wzrost zainteresowania badaniami zapraw ciepłochronnych z użyciem lekkich wypełniaczy, przede wszystkim z perlitem ekspandowanym [4, 6, 7], polistyrenem [4], mikrokrzemionką i popiołami lotnymi [6], granulowaną korą [7], pianką poliuretanową [5], żużlem wielkopieczowym [8], pumeksem [9, 10], włóknem szklanym i poliestrem [11].

2. Metodyka badań

2.1. Charakterystyka badanych zapraw

W artykule dokonano analizy porównawczej wpływu dodatków polepszających termoizolacyjność takich jak: keramzyt, perlit ekspandowany, zeolit, pianka poliuretanowa z recyklingu, spienione granulki szklane, perlit ekspandowany i pumeks hutniczy, pył krzemionkowy, popiół lotny, granulat korkowy, trociny na właściwości fizyczne i mechaniczne zapraw ciepłochronnych. W Tabeli 2 przedstawiono charakterystykę analizowanych z literatury zapraw ciepłochronnych.

Tabela 2. Charakterystyka analizowanych zapraw

Rodzaj dodatku	Skład zaprawy		Badania według
keramzyt	- cement 32,5 - wapno hydratyzowane - keramzyt frakcja 0-2 mm - woda		M. Szafraniec [3]
perlit ekspandowany	- cement 32,5 - perlit - wapno hydratyzowane - woda		E. Włodarczyk [2]
zeolit	- cement 32,5; - zeolit; - wapno hydratyzowane; - woda;		K. Wielgus [12]
pianka poliuretanowa z recyklingu	- cement; - piasek morski; - woda; - zużyta pianka poliuretanowa Stosunek objętościowy składników: 1 : 0,5 : 0,7 : (cement : piasek morski : woda : zużyta pianka poliuretanowa pianka)		S. Kamonkunanon [13]
	- cement Portlandzki CEM I 42,5 R; - piasek rzeczny 0-4 mm; - pianka poliuretanowa z recyklingu 0-1 mm; - woda; Cement i kruszywo (piasek + pianka poliuretanowa) dozowane wagowo w stosunku 1:6		C.Junco, J.Gadea, A.Rodríguez, S.Gutiérrez-González, V.Calderón [5]
spienione granulki szklane	- cement I 52,5 N - puder wapienny - drobny piasek - spienione granulki szklane: - 0,1-0,3 - 0,25-0,5 - 0,5-1,0 - 1,0-2,0	- 425,5 kg/m ³ - 111,9 kg/m ³ - 381,5 kg/m ³ - 56,0 kg/m ³ - 44,8 kg/m ³ - 56,0 kg/m ³ - 44,8 kg/m ³	P.Spiesz, Q.L. Yu, H. J. H. Brouwers [14]
perlit ekspandowany i pumeks hutniczy	- cement; - perlit ekspandowany (EPA); - pumeks hutniczy (PA); - woda; Stosunek procentowy składników: 60% : 40% (EPA : PA)		R. Demirboğa, R. Gül [15]

pył krzemionkowy i pumeks hutniczy	- cement; - pył krzemionkowy (SF); - pumeks hutniczy (PA); - woda; Stosunek procentowy składników: 20% : 80% (SF : PA)		R. Demirboğa, R. Gül [15]
popiół lotny i pumeks hutniczy	- cement; - popiół lotny (FA) - pumeks hutniczy (PA); - woda; Stosunek procentowy składników: 20% : 80% (FA : PA)		
granulat korkowy	- cement 42,5 - piasek (0 - 4 mm) - woda - granulat korkowy	- 0,13 m ³ - 0,27 m ³ - 0,3 m ³ - 0,3 m ³	C. Aciu, R. Tamas-Gavrea, C. Munteanu [16]
trociny	- cement 42,5 - piasek (0 - 4 mm) - woda - trociny	- 0,13 m ³ - 0,27 m ³ - 0,3 m ³ - 0,3 m ³	
perlit ekspandowany i pył krzemionkowy	- woda - cement - pył krzemionkowy - żwir - piasek - perlit ekspandowany	- 136,5 kg/m ³ - 351 kg/m ³ - 39 kg/m ³ - 638,3 kg/m ³ - 709,2 kg/m ³ - 425,5 kg/m ³	V. Khonsari, E. Eslami, Ah. Anvari [17]

2.2. Badania cech fizycznych i mechanicznych zapraw

Autorzy wymienionych w Tabeli 2 artykułów wykonali m.in. podstawowe badania cech fizycznych i mechanicznych zapraw m.in. : wytrzymałość na ściskanie, gęstość objętościowa, porowatość objętościowa, nasiąkliwość, podciąganie kapilarne, współczynnik przenikania ciepła.

Rodzaj próbek użytych do badań oraz sposób wykonania poszczególnych badań zestawiono w Tabeli 3.

Tabela 3. Badania cech mechanicznych i fizycznych zapraw

Rodzaj			Sposób wykonania badania	Badania według
badania	dotatku	próbek przyjętych do badania		
Izolacja akustyczna	granulat korkowy	belecзки 40×40×160 mm	- obliczenia zostały wykonane na podstawie metody opisanej w C 125-05 [40] w odniesieniu do współczynnika izolacyjności akustycznej dla podłogi wykonanej z betonu o grubości 16 cm;	C. Aciu, R. Tamas-Gavrea, C. Munteanu [16]
	trociny			
Palność	granulat korkowy	kostki sześciennie 70×70×70 mm	- analizę palności zapraw wykonano przez wystawienie powierzchni badanych próbek na działanie płomienia palnika gazowego nieprzerwanie przez 300 s;	
	trociny			

Wytrzymałość na ściskanie	keramzyt	połówki beleczek 40×40×160 mm	- badanie zgodnie z normą PN-EN 1015-11:2001 [18]; - połówki beleczek otrzymano w wyniku wcześniej przeprowadzonego oznaczania wytrzymałości na zginanie; - badanie wykonano w prasie Controls; - do badania użyto 6 próbek;	M. Szafraniec [3]
	perlit ekspandowany			E. Włodarczyk [2]
	zeolit			K. Wielgus [12]
	pianka poliuretanowa z recyklingu	kostki sześcienne 50×50×50 mm	- w celu zbadania wytrzymałości na ściskanie użyto maszyny do mierzenia wytrzymałości betonu na ściskanie o sile 100 ton - TECHNOTEST; - pomiary i średnią z pomiarów analizowano zgodnie z ASTM C 109 [19];	S. Kamonkunanon [13]
		beleczki 40×40×160 mm	- badanie wykonano po 28 dniach od wykonania próbek zgodnie z normą EN 1015-11 [20]; - do badania użyto 6 próbek;	C. Junco, J. Gadea, A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González, V. Calderón [5]
	spienione granulki szklane	beleczki 40×40×160 mm	- badanie wykonano zgodnie z normą EN 196-1 [21];	P. Spiesz, Q. L. Yu, H. J. H. Brouwers [14]
	granulat korkowy		- badanie wykonano po 28 dniach przechowywania próbek w warunkach normowych zgodnie z normą EN 196-1 [21]; - do pomiaru siły niszczącej wykorzystano wyposażenie Laboratorium Materiałów Budowlanych Wydziału Inżynierii Lądowej w Cluj-Napoca;	C. Aciu, R. Tamas-Gavrea, C. Munteanu [16]
	trociny			
	perlit ekspandowany i pył krzemionkowy	kostki sześcienne 100×100×100 mm; walce 100×200 mm	- próbki zostały rozformowane po 24±8 godzinach przechowywania w wodzie nasyconej wapnem o temperaturze 23±2°C; - próbki sześcienne do czasu wykonania badania były przechowywane w: roztworze siarczanu sodowego, w wilgotnym worku, wodzie, po 28 dniach próbki, z każdego rodzaju środowiska zostały przebadane; - próbki walcowe przechowywane były przez 28 dni do czasu badania w roztworze siarczanu sodowego;	V. Khonsari, E. Eslami, Ah. Anvari [17]
Wytrzymałość na rozciąganie	perlit ekspandowany i pył krzemionkowy	walce 100×200 mm	- badanie zostało wykonane według normy ASTM C496 / C496M - 11 [22] - do badania użyto 6 próbek;	V. Khonsari, E. Eslami, Ah. Anvari [17]

Wytrzymałość na zginanie	keramzyt	belecзки 40×40×160 mm	-wytrzymałość na zginanie przeprowadzono w oparciu o normę PN-EN 1015-11 [18]; - po upływie 28 dni przeprowadzono badanie wytrzymałości na zginanie; - do badania użyto 3 próbek;	M. Szafraniec [3]
	perlit ekspandowany			E. Włodarczyk [2]
	zeolit			K. Wielgus [12]
	pianka poliuretanowa z recyklingu	belecзки 40×40×160 mm	- badanie wykonano po 28 dniach od wykonania próbek zgodnie z normą EN 1015-11 [20]; - do badania użyto 3 próbek;	C.Junco, J.Gadea, A.Rodríguez, S.Gutiérrez-González, V.Calderón [5]
	granulat korkowy	belecзки 40×40×160 mm	- brak informacji o sposobie przeprowadzenia badania;	C. Aciu, R. Tamas-Gavrea, C. Munteanu [16]
	trociny			
Gęstość objętościowa stwardniałej zaprawy	keramzyt	belecзки 40×40×160 mm	- badanie gęstości objętościowej (pozornej) przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 1936:2010 [23]; - do badania użyto 6 próbek;	M. Szafraniec [3]
	perlit ekspandowany			E. Włodarczyk [2]
	zeolit			K. Wielgus [12]
	pianka poliuretanowa z recyklingu	kostki sześcienne 50×50×50 mm	- badanie wykonano zgodnie z normą ASTM C 642 [24]; - gęstość objętościową mierzono w stanie utwardzonym po zakończeniu suszenia w temperaturze 25°C;	S. Kamonkunanon [13]
		-	- badanie zostało przeprowadzone zgodnie z normą EN 1015-10 [25] w temperaturze 20±1°C i względnej wilgoci 50±1%;	C.Junco, J.Gadea, A.Rodríguez, S.Gutiérrez-González, V.Calderón [5]
Porowatość otwarta	spienione granulki szklane	kostki sześcienne 100×100×100 mm	- badanie przeprowadzono po 28 dniach od wykonania próbek; -brak danych o metodzie jakiej użyto do wykonania pomiaru;	P.Spiesz, Q.L. Yu, H. J. H. Brouwers [14]
	keramzyt	belecзки 40×40×160 mm	- badanie porowatości otwartej przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 1936:2010 [23]; - do badania użyto 6 próbek;	M. Szafraniec [3]
	perlit ekspandowany			E. Włodarczyk [2]
	zeolit			K. Wielgus [12]
	pianka poliuretanowa z recyklingu		- badanie zostało przeprowadzone zgodnie z normą [26] w temperaturze 20±1°C i względnej wilgoci 50±1%;	C.Junco, J.Gadea, A.Rodríguez, S.Gutiérrez-González, V.Calderón [5]
	perlit ekspandowany i pył krzemionkowy	kostki sześcienne 100×100×100 mm;	- wartość porowatości otwartej została obliczona ze wzoru zawartego w artykule I. Ah. Kantarci [27];	V. Khonsari, E. Eslami, Ah. Anvari [17]

Nasiąkliwość	keramzyt	belecзки 40×40×160 mm	- nasiąkliwość oznaczono wg normy PN-B-04500:1985 [28]; - oznaczenie nasiąkliwości polega na nasyceniu próbek wodą; - woda penetrując próbki do wnętrza pod wpływem ciśnienia atmosferycznego wypełnia znajdujące się w niej otwarte pory oraz pory kapilarne; - przed rozpoczęciem badania próbki zostały wysuszone do stałej masy a pomiary nasiąkliwości wagowej przeprowadzono dla 4 okresów: po 1, 3, 7 oraz 14 dniach - przyjęte na podstawie ZUAT - 15/VI.11-1/00 [29];	M. Szafraniec [3]
	perlit ekspandowany			E. Włodarczyk [2]
	zeolit			K. Wielgus [12]
	pianka poliuretanowa z recyklingu	kostki sześcienne 50×50×50 mm	- badanie wykonano zgodnie z normą ASTM C 642 [24];	S. Kamonkunanon [13]
	spienione granulki szklane	belecзки 40×40×160 mm	- do badania wykorzystano 6 próbek według BS EN 480-5:2005 [30]; - czas trwania badania - 56 dni; - podczas badania próbki były ważone w równych odstępach czasu;	P. Spiesz, Q.L. Yu, H. J. H. Brouwers [14]
	perlit ekspandowany i pył krzemionkowy	kostki sześcienne 100×100×100 mm;	- nasiąkliwość została obliczona zgodnie ze wzorem: ; - W_{absorbed} - odpowiada wadze próbki godzinie po rozpoczęciu badania; - W_{dry} - waga suchej próbki suszonej w 100°C przez 24 godziny;	V. Khonsari, E. Eslami, Ah. Anvari [17]
Nasiąkliwość wyznaczona na przełamanych próbkach	perlit ekspandowany i pył krzemionkowy	połówki walca 100×200 mm	- do badania użyto poówek próbek po wykonanym oznaczeniu wytrzymałości na rozciąganie; dalszy proces jest taki sam jak w przypadku oznaczenia normalnej nasiąkliwości; - nasiąkliwość jest średnią z otrzymanych wyników z poszczególnych poówek [31];	V. Khonsari, E. Eslami, Ah. Anvari [17]

Współczynnik przenikania ciepła	keramzyt	płytki 300×300×50 mm	- badanie przeprowadzono za pomocą aparatu płytowego do pomiaru przewodności cieplnej z czujnikami gęstości strumienia ciepłego wraz z urządzeniem do archiwizacji danych pomiarowych i rejestratorem przebiegu badań;	M. Szafraniec [3]
	perlit ekspandowany			E. Włodarczyk [2]
	pianka poliuretanowa z recyklingu	walce 25×120 mm	- próbki przebadano za pomocą pomiarów cieplnych i sond: DECAGON, KD2 - wyniki oceniono na podstawie normy ASTM D 5930 [32]; - technika ta pozwala na szybki pomiar, co umożliwia zbieranie danych przed materiałami ulegając degradacji termicznej; - krótki czas pomiaru pozwalają na generowanie dużych ilości danych przy niewielkim wysiłku; - sonda liniowego źródła i towarzysząca jej badana próbka są małe, dzięki czemu możliwe jest poddanie próbki szerokiemu zakresowi warunków testowych;	S. Kamonkunanon [13]
	spienione granulki szklane	kostki sześcienne 100×100×100 mm	- badanie przeprowadzono po 28 dniach od wykonania próbek; - brak danych o metodzie jakiej użyto do wykonania pomiaru;	P. Spiesz, Q.L. Yu, H. J. H. Brouwers [14]
	perlit ekspandowany i pumeks hutniczy	płytki 110×160×40 mm	- próbki zostały wykonane w laboratorium – czas mieszania w betoniarnie 5 min; zagęszczenie próbek wykonano ręcznie - szczególne środki ostrożności zostały podjęte w celu zapewnienia jednolitości i pełnego zagęszczenia; - maksymalny rozmiar gruboziarnistego kruszywa - 16 mm; - próbki zostały pozostawione w wilgotnych warunkach na okres 7 dni, następnie przechowywano w wodzie o temperaturze 20±3 °C nasyczonej wapnem do czasu przeprowadzenia badania; - po 28 dniach próbki były suszone po w piecu w temperaturze 110 ± 10 °C; - próbki były ważone w 24-godzinnych odstępach, aż do momentu, gdy utrata wagi nie przekraczała 1% w ciągu 24 godzin; - badanie wykonano na podstawie ASTM C 332 [33]; - powierzchnie próbek zostały wyczyszczone papierem ściernym przed pomiarem ich przewodności cieplnej; - do badania zostały użyte metody gorącego drutu w oparciu o ASTM C 1113-90 [34]; - temperatura pomiarowa wynosi od 100 do 1000 °C; - do badania próbka wyjściowa została podzielona na dwie części - 110×80×20mm; - czas badania wynosił 100 - 120 s;	R. Demirboğa, R. Gül [15]
	pył krzemionkowy i pumeks hutniczy			
	popiół lotny i pumeks hutniczy			

Podciąganie kapilarne	granulat korkowy			C. Aciu, R. Tamas-Gavrea, C. Munteanu [16]
	trociny	belecзки 40×40×160 mm	badanie wykonano zgodnie z normą ASTM C1403 - 13 [35]	
Przepuszczalność wody	spienione granulki szklane	kostki sześciennie 150×150×150 mm	- badanie było przeprowadzone na próbkach po 28 dniach od wykonania na podstawie BS EN 12390-8:2009 [36]; - do badania użyto 3 próbek, które poddawano działaniu wody pod ciśnieniem 5 bar przez 72 godziny;	P.Spiesz, Q.L. Yu, H. J. H. Brouwers [14]
Dyfuzja chlorków	spienione granulki szklane	belecзки 40×40×160 mm	- badanie wykonano po 28 dniach od wykonania próbek; - badanie długoterminowe według NT BUILD 443 [37]; - próbki były poddane przez 91 dni działaniu roztworu chlorków; - po zakończeniu badania stężenie chlorków w próbkach zostało zamierzone za pomocą metody opisanej przez P.Spiesz, H. J. H. Brouwers [38];	
Migracja chlorków	spienione granulki szklane	belecзки 40×40×160 mm	- badanie wykonano po 28 dniach od wykonania próbek według normy NT BUILD 492 [39]; - w przyjętym teście migracji, chlorki penetrują próbki z dużą szybkością - zostają przyspieszone przez zastosowanie pola elektrycznego;	

C. Junco, J. Gadea, A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González oraz V. Calderón [5] zwrócili w swoim opracowaniu uwagę także na zagadnienie trwałości zaprawy z dodatkiem pianki poliuretanowej z recyklingu. Przedstawili oni pięć metod na zbadanie tej własności: test w komorze solnej (ISO 9227:90 [41]), test Kesternicha (DIN EN ISO 6988 [42]), wpływ wody o temperaturze 105°C (EN ISO 2440 [43]), suszenie w temperaturze 140°C (EN ISO 2440 [43]) oraz reakcja alkaliczno-krzemionkowa (EN 146508 : 98 [44], [45]).

W pracach [2, 3], oprócz wymienionych badań, przebadano również mrozoodporność i odporność na krystalizację soli zaprawy z dodatkiem keramzytu [3] i zaprawy z dodatkiem perlitu ekspandowanego [2]. Badanie mrozoodporności w opracowaniach zostało wykonane zgodnie z normą PN-88/B-06250 [46] a odporność na krystalizację soli na podstawie normy PN-EN12370:2001 [47].

3. Analiza wyników

3.1. Cechy fizyczne i mechaniczne

Na podstawie przeprowadzonych badań zgodnie z punktem 2.2 otrzymano charakterystykę poszczególnych zapraw ciepłochronnych. Właściwości fizyczne i mechaniczne zapraw zestawiono w Tabelach 4 i 5.

Tabela 4. Cechy fizyczne i mechaniczne zapraw ciepłochronnych

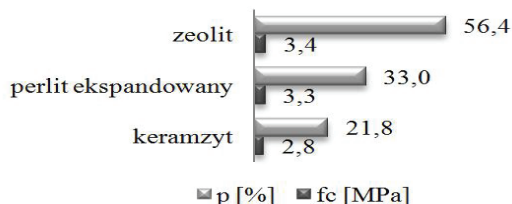
Rodzaj dodatku	Właściwości fizyczne i mechaniczne									Badania według
	f_c	f_t	f_b	ρ	p	n	n_c	λ	w	
keramzyt	2,8	-	0,1	1,0	21,8	25,7	-	0,23	-	M. Szafraniec [3]
perlit ekspandowany	3,3	-	0,1	0,8	33,0	52,7	-	0,19	-	E. Włodarczyk [2]
zeolit	3,4	-	0,1	1,1	56,4	61,0	-	-	-	K. Wielgus [12]
pianka poliuretanowa z recyklingu	1,0	-	-	0,8	-	10,0	-	0,20	-	S. Kamonkunanon [13]
	1,8	-	0,74	0,7	30,0	-	-	-	-	C.Junco, J.Gadea, A.Rodríguez, S.Gutiérrez-González, V.Calderón [5]
spienione granulki szklane	22,0	-	-	1,3	7,5	-	-	0,49	-	P.Spiesz, Q.L. Yu, H. J. H. Brouwers [14]
perlit ekspandowany i pumeks hutniczy	-	-	-	-	-	-	-	0,26	-	R. Demirboğa, R. Gül [15]
pył krzemionkowy i pumeks hutniczy	-	-	-	-	-	-	-	0,22	-	
popiół lotny i pumeks hutniczy	-	-	-	-	-	-	-	0,24	-	
granulat korkowy	12,5	-	2,9	-	-	-	-	-	0,4	C. Aciu, R. Tamas-Gavrea, C. Munteanu [16]
trociny	10,5	-	2,9	-	-	-	-	-	0,7	
perlit ekspandowany (EPA) i pył krzemionkowy (SF)	(CW) 8,5	0,7	-	-	17,6	10,6	18,6	-	-	V. Khonsari, E. Eslami, Ah. Anvari [17]
	(CWS) 9,8									
	(CS) 7,1									
	(WS) 7,1					-				

Oznaczenia użyte w Tabeli 4: f_c - wytrzymałość na ściskanie [MPa], f_t - wytrzymałość na rozciąganie [MPa], f_b - wytrzymałość na zginanie [MPa], ρ - gęstość objętościowa [g/cm³], p - porowatość otwarta [%], n - nasiąkliwość [%], n_c - nasiąkliwość przełamanych próbek [%], λ - współczynnik przenikania ciepła [W/m·K], w - podciąganie kapilarne [Kg/(m²·min^{0,5})], (CW) - próbki sześcienne przechowywane w wodzie, (WS) - próbki sześcienne przechowywane w wilgotnym worku, (CS) - próbki sześcienne w roztworze siarczanu sodowego, (WS) - próbki walcowe w roztworze siarczanu sodowego.

Tabela 5. Cechy fizyczne i mechaniczne zapraw ciepłochronnych c.d.

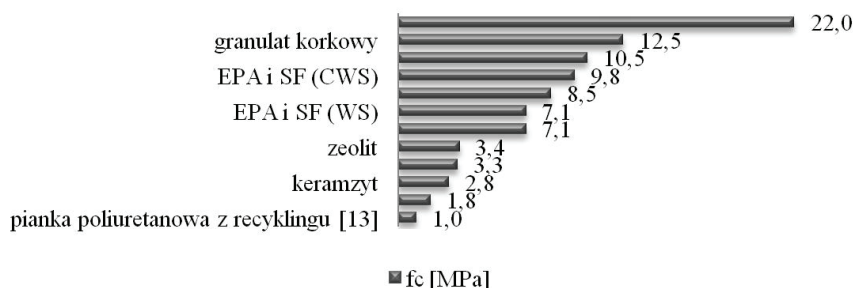
Rodzaj dodatku	Właściwości fizyczne i mechaniczne						Badania według
	c	p _w	D _{app}	D _{RCM}	ΔL _w	f _{beh.}	
keramzyt	94,2	-	-	-	-	-	M. Szafraniec [3]
perlit ekspandowany	90,4	-	-	-	-	-	E. Włodarczyk [2]
zeolit	95,0	-	-	-	-	-	K. Wielgus [12]
spienione granulki szklane	-	bardzo wysoka przepuszczalność wody	12,3	20,6	-	-	P.Spiesz, Q.L. Yu, H. J. H. Brouwers [14]
granulat korkowy	-	-	-	-	26	- I faza - silne nagrzewanie do żarzenia, bez obecności otwartego ognia lub dymu; - II faza - po ok. 60 sek. powierzchnia uległa zwęgleniu; - w ciągu 300 sek. płomień nie powodował zmian na powierzchni, zwęgleniu nie uległy dodatki dzięki zwęglonej wcześniej powierzchni; - po 300 sek. przyłożono dłoń po stronie nie ogrzewanej - po tej stronie nie było zauważalne działanie płomienia - oznacza to że zaprawy są dobrym izolatorem termicznym;	C. Aciu, R. Tamas-Gavrea, C. Munteanu [16]
trociny	-	-	-	-	31		

Oznaczenia użyte w Tabeli 5: c - zdolność dyfuzji pary wodnej [%], p_w - przepuszczalność wody, D_{app} - współczynnik dyfuzji chlorków [$\cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$], D_{RCM} - współczynnik migracji chlorków [$\cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$], ΔL_w - współczynnik izolacyjności akustycznej, f_{beh.} - palność.



Rys. 2. Zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie a porowatością

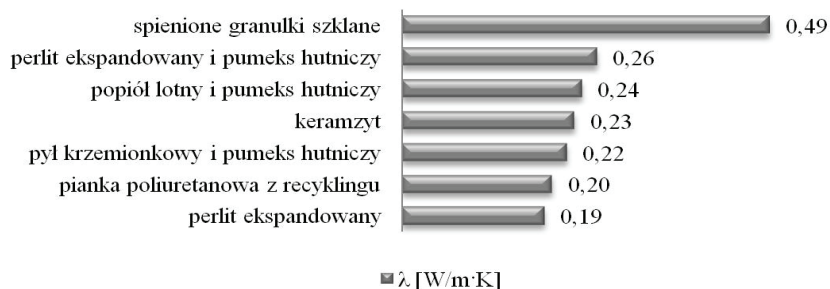
Analizując dane z Rys. 2 można stwierdzić, że w zaprawach wapiennych o zbliżonym składzie różniącym się dodatkiem keramzytu, perlitu ekspandowanego i zeolitu zauważalna jest zależność, że im wyższą porowatość posiada zaprawa, tym większą wytrzymałością na ściskanie się charakteryzuje. Najwyższą wytrzymałość na ściskanie wykazuje zaprawa z dodatkiem zeolitu (3,4 MPa), która wykazuje najwyższą porowatość (56,4%) z analizowanych zapraw. Uzyskanie wyższych wytrzymałości związane jest, nie tyle z porowatością, lecz rodzajem kruszywa, a dokładnie z wielkością i wytrzymałością jego ziaren. Im ziarna użytego kruszywa są większe i charakteryzują się niższą wytrzymałością na miażdżenie (keramzyt), tym wytrzymałość na ściskanie jest mniejsza.



Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie w zależności od użytego dodatku w zaprawie

Spośród opisywanych w punkcie 2.2 zapraw, najlepszą wytrzymałością na ściskanie charakteryzują się zaprawy ze spienionymi granulkami szklanymi, a najniższą zaprawy z dodatkiem pianki poliuretanowej (Rys. 3) [13]. Związane jest to z wytrzymałością samego kruszywa, a także z gęstością zaprawy. Wraz ze wzrostem gęstości zaprawy jej wytrzymałość na ściskanie rosła. Najniższe gęstości odnotowano w przypadku zapraw z pianką poliuretanową i perlitem ekspandowanym 0,7 - 0,8 [g/cm³], natomiast największą gęstość objętościową posiadają zaprawy ze spienionymi granulkami szklanymi 1,3 [g/cm³].

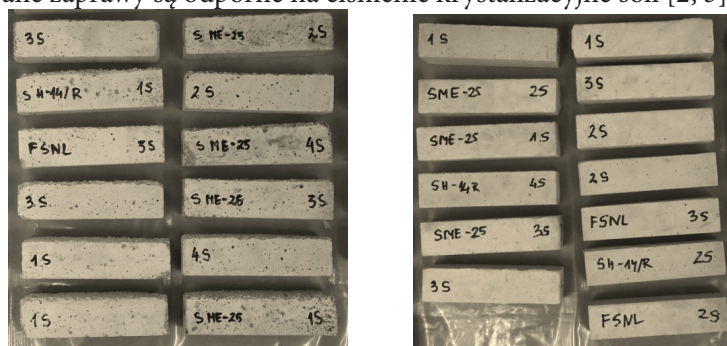
Współczynnik przewodności ciepła jest jedną z najważniejszych właściwości opisujących zaprawy ciepłochronne - im niższy współczynnik λ , tym mniej ciepła przeniknie przez materiał. Wyniki badań współczynnika przewodności cieplnej przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 4. Współczynnik przewodności cieplnej λ [W/m·K] zapraw ciepłochronnych

Uzyskane wartości współczynnika przewodności cieplnej, podobnie jak wytrzymałość na ściskanie, związane były z rodzajem użytego dodatku – kruszywa. Najniższą wartość współczynnika λ posiada zaprawa z dodatkiem perlitu ekspandowanego – 0,19 W/m·K i pianką poliuretanową, a najwyższą zaprawa ze spienionymi granulami szklanymi – 0,49 W/m·K. Kruszywa o niższej gęstości objętościowej, jak perlit i pianka spowodowały obniżenie przewodzenia ciepła.

Badanie mrozoodporności zapraw z keramzytem i perlitem [2, 3] wykazało lepszą mrozoodporność zaprawy z dodatkiem keramzytu [3] w stosunku do zaprawy z dodatkiem perlitu ekspandowanego [2]. Wszystkie analizowane w pracach zaprawy wykazały ogólną odporność na mróz – nie odnotowano całkowitego zniszczenia próbek. Oznaczenie odporności na krystalizację soli wykazało, że analizowane zaprawy są odporne na ciśnienie krystalizacyjne soli [2, 3].



Rys. 5. Stan próbek po wykonaniu oznaczenia odporności na krystalizację soli: próbki zaprawy ciepłochronnej z dodatkiem perlitu [2] (po prawej), próbki zaprawy z dodatkiem keramzytu [3] (po lewej).

4. Podsumowanie

Zaprawy ciepłochronne coraz częściej używane są w celu lepszej izolacji cieplnej budynków ze względu na ich niski współczynnik przewodności cieplnej [48]. Przewodnictwo cieplne zaprawy zwiększa się wraz ze wzrostem zawartości cementu [49] i przewodności cieplnej kruszywa [50, 51], dlatego też w zaprawach ciepłochronnych dąży się do zmniejszenia ilości cementu i zastępuje się go wypełniaczami, które posiadają dużo lepsze własności termiczne. Bouguerra i inni [52] w swojej pracy opisali, iż wraz ze wzrostem porowatości zapraw wzrasta ich przewodność cieplna. W opracowaniu Steiger i Hurda [53] przedstawiono badania, z których wynika, że gdy waga jednostkowa zaprawy wzrasta o 1% ze względu na swoją zdolność do absorpcji wody, przewodność cieplna próbek wzrasta o 5%. Wyżej wymienieni badacze prowadzili rozprawy nad przyczynami wzrostu przewodności cieplnej, ale nie zastanawiali się nad tym jak można by ją obniżyć.

Własności termiczne zapraw są istotne ze względu na ich zastosowanie, zwłaszcza w konstrukcjach, w których pożądana jest niska przewodność cieplna. Pomimo wielu badań mających na celu ulepszenie zapraw pod względem wytrzymałości, stosunkowo mało badań było poświęconych na przewodnictwo cieplne [49, 54, 55].

Jednakże wraz ze wzrostem świadomości ekologicznej coraz częściej naukowcy prowadzą badania mające na celu zmianę piasku na wypełniacze lekkie, które znacząco wpływają na parametry fizyczne i mechaniczne zaprawy. Jeżeli w sposób proporcjonalny zwiększy się objętościowy udział lekkich wypełniaczy w zaprawie, kosztem piasku, obniża się tym samym jej parametry wytrzymałościowe i zmniejsza ciężar, ale w znaczący sposób poprawia się jej termoizolacyjność, odporność ogniową i zdolność pochłaniania hałasu. Zwiększa się również porowatość zapraw w stosunku do tradycyjnych zapraw cementowych i wapiennych.

Badania zestawione w artykule pokazują, że najlepszym wypełniaczem pod względem niskiej przewodności cieplnej jest perlit ekspandowany, a najwyższą wartość tego współczynnika posiadają spienione granulki szklane, które ze względu na wysoki współczynnik nie powinny być stosowane do wznoszenia murów jednowarstwowych, jednakże posiadają najwyższą wartość wytrzymałości na ściskanie.

Zaprawy ciepłochronne ze względu na wysoką nasiąkliwość, porowatość i niską wytrzymałość powinny być w praktyce zabezpieczane przed nadmiernym zawilgoceniem, korozją mrozową i wpływem zasolenia. Badania przedstawione w pracy [3] wykazały, że skutecznym zabezpieczeniem może być hydrofobizacja powierzchniowa preparatami węglowodorowym i o wielkocząsteczkowej budowie – żywicami metylosilikonowymi. Nieskuteczna natomiast okazała się hydrofobizacja w masie przy użyciu mineralnego szlamu uszczelniającego. Pozytywnie na cechy zaprawy wpłynęła domieszka napowietrzająca powodując wzrost mrozoodporności i skuteczności hydrofobizacji.

Literatura

- [1] Szymański E., *Murarstwo i tynkarstwo*, Warszawa: WSiP, 2010.
- [2] Włodarczyk, E. *Właściwości fizyko-mechaniczne hydrofobizowanych zapraw ciepłochronnych z perlitem*, Lublin 2014.
- [3] Szafraniec, M. *Właściwości fizyko-mechaniczne hydrofobizowanych zapraw ciepłochronnych z dodatkiem keramzytu*, Lublin 2014.
- [4] Torres M. i P. García-Ruiz, *Cement and Concrete Composites Lightweight pozzolanic materials used in mortars: Evaluation of their influence on density, mechanical strength and water absorption*, Vol. 31, Issue 2, February 2009, pp. 114–119.
- [5] Junco C., Gadea J., Rodríguez A., Gutiérrez-González S. i Calderón, V., *Durability of lightweight masonry mortars made with white recycled polyurethane foam*, Cement & Concrete Composites 34, 2012, p. 1174–1179.
- [6] Demirboğa R. i Gül R., *The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete*, Cement and Concrete Research. Volume 33, Issue 5, May 2003, pp. 723–727.
- [7] Carvalho R., Teixeira-Dias F. i Varum H., *Cyclic behaviour of a lightweight mortar with cork granulate composite*, Composite Structures, Volume 95, January 2013, p. 748–755.
- [8] Hadj-Sadok A., Kenai S., Courard L. i Darimont A., *Microstructure and durability of mortars modified with medium active blast furnace slag*, Construction and Building Materials, 2011.
- [9] U. Habib, S. Remzi, D. Ramazan i G. Rüstem, *The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete*, Cement and Concrete Research 34, 2004, p. 845–848.
- [10] Degimenci N. i Yılmaz A., *Use of pumice fine aggregate as an alternative to standard sand in production of lightweight cement mortar*, Indian Journal Of Engineering And Materials Sciences. Vol. 18(1), 2011, p. 61–68.

- [11] Corinaldesi V., Nardinocchi A. i Donnini J., *Lightweight aggregate mortars for sustainable and energy-efficient building (Conference Paper)*, Sarawak, Malaysia: *Advanced Materials Research 5th International Conference on Manufacturing Science and Technology*, ICMST 2014, Code 106259, Vol. 980, 7 June 2014 through 8 June 2014, p. 142–146.,
- [12] Wielgus K., *Właściwości fizyko-mechaniczne hydrofobizowanych zapraw ciepłochronnych z zeolitem*, Lublin, 2014.
- [13] Kamonkunanon S., *Light Weight Mortars Produced from Recycled Foam*, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Architectural, Structural and Construction Engineering Vol. 8 No:3, 2014.
- [14] Spiesz P., Yu Q. L. i Brouwers H. J., *Development of Lightweight Mortars Targeted on the Strength, Low Density and Low Permeability*, *Advances in Cement and Concrete Technology in Africa*.
- [15] Demirboğa R. i Gül R., *The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete*, *Cement and Concrete Research* 33(2003), p. 723–727.
- [16] Aciu C., Tamas-Gavrea R. i Munteanu C., *Manufacture of Ecological Mortars by Cork and Sawdust Waste Recycling*, *Bulletin UASVM Horticulture*, 70(2)/2013, 2013, p. 417–424.
- [17] Khonsari V., Eslami E. i Anvari A., *Effects of expanded perlite aggregate (EPA) on the mechanical behavior of lightweight concrete*, *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures - High Performance, Fiber Reinforced Concrete, Special Loadings and Structural Applications-* B. H. Oh, et al. (eds).
- [18] PN-EN 1015-11:2001: *Metody badań zapraw do murów. Określenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie stwardniałej zaprawy*.
- [19] ASTM C109/C109M - 02: *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*.
- [20] EN 1015-11: *Methods of test for mortar for masonry. Part 11. Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*, 2000.
- [21] BS EN 196-1:2005: *Methods of testing cement. Determination of strength*.
- [22] ASTM C496 / C496M - 11: *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- [23] PN-EN 1936:2010: *Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie gęstości i gęstości objętościowej oraz całkowitej i otwartej porowatości*.
- [24] ASTM C642 - 13: *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*.
- [25] EN 1015-10: *Methods of test for mortar formasonry. Part 10. Determination of dry bulk density of hardened mortar*, 2000.
- [26] EN 1015-6: *Methods of test for mortar for masonry. Part 6. Determination of occluded air*.
- [27] Kantarci I. A., *Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete*, *Building and Environment* 42, 2007, p. 2378-2383.
- [28] PN-B-04500:1985: *Zaprawy budowlane. Badania cech fizycznych i wytrzymałościowych*.
- [29] Krzywobłocka-Laurów R. *Środki do powierzchniowej hydrofobizacji betonu*, I Wydanie, Warszawa : ITB ZUAT-15/VI.11-1/00, 2000.
- [30] BS EN 480-5:2005: *Admixtures for concrete, mortar and grout. Test methods. Determination of capillary absorption*.
- [31] Eslami E., *Experimental investigation of using recycled asphalt pavements as aggregate in Portland cement concrete*, Shiraz, Iran (in Persian): *proceedings of 8th International Conferences on Civil Engineering*, 2009.
- [32] ASTM D5930 - 09: *Standard Test Method for Thermal Conductivity of Plastics by Means of a Transient Line-Source Technique*.
- [33] ASTM C332 - 09: *Standard Specification for Lightweight Aggregates for Insulating Concrete*.
- [34] ASTM C1113 / C1113M - 09(2013): *Standard Test Method for Thermal Conductivity of Refractories by Hot Wire (Platinum Resistance Thermometer Technique)*.
- [35] ASTM C1403 - 13: *Standard Test Method for Rate of Water Absorption of Masonry Mortars*.
- [36] BS EN 12390-8:2009: *Testing hardened concrete. Depth of penetration of water under pressure*.
- [37] NT BUILD 443: *Concrete, hardened: Accelerated chloride penetration*.
- [38] Spiesz P. i Brouwers H. J. H., *Influence of the applied voltage on the Rapid Chloride Migration (RCM) test*, *Cement and Concrete Research*, 42(8), 2012, pp. 1072-1082.

- [39] NT BUILD 492: *Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments.*
- [40] C 125 - 05: *Normativ Privind Proiectarea Si Executia Masurilor de Izolare Fonica Si a Trat Acust.*
- [41] ISO 9227: *Corrosion test in artificial atmospheres salt spray test*, 1990.
- [42] DIN EN ISO 6988: *Sulphur dioxide corrosion testing in a saturated atmosphere*, 1997.
- [43] EN ISO 2440:1997: *Flexible and rigid cellular polymeric materials. Accelerated ageing tests*, 1997.
- [44] EN 146508 : 98: *Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar - bar method).*
- [45] Ghrici M., Kenai S. i Said-Mansour M., *Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural puzzolana and limestone blended cements*, Cement & Concrete Composites; 29:542–9, 2007.
- [46] PN-88/B-06250: *Beton zwykły.*
- [47] PN-EN 12370-2001: *Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie odporności na krystalizację soli.*
- [48] Xu Y. i Chung D., *Improving silica fume by using silane*, Cement & Concrete Research 30 (2000), p. 1305.
- [49] Gül R., Uysal H. i Demirboğa R. *Investigation of the thermal conductivity of lightweight concrete made with Kocapinar's pumice aggregate*, Ankara, Turkey: Advances in Civil Engineering: III. Technical Congress, Vol.2, METU, 1997, pp. 553-562.
- [50] Ashworth T. i Ashworth E., *Insulation Materials: Testing and Applications*, in: R.S. Graves, D.C. Wysocki (Eds.), Philadelphia, PA: ASTM Special Technical Publication, vol. 1116, ASTM, 1991, pp. 415-429.
- [51] FIP State of Art Report, *Principles of Thermal Insulation with Respect to Lightweight Concrete*, Slough, England: FIP/8/1, C and CA, 1978.
- [52] Bouguerra A., Ledhem A., de Barquin F., Dheilly R. M. i Queneudec M., *Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement, and wood aggregate*, Cement & Concrete Research, 28(8), 1998, p. 1179–1190.
- [53] Steiger R. i Hurd M., *Lightweight insulating concrete for floors and roof decks*, Concrete Constructions 23(7), 1978, p. 411–422.
- [54] Fu X. i Chung D., *Effects of silica fume, latex, methylcellulose, and carbon fibers on the thermal conductivity and specific heat of cement paste*, Cement & Concrete Research 27, 1997, p. 1799–1804.
- [55] Chen P. i Chung D., *Effect of polymer addition on thermal stability and thermal expansion of cement*, Cement & Concrete Research 25, 1995, p. 465.

The review of research of heat insulating mortars

Danuta Barnat-Hunek¹, Malgorzata Szafraniec²

¹*Department of Construction, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: d.barnat-hunek@pollub.pl*

²*Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: szafraniec.malgorzata@pollub.edu.pl*

Abstract: The paper presents the review of Polish and foreign research on the physical and mechanical properties of heat insulating mortars depending on the additive used to make them. A comparative analysis of the impact of additives enhancing thermal insulation such as: lightweight aggregate LECA, expanded perlite, zeolite, recycled polyurethane foam, expanded-glass lightweight aggregate, expanded perlite and pumice aggregate, silica fume, fly ash, cork granules, sawdust on the physical and mechanical properties of heat insulating mortars was made. Studies have shown that the partial replacement of sand on lightweight fillers significantly affects on the mortar physical and mechanical properties.

Keywords: lightweight mortars, thermal conductivity, physical and mechanical properties

Przegrody oszklone w budynkach energooszczędnych

Magdalena Grudzińska¹

¹ Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: m.grudzińska@pollub.pl

Streszczenie: Artykuł przedstawia rozwiązania konstrukcyjne okien służące zwiększeniu ich izolacyjności termicznej. Prezentowane są podstawowe komponenty okien stosowanych w budynkach o obniżonym zapotrzebowaniu na energię, czyli ramy okienne, zestawy szybowe i ramki dystansowe. Porównano też wpływ poszczególnych elementów składowych na wypadkową izolacyjność cieplną okna o ustalonych wymiarach.

Słowa kluczowe: izolacyjność termiczna okien, budynki energooszczędne.

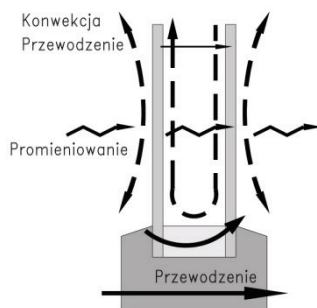
1. Wprowadzenie

Wszystkie przegrody budowlane oddzielające pomieszczenie od powietrza zewnętrznego mają wpływ na zapotrzebowanie na energię do jego ogrzewania. Udział przegród w bilansie energetycznym uzależniony jest od ich izolacyjności cieplnej oraz powierzchni. Niektóre elementy są źródłem jedynie strat ciepła, a niektóre – np. przegrody przezroczyste, mogą generować również pewne zyski ciepła dzięki transmisji do pomieszczenia energii promieniowania słonecznego.

Badania wskazują, że w klimacie polskim dominujące znaczenie dla zużycia energii ma izolacyjność termiczna elementów przeszklonych, a transmisyjność promieniowania słonecznego jest na ogół czynnikiem drugorzędym [1, 2]. Odpowiedni dobór komponentów okna ma więc bardzo ważne znaczenie tym bardziej, że zgodnie dyrektywą 2010/31/UE, wszystkie budynki nowopowstające do dnia 31 grudnia 2020 roku powinny być budynkami o niemal zerowym zużyciu energii.

2. Izolacyjność termiczna okien

Okna są elementami w których zjawiska przepływu ciepła są dość złożone, ze względu na zróżnicowaną budowę ich części składowych. W ramach okiennych dominuje przewodzenie ciepła (w przypadku profili pełnych) lub przewodzenie połączone z konwekcją i promieniowaniem (w przypadku profili komorowych). Układy równoległych szyb przekazują ciepło głównie na drodze promieniowania między szybami i konwekcyjnych ruchów gazu w przestrzeni międzyszybowej. Metalowe ramki dystansowe łączące szyby zespolone stanowią mostek termiczny, zwiększający intensywność przepływu ciepła w miejscu osadzenia szyb w ramie okiennej.



Rys. 1. Schemat wymiany ciepła przez elementy okna

Isolacyjność termiczną całego okna określa wypadkowy współczynnik przenikania ciepła U_w , uwzględniający rodzaj ram okiennych, szyb i ramek dystansowych [3]. Oblicza się go ze wzoru:

$$U_w = \frac{U_g A_g + U_f A_f + \Psi_g l_g}{A_g + A_f} \quad (1)$$

gdzie:

U_g – współczynnik przenikania ciepła przez oszklenie [W/m^2K]

U_f – współczynnik przenikania ciepła przez skrzydła ram i ościeżnicę [W/m^2K]

Ψ_g – liniowy współczynnik przenikania ciepła uwzględniający mostek cieplny w miejscu połączenia ościeżnicy, szyby i ramki dystansowej [W/mK]

A_g – pole powierzchni oszklenia [m^2]

A_f – pole powierzchni ram i ościeżnicy [m^2]

l_g – łączna długość krawędzi oszklenia [m].

Tak obliczony współczynnik określa izolacyjność cieplną okien wbudowanych w pozycji pionowej. Jeżeli mamy do czynienia z oknami połączowymi, współczynnik przenikania ciepła może być większy ze względu na bardziej intensywne procesy konwekcji. Przykładowo, dla okien nachylonych pod kątem 45° izolacyjność cieplna może być mniejsza o około 20%.

Okna i drzwi balkonowe w budynku energooszczędnym powinny charakteryzować się współczynnikiem przenikania ciepła rzędu $1,1 \div 1,2 W/m^2K$. Są to wielkości niewiele mniejsze niż wymagane w budynkach nowoprojektowanych zgodnie z warunkami technicznymi obowiązującymi od 2014 do 2016 roku ($U_w \leq 1,3 W/m^2K$).

3. Komponenty okien energooszczędnych

3.1. Ramy okienne

Ramy okienne są na ogół elementem najsłabszym termicznie, bez względu na materiał z jakiego są wykonane. Korzystnym zabiegiem będzie więc ograniczenie powierzchni ramy, np. poprzez stosowanie okien nieotwieralnych lub okien o pojedynczych skrzydłach.

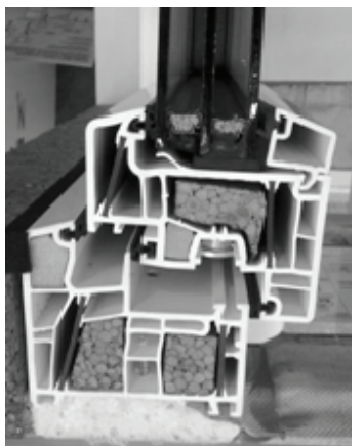
Izolacyjność cieplna profili drewnianych zależy przede wszystkim od rodzaju drewna. Miękkie drewno iglaste (np. sosnowe) ma współczynnik przenikania ciepła o około 20% niższy niż twarde drewno liściaste (np. dębowe).



Rys. 2. Izolacyjność termiczna profili z drewna twardego i miękkiego, wg [3]

W środkowej części profili z drewna klejonego można umieścić wypełnienie z materiału termoizolacyjnego, np. pianki poliuretanowej. Materiał izolacyjny może być też umieszczony od strony zewnętrznej ramy. Przed działaniem czynników atmosferycznych zabezpiecza się go profilami aluminiowymi. Rozwiązania te znacznie zwiększają izolacyjność cieplną i mogą być wykorzystywane nawet w budynkach pasywnych.

Profile z PCW okien energooszczędnych mają zwiększoną liczbę komór – co najmniej 6. Zwiększenie liczby komór musi iść w parze z poszerzeniem profilu, w przeciwnym razie może spowodować zmniejszenie sztywności ramy na skutek zwężenia komory środkowej, w której umieszcza się wzmocnienia konstrukcyjne. Wzmocnienia te mogą być wykonywane z kompozytów poliestrowo-szklanych, o parametrach cieplnych lepszych niż w przypadku wzmocnień stalowych. Wewnętrzne komory wypełniane są pianką poliuretanową.



Rys. 3. Rama okienna z PCW o zwiększonej izolacyjności termicznej

Profile aluminiowe stosowane w budynkach ogrzewanych powinny mieć wewnątrz skrzydeł i ościeżnicy przekładki termiczne z poliamidu wzmacnianego włóknem szklanym, oddzielające część wewnętrzną profilu (ciepłą) od części zewnętrznej (zimnej). Wnętrze przekładek może być wypełnione pianką poliuretanową. Zabiegi te umożliwiają dostosowanie profili aluminiowych do wymagań stawianych budynkom tradycyjnym i energooszczędnym.

Tabela 1. Izolacyjność termiczna wybranych ram okiennych.

Lp.	Materiał i konstrukcja ramy okiennej	Współczynnik U_f [W/m ² K]
1	Ramy aluminiowe: z przekładką termiczną	2,2 ÷ 3,0
	z przekładką termiczną z wypełnieniem z pianki poliuretanowej	1,4 ÷ 2,2
2	Ramy z polichlorku winylu trzykomorowe puste	2,0
	pięciokomorowe puste	1,5 ÷ 1,6
	sześciokomorowe z wypełnieniem z pianki poliuretanowej	1,2
3	Ramy zwykłe z drewna twardego (700 kg/m ³), o głębokości:	
	80 mm	1,95
	90 mm	1,85
	100 mm	1,75
4	Ramy zwykłe z drewna miękkiego (500 kg/m ³), o głębokości:	
	80 mm	1,70
	90 mm	1,60
	100 mm	1,50
5	Ramy drewniane izolowane pianką PU	0,70

Głębokość profili powinna być zwiększona w stosunku do okien tradycyjnych. Głębokość profili z tworzyw sztucznych w oknach o zwiększonej izolacyjności wynosi na ogół 80 ÷ 90 mm, a głębokość profili drewnianych 88 ÷ 101 mm (głębokości profili typowych to 60 ÷ 70 mm). Pozwala to nie tylko uzyskać niższy współczynnik przenikania ciepła, ale i umożliwia osadzenie szerszych pakietów szybowych.

W celu zwiększenia szczelności i izolacyjności cieplnej w oknach energooszczędnych stosuje się także dodatkowe uszczelki przylgowe, zamiast standardowych pojedynczych lub podwójnych uszczelnień. W oknach z PCW umieszczane są one w środkowej części styku ościeżnicy i skrzydła okiennego, a w oknach drewnianych – wzdłuż wewnętrznej krawędzi styku ościeżnicy i skrzydła.

3.2. Szyby zespolone

Pakiet szyb zespolonych tworzą dwie lub trzy szyby o grubości 4 mm. Między szybami umieszczona jest ramka dystansowa, wypełniona substancją pochłaniającą parę wodną i zapobiegającą jej kondensacji w komorze międzyszybowej.

Ramka ta jest przyklejona do szyb i uszczelniona od zewnątrz, tworząc hermetyczne połączenie. Izolacyjność cieplną zestawu szyb zespolonych można zwiększyć:

- zwiększając ilość szyb
- stosując wypełnienie z gazu szlachetnego pomiędzy szybami
- stosując szyby z powłokami chroniącymi przed stratami ciepła.

W oknach energooszczędnych umieszcza się pakiety trzyszybowe, wypełniane powietrzem lub gazami szlachetnymi – najczęściej w tym celu stosuje się argon, krypton lub ksenon, o stężeniu co najmniej 85%. Gazy te mają niższy współczynnik przewodzenia ciepła oraz są cięższe od powietrza, dzięki czemu zmniejszają straty ciepła na drodze przewodzenia i konwekcji.

Odległość pomiędzy szybami wynosi na ogół od 8 do 16 mm i jest uzależniona od rodzaju wypełnienia gazowego. Im większa gęstość gazu, tym niższy współczynnik przewodzenia ciepła. Pozwala to zmniejszyć szerokość przestrzeni pomiędzy taflami szkła przy zachowaniu wysokiej izolacyjności termicznej. Powyżej określonej szerokości wymiana ciepła między szybami będzie zachodzić na nie tylko na skutek przewodzenia, ale i konwekcji, co zwiększy straty ciepła.

Tabela 2. Parametry wypełnień gazowych wg [4]

Lp.	Rodzaj gazu	Gęstość [kg/m ³]	Współczynnik λ [W/mK]	Maksymalna szerokość przestrzeni międzyszybowej [mm]
1	Powietrze	1,27	0,0241	20
2	Argon	1,78	0,0162	17
3	Krypton	3,74	0,0086	11
4	Ksenon	5,90	0,0051	8

Emisyjność szkła, czyli zdolność do wypromieniowywania ciepła w porównaniu z ciałem doskonale czarnym, jest dosyć wysoka i wynosi 86%. Aby zmniejszyć straty ciepła przez promieniowanie, tafle szyb mogą być pokrywane powłokami niskoemisyjnymi. Powłoki te odbijają promieniowanie cieplne, ograniczając wymianę ciepła między cieplejszą szybą wewnętrzną a chłodniejszą szybą zewnętrzną. Powoduje to znaczny wzrost izolacyjności termicznej zestawów szybowych (o około 30% ÷ 50%).

Powłoki twarde otrzymuje się w procesie on-line (podczas produkcji szkła) metodą pyrolityczną – poprzez napyłanie tlenków metali na powierzchnię szkła rozgrzanego do temperatury około 800°C. Powłokę tworzą dwie warstwy:

- zewnętrzną z tlenków cyny wzbogaconej fluorem, o grubości ok. 320 nm
- wewnętrzną z nawęglonego tlenku krzemu grubości 60÷80 nm, chroniącą warstwę zewnętrzną przed dyfuzją jonów sodu ze szkła.

Powłoki te są bardzo odporne mechanicznie, ze względu na sposób produkcji, w którym substancje napyłane zostają „zapieczone” na powierzchni szkła. Ze względu na prostą strukturę powłoki te posiadają bardzo ograniczone właściwości, związane jedynie z ochroną przed startami ciepła. Emisyjność powłok pyrolitycznych wynosi na ogół od 0,13 do 0,20.

Powłoki miękkie powstają w procesie off-line (poza linią produkcyjną), poprzez naniesienie kilku warstw grubości $1 \div 40$ nm z metali (np. srebro) i tlenków metali (bizmutu, cyny i cynku), metodą magnetronowego napylania katodowego w próżni.

Szyby zespolone z zastosowaniem szkła miękkipowłokowego mają współczynnik przenikania ciepła U_g mniejszy od szyb z powłokami twardymi, jednak tradycyjne powłoki miękkie są bardziej podatne na zarysowanie. Z tego mogą być one stosowane tylko wewnątrz zestawów szyb zespolonych. W ostatnich latach technologia produkcji powłok metodą magnetronową rozwinęła się, umożliwiając wykonywanie powłok grubszych o większej twardości. Zaawansowane powłoki tworzone są przez następujące warstwy:

- warstwa dolna i górna – decydująca o odporności mechanicznej i barwie powłoki
- warstwa ochronna – zabezpieczająca przed wpływami chemicznymi i mechanicznymi
- warstwa funkcyjna – decydująca o izolacyjności termicznej i zdolności przepuszczania promieniowania słonecznego.

W odróżnieniu od powłok produkowanych metodą pyrolityczną, powłoki magnetronowe mają szersze zastosowanie i mogą służyć także do regulacji zysków słonecznych. Emisyjność powłok magnetronowych wynosi na ogół od 0,03 do 0,10.

Powłoki niskoemisyjne umieszczane są na szybie wewnętrznej lub na obu szybach, od strony komory międzyszybowej. Powłoki spełniające funkcję ochrony przeciwsłonecznej powinny być umieszczane od strony zewnętrznej, mimo że zabezpieczają także przed stratami ciepła.

Tabela 3. Izolacyjność termiczna szyb zespolonych o różnej konstrukcji wg [3].

Lp.	Oszklenie			Współczynnik przenikania ciepła U_g [W/m ² K]			
	Typ	Emisyjność	Wymiary	Powietrze	Argon	Krypton	Ksenon
1	Oszklenie podwójne szkło zwykłe (niepowlekane)	0,89	4-6-4	3,3	3,0	2,8	2,6
			4-8-4	3,1	2,9	2,7	2,6
			4-12-4	2,8	2,7	2,6	2,6
2	Oszklenie podwójne jedna szyba powlekana	$\leq 0,05$	4-6-4	2,5	2,1	1,5	1,2
			4-8-4	2,1	1,7	1,3	1,1
			4-12-4	1,7	1,3	1,1	1,2
3	Oszklenie potrójne szkło zwykłe (niepowlekane)	0,89	4-6-4-6-4	2,3	2,1	1,8	1,7
			4-8-4-8-4	2,1	1,9	1,7	1,6
			4-12-4-12-4	1,9	1,8	1,6	1,6
4	Oszklenie potrójne dwie szyby powlekane	$\leq 0,05$	4-6-4-6-4	1,6	1,2	0,9	0,7
			4-8-4-8-4	1,3	1,0	0,7	0,5
			4-12-4-12-4	1,0	0,8	0,5	0,5

3.3. Ramki dystansowe

W tradycyjnych oknach ramki dystansowe wykonywane są najczęściej z aluminium. Zdolność przewodzenia ciepła metali jest znacznie większa niż szyb lub

ram okiennych, stąd w miejscu osadzenia szyby w ramie powstaje mostek termiczny. Jego widocznym efektem może być wykraplanie się wilgoci wzdłuż krawędzi szyby.

W oknach o podwyższonych parametrach izolacyjnych zachodzi konieczność stosowania ramek pozwalających na ograniczenie niekorzystnego wpływu mostków cieplnych.

Do rozwiązań takich zalicza się:

- ramki ze stali szlachetnej (nierdzewnej) o grubości ścianek $0,15 \div 0,20$ mm
- profile propylenowe pokryte cienką folią metalową
- profile poliwęglanowe z taśmą stalową wtopioną w przekrój ścianki
- ramki z elastycznych taśm lub mas uszczelniających nakładanych wzdłuż krawędzi szyb.

Ramki dystansowe nie powinny być cięte w narożach. Wymagane jest stosowanie ramek giętych, ze względu na większą szczelność połączeń.

Tabela 4. Parametry izolacyjne ramek (dla okien drewnianych lub z PCW, oszklonych podwójnie lub potrójnie z oszkleniem wypełnionym gazem lub powietrzem)

Lp.	Typ ramki dystansowej	Liniowy współczynnik przenikania ciepła Ψ_g [W/mK]	
		Szkło niepowlekane	Szkło niskoemisyjne
1	tradycyjna (z aluminium lub stali)	0,06	0,08
2	o ulepszonych właściwościach cieplnych	$0,02 \div 0,04$	$0,03 \div 0,05$

4. Ocena izolacyjności termicznej okien o wybranych komponentach

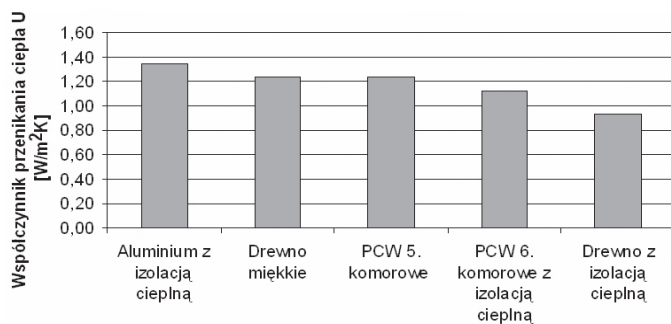
W prezentowanych obliczeniach porównano izolacyjność cieplną okna o stałych wymiarach i różnych elementach składowych. Jest to okno o szerokości równej 1780 mm, wysokości 1455 mm, dwuskrzydłowe ze słupkiem stałym. Przeanalizowano wpływ konstrukcji ramy i rodzaju szyb na współczynnik przenikania ciepła całego elementu. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabelach 5 i 6 oraz na rysunkach 4 i 5.

Tabela 5. Wpływ konstrukcji ramy na wypadkową izolacyjność termiczną. Dodatkowe założenia: oszklenie potrójne z wypełnieniem argonem 4-12-4-12-4, szyby niskoemisyjne, ramka o ulepszonych właściwościach cieplnych

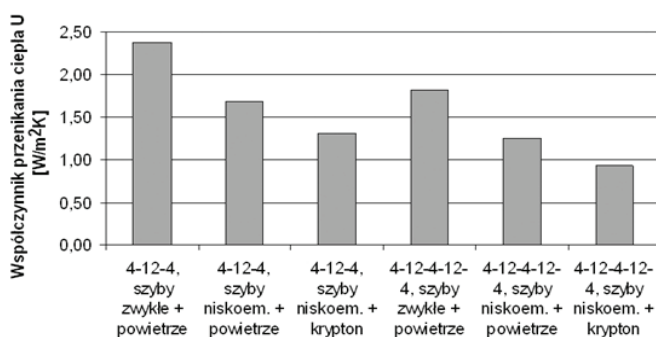
Lp.	Konstrukcja ramy	U_g [W/m ² K]	A_g [m ²]	U_f [W/m ² K]	A_f [m ²]	Ψ_g [W/mK]	l_g [m]	U_w [W/m ² K]
1	Aluminium z izolacją cieplną	0,8	1,625	1,8	0,965	0,06	7,50	1,35
2	Drewno miękkie	0,8	1,625	1,5	0,965	0,06	7,50	1,23
3	PCW 5. komorowe	0,8	1,625	1,5	0,965	0,06	7,50	1,23
4	PCW 6. komorowe z izolacją cieplną	0,8	1,625	1,2	0,965	0,06	7,50	1,12
5	Drewno z izolacją cieplną	0,8	1,625	0,7	0,965	0,06	7,50	0,94

Tabela 6. Wpływ konstrukcji szyby na wypadkową izolacyjność termiczną. Dodatkowe założenia: rama z PCW 6. komorowego z izolacją cieplną, ramka o ulepszonych właściwościach cieplnych

Lp.	Konstrukcja szyby	U_g [W/m ² K]	A_g [m ²]	U_f [W/m ² K]	A_f [m ²]	Ψ_g [W/mK]	l_g [m]	U_w [W/m ² K]
1	4-12-4, szyby zwykłe + powietrze	2,8	1,625	1,2	0,965	0,06	7,50	2,38
2	4-12-4, szyby niskoem. + powietrze	1,7	1,625	1,2	0,965	0,06	7,50	1,69
3	4-12-4, szyby niskoem. + krypton	1,1	1,625	1,2	0,965	0,06	7,50	1,31
4	4-12-4-12-4, szyby zwykłe + powietrze	1,9	1,625	1,2	0,965	0,06	7,50	1,81
5	4-12-4-12-4, szyby niskoem. + powietrze	1,0	1,625	1,2	0,965	0,06	7,50	1,25
6	4-12-4-12-4, szyby niskoem. + krypton	0,5	1,625	1,2	0,965	0,06	7,50	0,93



Rys. 4. Wpływ ramy na izolacyjność termiczną okna



Rys. 5. Wpływ szyby na izolacyjność termiczną okna

Większość zaproponowanych rozwiązań ram okiennych, przy założeniu stosunkowo korzystnego pakietu oszkleń, pozwala spełnić wymagania stawiane w warunkach technicznych budynkom nowoprojektowanym. Ramy z wewnętrzn-

ną izolacją termiczną, zarówno z PCW jak i drewniane, mogą być stosowane w budynkach energooszczędnych.

Pośród przeanalizowanych pakietów szybowych, zalecanym rozwiązaniem w budynkach nowoprojektowanych i energooszczędnych są zestawy z szybami pokrytymi powłokami spektralnie selektywnymi, wypełnione gazami szlachetnymi. Wypadkowa izolacyjność termiczna okien w których zastosowano pakiety bez powłok lub wypełnione powietrzem, wynosiła ponad $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

5. Podsumowanie

Elementy składowe mają ważny wpływ na izolacyjność termiczną okna. Lepsze właściwości cieplne komponentów pozwalają uzyskać niższy wypadkowy współczynnik przenikania ciepła.

Ramy okienne na ogół są elementem o gorszej izolacyjności. Zestawy szybowe, ze względu na zaawansowane technologie produkcji, charakteryzują się znacznie niższymi współczynnikami przenikania ciepła. Mimo to, dobierając komponenty okien należy dążyć do stosowania rozwiązań o porównywalnej jakości termicznej. Dzięki temu można uzyskać okna o zbliżonych parametrach, nawet jeżeli będą się one różniły wymiarami i udziałem powierzchni ram oraz szyb w powierzchni elementu.

Literatura

- [1] Kisilewicz T., *Wpływ izolacyjnych, dynamicznych i spektralnych właściwości przegród na bilans cieplny budynków energooszczędnych*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Seria Inżynieria Lądowa, Monografia 364, Kraków 2008.
- [2] Grudzińska M., *Konstrukcja okien a bilans cieplny pomieszczenia*. Przegląd Budowlany 7-8 (2011) 24-27.
- [3] *EN ISO 10077-1 Ciepłne właściwości użytkowe okien, drzwi i żaluzji – obliczanie współczynnika przenikania ciepła. Część 1: Postanowienia ogólne*.
- [4] Respondek Z., *Parametry techniczne nowoczesnych przegród szklanych, część 1*. Świat Szkła 10 (2007).

Windows in low-energy buildings

Magdalena Grudzińska¹

¹ *Department of General Building Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: m.grudzinska@pollub.pl*

Abstract: The paper presents construction of windows implemented in low-energy buildings and their insulating properties. Basic window components, such as frames, glazing and spacers, are assessed taking into account their influence on the heat losses of the entire element. Thermal transmittance coefficient of windows was compared, including different frames and glazing types.

Keywords: thermal transmittance of windows, low-energy buildings.

Wpływ impregnacji pokostem lnianym na nasiąkliwość kompozytu na bazie słomy lnianej i spoiwa wapiennego

Stanisław Fic¹, Przemysław Brzyski²

¹Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: s.fic@pollub.pl

²Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: p.brzyski@pollub.pl

Streszczenie: Coraz powszechniejsze w budownictwie staje się dążenie do ograniczenia zużycia energii w procesie produkcji materiałów budowlanych, w trakcie budowy oraz eksploatacji budynku przez użytkowników. Produkowane są między innymi ekologiczne materiały budowlane, jako kompozyty oparte na odpadach z produkcji rolnej np. słomy, paździerz lnianych i konopne oraz ograniczeniem spoiwa cementowego na rzecz ekologicznego wapna. Otrzymane materiały mogą pełnić funkcje konstrukcyjno-izolacyjne. Problemem w przypadku takich kompozytów jest ich mała szczelność i związana z tym duża nasiąkliwość, co z kolei wpływa na pogorszenie parametrów izolacyjnych w przypadku dużej wilgotności materiału. Sposobem na ograniczenie nasiąkliwości są różnego rodzaju impregnacje.

W artykule przedstawiono i przeanalizowano wyniki badań nasiąkliwości i zdolności odparowania kompozytu składającego się głównie ze słomy i włókna lnianego oraz modyfikowanego spoiwa wapiennego, poddanego zabiegowi impregnacji pokostem lnianym różnymi sposobami.

Słowa kluczowe: hydrofobizacja, budownictwo ekologiczne, wypełniacze organiczne

1. Wprowadzenie

Zrównoważony rozwój w budownictwie ma na celu zachowanie równowagi w sferze środowiskowo-społecznej. Priorytetem jest ograniczenie zużycia energii w procesie produkcji materiałów budowlanych, w trakcie budowy oraz eksploatacji budynku przez użytkowników. Istotne jest zminimalizowanie emisji gazów cieplarnianych do atmosfery, popularyzowanie wykorzystywania odnawialnych źródeł energii oraz zagospodarowania odpadów poprodukcyjnych. Idee te w praktyce polegają m.in. na wykorzystywaniu nowych technologii energooszczędnych. Produkowane są ekologiczne materiały budowlane, jako kompozyty z wykorzystaniem odpadów z produkcji rolnej np. słoma, paździerz lniane i konopne oraz ograniczeniem spoiwa cementowego na rzecz ekologicznego wapna. Prezentacje niektórych właściwości takich kompozytów można spotkać w literaturze polskiej i światowej [1,2,3,4,5]. Rośliny z których powstają te odpady w trakcie upraw pochłaniają dwutlenek węgla, natomiast wykorzystanie ich skutkuje ograniczeniem emisji gazów cieplarnianych podczas procesu produkcji materiałów budowlanych. Otrzymane materiały mogą pełnić funkcje konstrukcyjno-izolacyjne. Ważnym parametrem zatem jest ich przewodnictwo i opór cieplny. Obowiązujące warunki techniczne określają maksymalny współczynnik przewodzenia ciepła dla ścian zewnętrznych równy 0,25 W/m²K [6]. Z przeprowadzo-

nych badań wynika, że kompozyty na bazie odpadów celulozowych mogą spełnić ten warunek przy grubości ściany ok. 40–45 cm [3]. Głównym zastosowaniem kompozytu jest wypełnienie ściennej konstrukcji szkieletowej.

Problemem w przypadku kompozytu opartego na odpadach roślinnych i wapnie jest jego mała szczelność i związana z tym duża nasiąkliwość, co z kolei wpływa na pogorszenie parametrów izolacyjnych w przypadku dużej wilgotności materiału. Kompozyty zawierające słomę lnianą wchłaniają większą część wody już w pierwszych minutach po zanurzeniu w wodzie. Sposobem na ograniczenie nasiąkliwości są różnego rodzaju impregnacje powierzchniowe i strukturalne. Mogą to być np. preparaty hydrofobizujące wodorozcieńczalne lub węglowodorowe związki krzemoorganiczne jak i ekologiczny impregnat – pokost lniany. Pokost jest stosowany do impregnacji drewna i materiałów drewnopochodnych. Wytwarzany jest z zagęszczonego oleju lnianego (główne z lnu uprawianego na skażonych glebach, którego nasiona nie nadają się do spożycia), który zapewni właściwości hydrofobowe, z dodatkiem substancji przyspieszających wysychanie (sykatywy). Biorą one udział w naturalnej polimeryzacji rodnikowej, która powoduje sieciowanie oleju, czyli jego schnięcie [7].

W niniejszym artykule przedstawione zostaną efekty impregnacji lekkiego kompozytu na bazie słomy i włókien lnianych naturalnym preparatem (pokostem lnianym) na przykładzie zbadania nasiąkliwości.

2. Procedura doświadczalna

Badany materiał bez zabezpieczenia impregnacją charakteryzuje się wysoką nasiąkliwością. Maksymalna chłonność występuje w pierwszych minutach po zanurzeniu w wodzie. Celem wykonanych badań było określenie nasiąkliwości kompozytu i wpływu impregnacji na jej ograniczenie. Na podstawie wyników badań nasiąkliwości wagowej przeanalizowano skuteczność zastosowanych sposobów impregnacji.

Do wykonania mieszanki zastosowano jako spoiwo wapno hydratyzowane i cement portlandzki popiołowy CEM II/A 42,5R, kruszywo lekkie – szkło piankowe (produkt ekologiczny, wykonany ze szkła poddanego recyklingowi) o frakcji 0–4 mm oraz słomę lnianą wraz z włóknem pociętą na odcinki o długości około 15–20 mm, naturalny dodatek pucolanowy w postaci kalcynowanej gliny kaolinowej (meta-kaolinit), charakteryzujący się wysoką aktywnością pucolanową oraz wodę z wodociągu miejskiego. Słomę przed dodaniem do mieszanki wypłukano w wodzie w celu pozbycia się pyłów oraz by ograniczyć wchłanianie wody zarobowej przez słomę. Dodając superplastyfikator upłynniono mieszankę, poprawiając jej urabialność. Recepturę laboratoryjną badanego kompozytu podano w tabeli 1.

Tabela 1. Składniki mieszanki kompozytowej

Składnik	Ilość (proporcje)
Wapno hydratyzowane	W
Cement CEM II/A 42,5R	$C=45\% \cdot W$ (wagowo)
Pucolana	$MK=10\% \cdot (W+C)$ (wagowo)
Szkło piankowe	$75\% \cdot (W+C+MK)$ (objętościowo)
Słoma lniana z włóknem	$150\% \cdot (W+C+MK)$ (objętościowo)
Woda	$75\% \cdot (W+C+MK)$ (wagowo)
Superplastyfikator	$0,75\% \cdot W$ (wagowo)

Do badań nasiąkliwości wagowej wykorzystano próbki o wymiarach 110x60x50 mm. Są to wymiary nieregulowane żadną normą, zostały wycięte z większych form. Wszystkie próbki formowano i zagęszczano ręcznie poprzez ubijanie. Ze względu na małą gęstość świeżej mieszanki, niemożliwe było zagęszczenie pod wpływem sił ciężkości. Przykładowe wykorzystane próbki pokazano na zdjęciu (rys. 1).

Ze względu na docelowy ekologiczny charakter kompozytu w badaniach wykorzystano pokost lniany do jego impregnacji. Próbkę niepoddaną impregnacji oznaczono jako wzorcową P0, natomiast zabieg impregnacji przeprowadzono w trzech wariantach:

- P1 – próbka zaimpregnowana poprzez dodatek pokostu do mieszanki (2% masy spoiwa)
- P2 – próbka zaimpregnowana poprzez namoczenie słomy lnianej w pokoście (pokost podgrzano by upłynnić jego konsystencję, w celu lepszego nasączenia słomy)
- P3 – próbka zaimpregnowana poprzez powierzchniowe zabezpieczenie próbki pokostem.

Nasiąkliwość wagową zbadano po 28-dniowym okresie dojrzewania kompozytu w warunkach laboratoryjnych, w temperaturze $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ oraz wilgotności względnej $65\% \pm 5\%$.



Rys 1. Wybrane próbki kompozytu wykorzystane w badaniach

3. Właściwości fizyczne i mechaniczne

Badania podstawowych właściwości fizycznych (gęstość objętościowa, szczelność, porowatość, przewodnictwo cieplne) i mechanicznych (wytrzymałość na ściskanie) kompozytu oraz analiza wyników były przedmiotem wcześniejszych prac własnych [5]. Wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Właściwości fizyczne i mechaniczne badanego kompozytu po 28 dniach

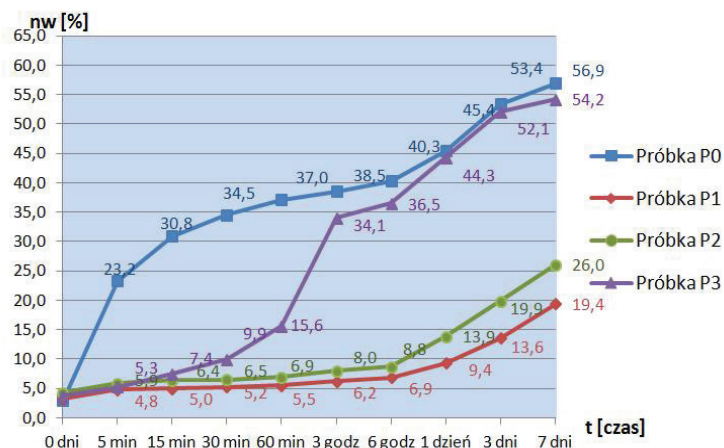
Właściwości	Wartość średnia
Wytrzymałość na ściskanie	2,14 MPa
Gęstość objętościowa	0,72 kg/dm ³
Porowatość	69,0 %
Szczelność	31,0 %
Współczynnik przewodności cieplnej	0,14-0,15 W/mK

3.1. Nasiąkliwość wagowa oraz wskaźnik nasiąkliwości wagowej

Pomiary nasiąkliwości wagowej kompozytu przeprowadzono w odniesieniu do 9 okresów: po 5, 15, 30, 60, 180 minutach, 3 godzinach oraz po 1, 3 i 7 dniach. Małe odstępy czasowe w początkowym okresie badania dobrane zostały z uwagi na znaczną chłonność wody przez słomę lnianą w celu dokładnego zobrazowania nasiąkliwości. W badaniu użyto po 3 reprezentatywne próbki dla P0, P1, P2 i P3.

Próbki przed badaniem nie zostały wysuszone do stałej masy, lecz zostały poddane badaniom w stanie powietrzno-suchym. Wyjściowa wilgotność względna materiału określoną przez stosunek masy wody zawartej w materiale do masy materiału w stanie suchym wynosiła około 3-4%. Mała gęstość objętościowa próbek uniemożliwiła zanurzenie ich w wodzie pod wpływem siły grawitacji. Wobec tego próbki odpowiednio dociążono.

Wyniki badań przedstawia wykres (rys. 2).



Rys 2. Wykres nasiąkliwości wagowej badanych próbek w czasie

Najbardziej dynamiczny wzrost nasiąkliwości zauważono w próbce niezabezpieczonej P0 w ciągu pierwszych 5 minut po zanurzeniu w wodzie. W kolejnych odstępach czasu przyrost był bardziej łagodny. Między 3 a 7 dniem badania, nasiąkliwość wzrosła jedynie o 3,5 %. W próbce P3, zabezpieczonej powierzchniowo impregnacja dawała dobre rezultaty w początkowym okresie badania, mniejszym niż 60 minut. Później nastąpił gwałtowny wzrost wilgotności. Próbkę P1 i P3 zabezpieczone strukturalnie wykazały się powolnym przyrostem nasiąkliwości - pierwszych minutach praktycznie niezauważalnym, po 6 godzinach badania wynosiła ona odpowiednio 6,9% oraz 8,8% natomiast po 7 dniach 19,4% oraz 26%.

Wyznaczono wskaźnik nasiąkliwości wagowej określony przez stosunek średniej wartości nasiąkliwości wagowej próbek impregnowanych do materiału wzorcowego (1).

$$W_h = \frac{n_h}{n_b} \cdot 100\% \quad (1)$$

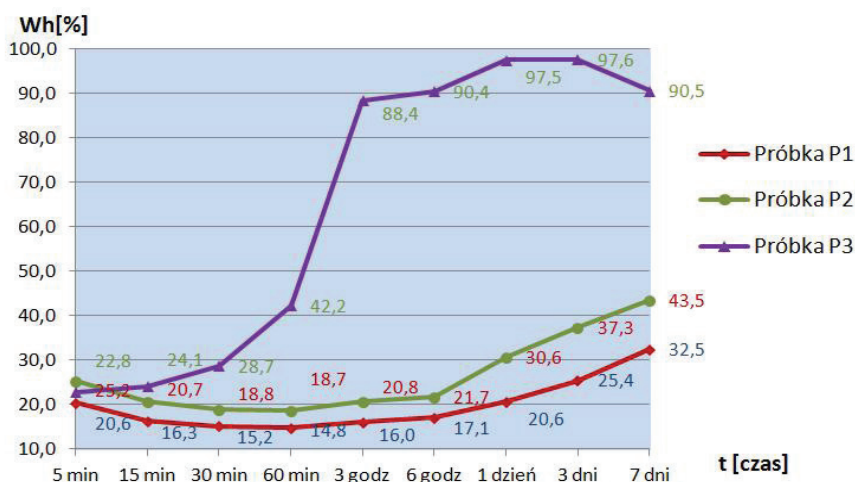
gdzie:

W_h – wskaźnik nasiąkliwości wagowej, %

n_h – nasiąkliwość wagowa próbki impregnowanej, %

n_b – nasiąkliwość wagowa próbki porównawczej, %.

Wyniki badań przedstawia poniższy wykres (rys. 3). Im niższa nasiąkliwość tym niższy wskaźnik nasiąkliwości wagowej. Najwyższy wskaźnik uzyskała próbka P3, która po około 3 godzinach nasączenia zbliżała się do wartości nasiąkliwości jaką prezentowała próbka kontrolna.



Rys 3. Wykres wskaźnika nasiąkliwości wagowej badanych próbek w czasie

Przedstawiono również w formie wykresu skuteczność impregnacji, obliczoną ze wzoru (2):

$$W_n = 100\% - \frac{n_h}{n_b} \cdot 100\% \quad (2)$$

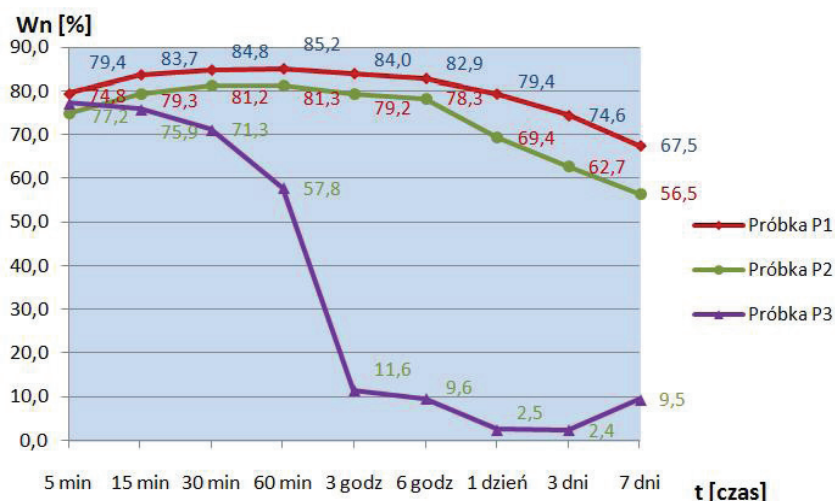
gdzie:

W_n – wskaźnik skuteczności impregnacji, %

n_h – nasiąkliwość wagowa próbki impregnowanej, %

n_b – nasiąkliwość wagowa próbki porównawczej, %.

Wyniki przedstawiono na wykresie (rys. 4). Najwyższą skuteczność wykazał pierwszy sposób impregnacji pokostem, czyli wprowadzenie go do masy. Skuteczność w przeciągu 7 dni moczenia próbki w wodzie spadła do 67,5%. Próbka P2 była o oko 10% mniej skuteczna od P1, natomiast P3 skuteczność na poziomie dwóch pozostałych próbek wykazywała do ok. 60 minut moczenia. Później skuteczność tego zabiegu (impregnacji powierzchniowej) spadała do poziomu kilku procent.



Rys 4. Wykres wskaźnika skuteczności impregnacji badanych próbek w czasie

3.2. Zdolność odparowania kompozytu

Dodatek pokostu lnianego, mimo skutecznego zabezpieczenia przed wnika- niem wody, jednocześnie mógł w pewnym stopniu ograniczyć dyfuzję pary wod- nej. W związku z tym wykonano badanie zdolności wysychania (oddawania pary wodnej) kompozytu.

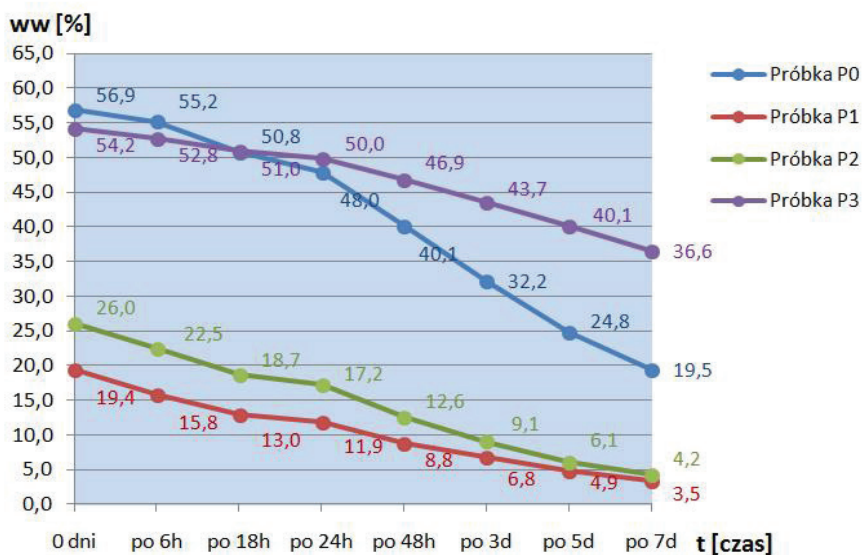
Badana właściwość jest niezwykle ważna w przypadku materiałów zawiera- jących składniki organiczne, w przypadku których zwiększona wilgotność może doprowadzić do ich wcześniejszego rozkładu. Zdolność absorbowania wilgoci i jednocześnie jej oddawania do środowiska o mniejszym poziomie wilgotności

jest z kolei ważną zaletą niektórych ekologicznych materiałów budowlanych, gdyż zapewniają one regulację poziomu wilgotności w pomieszczeniach bo przekłada się na lepszy mikroklimat i komfort dla użytkowników pomieszczeń.

Po zakończeniu badania nasiąkliwości wagowej próbki zostały wyciągnięte z wody, a następnie pozostawione w temp. ok. 25°C i wilgotności względnej $65 \pm 5\%$ w celu schnięcia. W tym czasie określono szybkość schnięcia próbek przez pomiar ubytku ich masy, świadczący o ilości odparowanej wody. Wyniki wilgotności próbek w poszczególnych okresach czasu przedstawiono na poniższych wykresie (rys. 5).

Najbardziej dynamiczny spadek wilgotności można zauważyć w przypadku próbki niezabezpieczonej P0. Jednak przez 7 dni próbka nie powróciła do poziomu wilgotności z początku badania nasiąkliwości. Osiągnęła ponad 19,5%. Próbki P1 i P2 natomiast oddały niemal całą wilgoć nabytą podczas badania nasiąkliwości. Świadczy to o neutralnym wpływie impregnacji na dyfuzję pary wodnej, co jest zaletą. Najslabiej wilgoć oddawała próbka P3 zabezpieczona powierzchniowo pokostem – z 54,2% do 36,6% w ciągu 7 dni suszenia.

Rys 5. Wykres spadku wilgotności badanych próbek w czasie



Jako wskaźnik wilgotności badanego kompozytu przed impregnacją i po jej wykonaniu wyznaczono procentowy spadek wilgotności po 7 dniach suszenia próbek (tabela 3). Najwięcej wilgotności przez 7 dni suszenia oddała próbka P2, 83,7% natomiast najmniej P3 – 32,6%. Było to spowodowane utrudnioną dyfuzją pary wodnej, ze względu na powłokę pokostu na powierzchni próbki. Woda przedostała się do struktury w wyniku szczelin w warstwie powłoki impregnatu, jednak odprowadzenie wilgotności tak małą powierzchnią było utrudnione.

Tabela 3. Spadek wilgotności po 7 dniach suszenia próbek

Oznaczenie próbki	P0	P1	P2	P3
Spadek wilgotności po 7 dniach suszenia próbek [%]	65,7	82,1	83,7	32,6

4. Podsumowanie

Ze względu na niską szczelność badanego kompozytu – na poziomie 31%, przyrost nasiąkliwości materiału niezabezpieczonego pokostem wyniósł ok. 50%. Największy przyrost zaobserwowano w początkowych okresach badania nasiąkliwości wagowej. Wpływ impregnacji kompozytu pokostem lnianym jest znaczący. Najbardziej efektywna okazała się impregnacja polegająca na wprowadzeniu pokostu do spoiwa w trakcie mieszania (P1). Impregnacja, którą reprezentuje próbka P3 okazała się najmniej skuteczna, bo już po 30 minutach moczenia jej skuteczność zaczęła drastycznie spadać, a nasiąkliwość po 3 godzinach osiągnęła wartość 34% podczas gdy próbka P1 wartość 5,5%, podobnie P2. Jednak skuteczność impregnacji nawet przez 30 minut jest dobrym zabezpieczeniem na wypadek krótkiego kontaktu materiału z wodą. Inaczej jest przy braku zabezpieczenia kompozytu, co skutkowało natychmiastowym wzrostem nasiąkliwości już po 5 minutach moczenia próbki, kiedy to osiągnęła wartość 23% a po długotrwałym okresie kontaktu z wodą (7 dni) niewiele ponad 55%. Zabezpieczenie próbek P1 i P2 nie traciło wyraźnie swej skuteczności w czasie. Próbki nasiąkały, jednak znacznie wolniej w porównaniu z P3. Nasiąkliwość P1 i P2 na końcu badania wyniosła odpowiednio ok. 19 i 26%. Próbki te oddały wilgoć prawie do stanu pierwotnego po 7 dniach suszenia. Można stwierdzić zatem, że tempo wzrostu nasiąkliwości jest porównywalne z tempem oddawania wilgoci. Próbka P0 nie oddała całej wilgoci nabytej w trakcie badania nasiąkliwości, natomiast próbka P3 najtrudniej schła. Powierzchniowa powłoka pokostu utrudniła oddanie wilgoci w sposób znaczący. Po 7 dniach jej wilgotność spadła jedynie o około 33% podczas gdy P2 o ok. 84%.

Podsumowując stwierdzić można, iż zabezpieczenie w postaci naturalnego pokostu lnianego jest sensowne. Docelowym zastosowaniem kompozytu jest wypełnienie szkieletowej konstrukcji ściennej, a więc najczęściej będzie on narażony na wodę opadową, więc na krótkotrwały kontakt z wodą. Najprostsze a zarazem najskuteczniejsze pod względem ochrony jak i migracji pary wodnej jest rozwiązanie zaprezentowane w postaci próbki P1 natomiast najslabszym rozwiązaniem okazała się impregnacja powierzchniowa.

Literatura

- [1] Allin S., *Building with hemp*, Seed Press, 2012.
- [2] Bevan R., Woolley T., *Hemp Lime Construction: A Guide to Building with Hemp Lime Composites*, Bracknell, 2010.
- [3] Fic S., Brzyski P., Szeląg M., *Composite based on foam lime mortar with flax fibers for use in the building industry*, Ecological and Chemistry Engineering. A, nr 7-8/2013.
- [4] Fic S., Brzyski P., Szeląg M., *Ocena ważmożności izpolzowania naturalnych kompozytow z dodatką lnianych wołokon w stroitelstwie*, Bisnik No. 53, str. 393–399, Odessa 2014.
- [5] Fic S., Brzyski P., Szewczak A., Hadam-Jarosz M., *Wybrane właściwości lekkich kompozytów na bazie wypełniaczy celulozowych do zastosowania w budownictwie ekologicznym*, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, JCEEA, Politechnika Rzeszowska (w druku).
- [6] Walker R., Pavia S., *Moisture transfer and thermal properties of hemp–lime concretes*, Construction and Building Materials 64 (2014) 270–276.
- [7] Walker R., Pavia S., Mitchell R., *Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes*. Construction and Building Materials 61 (2014) 340–348.
- [8] Sassoni E., Manzi S., Motori A., Montecchi M., Canti M., *Novel sustainable hemp-based composites for application in thebuilding industry: Physical, thermal and mechanical characterization*. Energy and Buildings 77 (2014) 219–226.
- [9] PN-EN ISO 6946:2008: „Komponenty budowlane i elementy budynku – Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła – Metoda obliczania”.
- [10] www.dom-z-natury.pl.

Influence of linseed oil varnish impregnation on the water absorption of the lightweight composite based on flax straw and lime binder

Stanisław Fic¹, Przemysław Brzyski²

¹ Department of General Building Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: s.fic@pollub.pl

² Department of General Building Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: p.brzyski@pollub.pl

Abstract: At times, which pays special attention to reducing the amount of greenhouse gases in the atmosphere, the construction sector is seeking to reduce energy consumption in the production of building materials during the construction and operation of the building by users. Produced, among others, ecological building materials, as composites based on waste from agricultural production, eg., straw, flax and hemp shives and air or hydraulic lime instead of cement binder. Obtained materials can function as structural and insulation materials. The problem with such composites is their small tightness and the associated high water absorption, which results in deterioration of insulation properties when wet material. One way of reducing water absorption are various methods of impregnation.

The paper presents and analyzes the results of water absorption and evaporation capacity of the composite consisting mainly of straw and flax fiber and modified lime binder, treated linseed oil varnish impregnation treatment in different ways.

Keywords: hydrophobisation, ecological building, organic waste

Ocena możliwości zastosowania elementów płaskich do numerycznego modelowania brył pracujących w płaskich stanach odkształcenia na przykładzie pustaka stropowego TERIVA

Maciej Szela¹

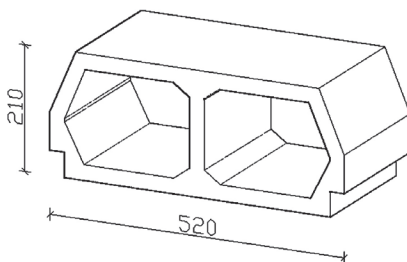
¹ Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, e-mail: maciej.szela@pollub.pl

Streszczenie: Wzrastający stopień złożoności konstrukcji inżynierskich i budowli wymusza na projektantach, konstruktorach i naukowcach stosowanie schematów zastępczych w celu uproszczenia analizy danej konstrukcji. W pracy zaprezentowano wyniki i analizę doświadczeń numerycznych pustaków stropowych TERIVA, z wykorzystaniem programu Autodesk Algor Simulation 2011. Zaproponowano procedurę pozwalającą na stwierdzenie czy dany element przestrzenny można modelować używając do tego struktur płaskich, nie tracąc przy tym na dokładności wyników. W tym celu zostały porównane przemieszczenia, naprężenia i czas wykonywania obliczeń pomiędzy modelami trój- i dwuwymiarowymi.

Słowa kluczowe: TERIVA, analiza numeryczna, płaski stan odkształcenia, Algor

1. Wstęp

Rosnący postęp technologiczny zachęca projektantów i naukowców do korzystania z coraz to nowszego, sukcesywnie udoskonalanego, oprogramowania inżynierskiego wspomagającego analizę numeryczną. Przy modelowaniu konstrukcji szczególnie popularne są środowiska obliczeniowe oparte na metodzie elementów skończonych (MES). Stopień skomplikowania budowy niektórych obiektów inżynierskich wymusza zastosowanie zastępczych modeli obliczeniowych, które tylko w sposób przybliżony odzwierciedlają pracę konstrukcji. Wykonanie modelu dokładnego jest pracochłonne i w znacznym stopniu wydłuża czas przeprowadzania właściwych obliczeń.



Rys. 1. Pustak TERIVA poddany analizie

W artykule przedstawiono i omówiono wyniki badań numerycznych pustaka stropowego TERIVA (Rys. 1), z wykorzystaniem programu Autodesk Algor Simulation Professional 2011. Badania numeryczne z wykorzystaniem tego opro-

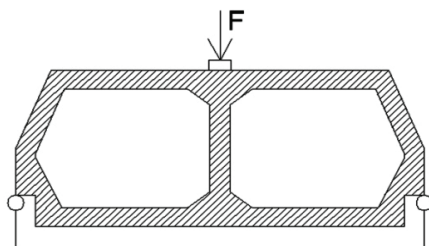
gramowania przeprowadzali w swoich pracach m. in. Pieńko [1] i Robak [2], gdzie analizie poddawali elementy rusztowań budowlanych. Geometryczne parametry pustaka zaczerpnięto z [3]. Celem było sprawdzenie, czy zamodelowanie dwuwymiarowego przekroju pustaka pracującego w płaskim stanie odkształcenia (PSO) pozwala na uzyskanie wyników porównywalnych z pełnym modelem trójwymiarowym w schemacie badania wytrzymałości na zginanie zgodnego z normą PN-EN 15037-2 [4]. Dodatkowo porównano i przeanalizowano czas przeprowadzania obliczeń. Autor we wcześniejszej swojej pracy [5] wykonywał już analizę numeryczną pustaka stropowego TERIVA badając stan przemieszczenia i stan naprężenia elementu stropowego.

Obecna norma dotycząca pustaków stropowych [4] określa, w zależności od tego czy element wypełniający jest niekonstrukcyjny (NR), pół-konstrukcyjny (SR) lub konstrukcyjny (RR), rodzaj badań jakim powinny być poddane. Badania mechaniczne obejmują sprawdzenie wytrzymałości pod pionowym obciążeniem skupionym, wytrzymałości na poziome ściskanie w płaszczyźnie prostopadłej do przekroju poprzecznego (dotyczy pustaków SR i RR) oraz wytrzymałości na zginanie. Zagadnienie badania wytrzymałości pustaków stropowych pod pionowym obciążeniem skupionym omówiono szerzej w artykule [6].

Aby możliwe było rozpatrzenie analizy wyężenia elementu jako konstrukcji dwuwymiarowej pracującej w PSO konieczne jest spełnienie określonych warunków [7]:

- przekrój elementu musi być stały na całej swojej długości,
- wymiar elementu w kierunku podłużnym musi być relatywnie duży,
- siła musi być stała na całej długości elementu,
- siła musi działać na płaszczyźnie prostopadłej do osi podłużnej elementu,
- warunki brzegowe muszą być jednakowe w każdym przekroju elementu
- nie występuje przemieszczenie w kierunku podłużnym elementu.

Pustak stropowy spełnia wszystkie te wymagania w schemacie badania wytrzymałości na zginanie. Normowy schemat badania (Rys. 2) określa aby element był podparty na krawędziach, na całej długości pustaka w celu symulacji podparcia na belkach stropowych. W tym celu zaleca się oparcie pustaka na podkładkach drewnianych bądź stalowych. Obciążenie powinno być przyłożone w sposób liniowy, za pomocą stalowej przekładki o szerokości 20 mm na środku górnej powierzchni pustaka.



Rys. 2. Schemat badania wytrzymałości na zginanie pustaka stropowego wg normy PN-EN 15037-2 [4]

2. Modelowanie pustaka stropowego

Wykonano cztery modele MES:

- trójwymiarowy model dokładny w dalszej części artykułu określany symbolem MD,
- trójwymiarowy model przybliżony oznaczony symbolem MP,
- dwuwymiarowy model zastępczy dokładny MZD,
- dwuwymiarowy model zastępczy przybliżony MZP.

Siatki były tworzone automatycznie z wykorzystaniem generatora siatek wbudowanego w program, gdzie zadawano wymiar przestrzennego elementu skończonego. Podział został wykonany używając elementów ośmiowęzłowych, sześciowęzłowych i czterowęzłowych, w zależności od miejsca występowania oraz styczności z elementem o innym wymiarze siatki. Wygenerowane siatki dla poszczególnych elementów (pustak, podpory i przekładka) posiadają wspólne węzły na powierzchniach styku. Wszystkie składowe modeli MD i MP zostały zamodelowane jako elementy 3-D (Brick) oraz zastosowany został izotropowy model materiału. Natomiast składowe modeli MZD i MZP zostały zamodelowane jako elementy płaskie (2-D) również z zastosowaniem izotropowego modelu materiału. Przy wyborze geometrii elementu płaskiego (Geometry Type) zastosowano PSO (Plane Strain). Dane odnośnie wygenerowanych siatek MES przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Wymiary boków siatki oraz liczba elementów poszczególnych modeli MES

Elementy modelu		Wymiar boków elementów siatki MES [mm]	Liczba elementów
MD	Pustak	4	159342
	Podpory	8	11525
	Przekładka	4	900
MP	Pustak	10 (2,5)	150805
	Podpory	10	1500
	Przekładka	10	48
MZD	Pustak	2	9819
	Podpory	2	1234
	Przekładka	2	55
MZP	Pustak	4	2649
	Podpory	4	336
	Przekładka	4	19

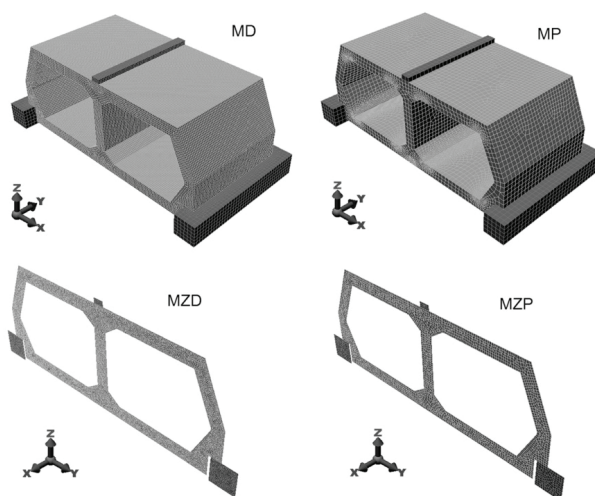
W modelu MP zastosowano zagęszczenie siatki MES w miejscach koncentracji naprężeń, czyli w narożach wewnętrznych pustaka, siatką o boku 2,5 mm. Natomiast modele MD, MZD i MZP posiadają siatkę jednolitą dla każdego z elementów. Powodem braku zagęszczenia siatki MES jest fakt, że badania nie dotyczą rozkładu naprężeń w elemencie, do czego konieczne byłoby zastosowanie siatek wykonanych z większą precyzją. Zgodnie z [8] siatka MES powinna być tak dobrana, aby możliwe było utworzenie co najmniej 4 elementów skończonych

na grubości ścianki pustaka stropowego. Przy zastosowaniu w modelu MP siatki o wymiarze 10 mm warunek ten nie został spełniony, jednakże nie wpłynęło to na wartości parametrów, które ostatecznie były porównywane. Powyższe zalecenie nie zostało również zastosowane do przekładki stalowej ponieważ spełniała ona tylko rolę elementu, przez który obciążenie było przekazywane na pustaka stropowego. Przebieg naprężeń w przekładce nie był rozpatrywany. Widok izometryczny elementów, dla każdego modelu, z podziałem na elementy skończone został pokazany na Rys 3.

Do przeprowadzenia obliczeń założono, że we wszystkich modelach podkładki i podpory zostały wykonane ze stali zwykłej zgodnie z [9]. Natomiast na materiał pustaka przyjęto beton zwykły klasy C12/15 zgodnie z [10]. Dane materiałowe wymagane do przeprowadzenia obliczeń numerycznych zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Charakterystyki materiałowe

Parametr materiału	Stal zwykła	Beton C12/15
Gęstość objętościowa - ρ	7860 kg/m ³	2400 kg/m ³
Moduł Younga – E	210 GPa	27 GPa
Moduł Kirchhoffa – G	80 GPa	11,25 GPa
Współczynnik Poissona - ν	0,3	0,2



Rys. 3. Modele MES pustaka stropowego TERIVA

Warunki brzegowe zostały zdefiniowane na spodniej części podpór, które symulowały krawędzie belek stropowych. Obciążenie zostało przekazane na elementy zgodnie z normowym schematem badania wytrzymałości na zginanie (Rys. 2). W modelach MD i MP środkowa część wierzchniej powierzchni przekładki została obciążona szeregiem sił skupionych przyłożonych w węzłach, na całej długości pustaka. Wartości sił były uzależnione od ilości węzłów na długości

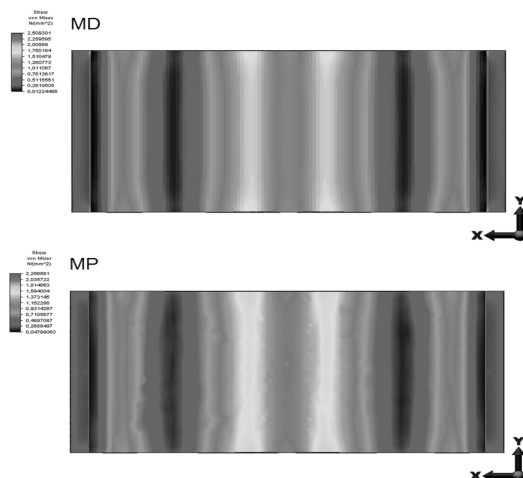
przekładki, jednakże łączna wartość obciążenia wynosiła zawsze 2 kN. Zagadnienie obciążenia inaczej wyglądało w przypadku modeli MZD i MZP gdzie badany jest tylko pewien przekrój pionowy pustaka. Przy założeniu elementu płaskiego (2-D) i charakteru pracy w PSO program przeprowadza obliczenia przy założeniu, że grubość badanego elementu równa się jednej jednostce przyjętej podczas definiowania zadania, czyli 1 mm w rozpatrywanym przypadku. W celu poprawnego zdefiniowania obciążenia, wartość 2 kN została podzielona przez długość pustaka (240 mm) i obliczona siła została przyłożona na środku górnej krawędzi przekładki. Taki zabieg zagwarantował poprawność przeprowadzanych obliczeń.

3. Wyniki i ich analiza

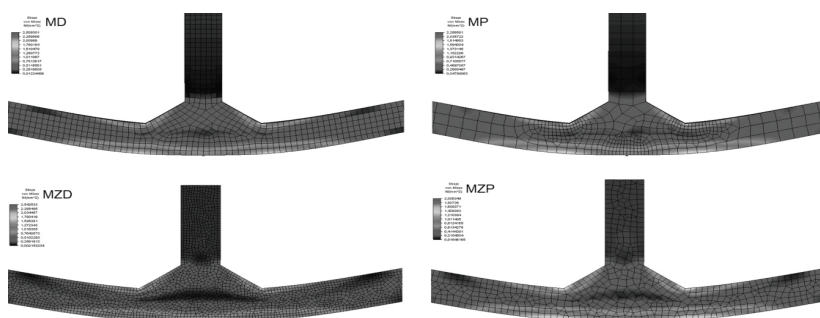
Obliczenia w programie Autodesk Algor Simulation 2011 zostały wykonane z wykorzystaniem analizy statycznej z liniowym modelem materiału (Static Stress with Linear Material Models). Opracowano procedurę sprawdzenia możliwości zastosowania elementów płaskich do modelowania elementów przestrzennych w szczególnych przypadkach obciążenia. Pierwszym krokiem jest sprawdzenie czy rozkład naprężeń na powierzchni elementu trójwymiarowego (MD i MP) jest rzeczywiście jednakowy na całej jego długości przy przyjętym schemacie podparcia i obciążenia. Natomiast w drugim kroku porównuje się wartości ugięcia i naprężenia w punkcie na środku rozpiętości pustaka, na jego dolnej krawędzi. Jeżeli różnice powyższych parametrów między modelami trójwymiarowymi, a płaskimi są pomijalnie małe przyjmuje się, że opracowany model dwuwymiarowy spełnia funkcję modelu zastępczego dla elementu przestrzennego.

Na Rys. 4 przedstawiono rozkład naprężeń na spodniej powierzchni pustaka stropowego dla modeli trójwymiarowych. Zauważono, że zarówno dla MD i MP rozkład naprężeń wzdłuż osi y (oś podłużna pustaka) jest praktycznie jednakowy w każdym przekroju poprzecznym. Drobne różnice w rozkładzie naprężeń między modelami wynikają tylko i wyłącznie z różnic w przyjętej siatce MES, gdzie dokładniejszą siatkę posiada MD. Zgodnie z powyższym stwierdzono, że model pustaka stropowego w analizowanym schemacie statycznym spełnia wymóg jednakowego rozkładu naprężeń na długości elementu.

Kolejnym krokiem było porównanie wartości naprężeń zredukowanych Miśes'a i przemieszczenia wzdłuż osi „ z ” (osi pionowej) dla punktu znajdującego się na dolnej krawędzi przekroju, w środku rozpiętości pustaka stropowego. Powyższe wyniki zestawiono w Tablicy 3, a rozkład naprężeń dla każdego modelu w okolicach rozpatrywanego punktu pokazuje Rys. 5. Rysunek także pokazuje, że im drobniejsza siatka MES tym bardziej prawidłowy jest opis naprężeń w przekroju elementu. W celu porównania otrzymanych wartości, wyniki zestawiono także w ujęciu procentowym, gdzie podano różnicę w odniesieniu do wartości z MD.



Rys. 4. Rozkład naprężeń na dolnej powierzchni pustaka stropowego



Rys. 5. Rozkład naprężeń na powierzchni pustaka w środku jego rozpiętości

Tabela 3. Wartości przemieszczenia wzdłuż osi „z” oraz naprężenia dla każdego z modeli

Model	Przemieszczenie [mm]	Przemieszczenie [%]	Naprężenie [N/mm ²]	Naprężenie [%]
MD	-0,04344	0	0,98857	0
MP	-0,04232	2,58	0,96587	2,30
MZD	-0,04261	1,91	0,98596	0,26
MZP	-0,04226	2,72	0,96573	2,31

Uzyskane wyniki pozwalają na podział modeli na dwie grupy. Jedną grupę stanowią modele dokładne (MD i MZD), gdzie różnica przemieszczeń wynosi niecałe 2 %, a wartości naprężeń są do siebie bardzo zbliżone. Natomiast drugą grupę stanowią modele przybliżone (MP i MZP) gdzie zarówno wartości przemieszczeń jak i naprężeń praktycznie pokrywają się ze sobą. Drobna różnica pomiędzy modelami dokładnymi, a przybliżonymi wynika z różnic w konstrukcji siatki MES. Za bardziej wiarygodne należy uznać wartości z modeli dokładnych gdyż dokładniejsza

dyskretyzacja elementu pozwala na uzyskanie bardziej precyzyjnych wyników. Na podstawie powyższych rezultatów stwierdzono, że w rozpatrywanym przypadku obciążenia, modele dwuwymiarowe można z powodzeniem stosować do numerycznego modelowania przekroji elementów przestrzennych pracujących w płaskim stanie odkształcenia.

Analizując czas przeprowadzania obliczeń (każdy model był liczony z wykorzystaniem jednakowej konfiguracji sprzętowej), gdzie wyniki zestawione są w Tabeli 4, nie posłużono się jednostką czasu, a odniesieniem procentowym do najdłużej trwającego procesu obliczeniowego, którym wykazał się MD. Sytuacja taka wynika z faktu, że na każdym komputerze czas ten, nawet dla tego samego modelu, będzie się różnił. Wpływ na to ma szereg parametrów takich jak: taktowanie procesora, liczba rdzeni, ilość dostępnej pamięci fizycznej itp. Z powyższych powodów dane te należy traktować wyłącznie jako orientacyjne i dające ogólny pogląd na stosunek czasu trwania obliczeń modeli dwuwymiarowych do trójwymiarowych.

Tabela 4. Czas trwania procesu obliczeniowego dla poszczególnych modeli

Model	Czas trwania obliczeń [%]
MD	100
MP	59,10
MZD	2,56
MZP	0,83

Obliczenia MD pochłonęły najwięcej czasu, gdyż model składał się z drobnej siatki i w porównaniu do pozostałych modeli posiadał najwięcej elementów skończonych. Jednak najważniejsza jest tutaj różnica wynikająca z zastosowania modeli dwuwymiarowych. Stosując model przybliżony uzyskano około 120-krotnie krótszy czas przeprowadzania obliczeń, jednak zastosowana siatka nie pozwala na uzyskanie w pełni prawidłowego rozkładu naprężeń. Natomiast czas przeprowadzania obliczeń przy modelu dokładnym był około 40-krotnie krótszy w porównaniu do modelu MD. Taki stan rzeczy pozwala zauważyć jak duża jest korzyść, na polu czasochłonności procesu obliczeniowego, z stosowania modeli płaskich do numerycznego modelowania konstrukcji przestrzennych w określonych przypadkach pracy elementu.

4. Podsumowanie

W szczególnych przypadkach pracy konstrukcji przestrzennej, która spełnia określone warunki dla PSO możliwe jest zastosowanie modelowania dwuwymiarowego do wspomagania obliczeń. Zastosowanie modeli płaskich pozwala na większy stopień dyskretyzacji elementu, co bezpośrednio przekłada się korzystnie na dokładność otrzymywanych wyników. Nie bez znaczenia są także korzyści płynące ze skrócenia czasu trwania procesu obliczeniowego. Modele dwuwymiarowe powinny być stosowane, zawsze kiedy jest to możliwe, w celu uproszczenia obliczeń i samego procesu modelowania.

Literatura

- Pieńko M., *Badania numeryczne nośności węzłów w modułowym systemie rusztowań budowlanych*. Budownictwo i Architektura 8 (2011) 47–65.
- Robak A., *Numeryczne badanie wytrzymałości pomostów umieszczanych na rusztowaniach*. Budownictwo i Architektura 8 (2011) 67–81.
- Jarmontowicz R., Sieczkowski J., *Stropy Teriva, projektowanie i wykonywanie*. Przedsiębiorstwo Projektowo – Produkcyjno – Usługowe Inwenta Spółka z o.o., Warszawa, 2004.
- PN-EN 15037-2+A1:2011 *Prefabrykaty z betonu. Belkowo-pustakowe systemy stropowe. Pustaki betonowe*.
- Szeląg M., *Analiza numeryczna stanu naprężenia i stanu przemieszczenia pustaków stropowych Teriva w schemacie badania wytrzymałości na zginanie wg normy PN-EN 15037-2:2011*. Przegląd Budowlany 11 (2013) 20-25.
- Fedorczyk Z., *Badania i ocena stropów gęstożebrowych wg PN-EN 15037-1 oraz PN-EN 15037-2*. Materiały Budowlane 5 (2011) 22–24.
- Rusiński E., Czmochoński J., Smolnicki T., *Zaawansowana metoda elementów skończonych w konstrukcjach nośnych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2000.
- Podgórski J., Błazik-Borowa E., *Wprowadzenie do metody elementów skończonych w statyce konstrukcji inżynierskich*. IZT Sp. z o.o., Lublin, 2011.
- PN-EN 1993-1-1 *Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków*.
- PN-EN 1992-1-1 *Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*.

The possibility of using two – dimensional elements to the numerical modeling of solid elements working in plane strain states on the example of TERIVA ceiling brick

Maciej Szeląg¹

¹ *Department of General Construction, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: maciej.szela@pollub.pl*

Abstract: The increasingly growing complexity of engineering structures forces the designers and the scientists searching for alternative calculation methods in order to simplify the analysis of the structure. This paper presents the results and analysis of numerical research of TERIVA ceiling brick, using Autodesk Algor Simulation 2011. It was developed a procedure allowing to check whether spatial element can be modeled as a flat structure maintaining the accuracy of the obtained results. For this purpose the displacement, stress and the duration of the computational process between two – dimensional and three – dimensional models was compared.

Keywords: TERIVA, numerical analysis, plane strain state, Algor

Badania wpływu dodatków na właściwości materiałów na bazie cementu Sorela

Anna Tatarczak¹, Jarosław Brzozowski², Justyna Jaroszyńska-Wolińska³

¹Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: a.tatarczak@pollub.pl

²Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: j.brzozowski.ikr@gmail.com

³Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: j.wolinska@gmail.com

Streszczenie: Przedmiotem pracy są badania wpływu dodatków na właściwości fizykomechaniczne materiałów na bazie cementu Sorela. Dąży się do poprawy trwałości stwardniałych materiałów. Analizowano mieszanki cementowe z dodatkami m.in. mikrokrzemionki, a także zbrojenia rozproszonego w postaci włókien polipropylenowych. Wymienione kierunki działań szerzej omówiono i przedstawiono charakterystyczne wyniki dotyczące wpływu tych dodatków na właściwości materiałów. Analizy dokonano na podstawie badań wytrzymałościowych na ściskanie i rozciąganie przy zginaniu, korozyjności i wodoszczelności modyfikowanych materiałów. Dodatek mikrokrzemionki korzystnie wpływa na parametry materiału. Zwiększa wytrzymałość oraz zmniejsza nasiąkliwość.

Słowa kluczowe: Cement Sorela, włókna polipropylenowe, właściwości fizyko-mechaniczne, mikrokrzemionka

1. Wprowadzenie

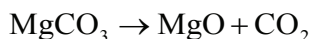
Ogromny postęp cywilizacyjny i towarzyszący mu szeroki rozwój przemysłowy sprzyja wprowadzaniu nowych rozwiązań dotyczących stosowania coraz to innych materiałów dodawanych do betonów w celu poprawienia ich właściwości. Podporządkowując się współczesnym wymaganiom europejskim wzrasta wykorzystanie odpadów przemysłowych w celu zmniejszenia zanieczyszczenia środowiska naturalnego. Perspektywa ich wykorzystywania ma coraz większe uzasadnienie i w tym celu w ostatnich latach prowadzone są szeroko zakrojone prace naukowo-badawcze. Dodatki do materiałów wpływają na ich właściwości wytrzymałościowe, wspomagając tym samym utylizację odpadów dotąd niewykorzystywanych.

Materiały na bazie cementu Sorela wraz z nowymi domieszkami stały się ponownie tematem wielu zaawansowanych prac badawczych. Dodatek włókien polipropylenowych do cementu Sorela wpływa znacznie na redukcję rys skurczowych i mikropęknięć [1]. Użycie dodatków jest prostym sposobem na minimalizację absorpcji wody oraz przepuszczalności cementu Sorela. Dodatki wpływają również na ograniczenie penetracji wyrobów przez związki chemiczne powodujące jego korozję. Prowadzi to do wielu korzyści z zastosowania cementu Sorela. Materiały z tej grupy posiadają wysoką odporność na ścieranie, ściskanie

i rozciąganie przy zginaniu a z dodatkami wykazują większą odporność na działanie wody. Wyroby charakteryzują się dobrymi właściwościami akustycznymi oraz mają znacznie większą wytrzymałość na ściskanie oraz posiadają wyższe parametry sprężystości [2]. Materiały takie są odporne na smary i oleje oraz wykazują dość dobrą odporność na działanie soli drogowej, siarczanów, zasad i rozpuszczalników organicznych.

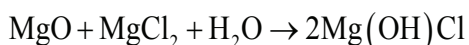
Intensywne badania służą poprawie trwałości wyrobów z użyciem cementu Sorela poprzez zmianę jego mikrostruktury. Dąży się w tych działaniach do związania jonów magnezowych w związki oksychlorkowe, występujące w stwardniałym zaczynie cementowym oraz do lepszego upakowania poprzez wprowadzoną dodatkowo do mieszanki np. mikrokrzemionkę. Inny kierunek działań dotyczy także zmiany cech mechanicznych spoiwa w wyniku wprowadzenia tzw. zbrojenia rozproszanego, występującego w postaci włókien najczęściej stalowych, ale także i z innych materiałów takich jak np. polipropylen.

W 1867 roku Stanisław Sorel ogłosił opracowanie cementu oksychlorkowo-magnezowego nazywanego powszechnie cementem Sorela – zgodnie z jego imieniem. Cement ten przygotowuje się in situ poddając reakcji MgO (tlenek magnezu) z uwodnionym MgCl_2 (chlorkiem magnezu), zwykle w zakresie 20-30%. Tlenek MgO jest otrzymywany w wyniku rozkładu węglanu magnezu tak, aby otrzymać lekko wypalony, reaktywny tlenek:



Otrzymany w taki sposób tlenek magnezu mieli i miesza się z roztworem chloru magnezu zawierającym, co najmniej 20% MgCl_2 w wodzie. Wraz z wydzielaniem ciepła mieszanina reaguje tworząc stwardniały produkt zwany oksychlorkiem magnezu, zawierający uwodniony chlorek i wodorotlenek magnezowy, któremu początkowo przypisywano prosty wzór Mg(OH)Cl .

Powstaje on w wyniku reakcji:



Dojrzałe cementy są złożone z cząstek wodorotlenku magnezu, fazy heksagonalnej o zmiennych rozmiarach, z której wyrasta duża ilość drobnych i igiełkowatych kryształów oksychlorku łączących razem materiał. Produkt jest twardy i posiada dobrą wytrzymałość, niestety nie jest odporny na długotrwałe, niszczące działanie wody.

Cementy Sorela były długo stosowane do wykonywania podłóg, jako cementy specjalnego rodzaju, co było ich głównym zastosowaniem oraz jako materiał wiążący płyty drewniano-węlniane. Powierzchnie cementowe przed wodą zabezpieczano poprzez polerowanie woskiem z terpentyną.

W ostatnich latach wzrasta zainteresowanie wykorzystaniem odpadów przemysłowych w celu zmniejszenia zanieczyszczenia środowiska naturalnego, zatem modyfikowanie cementu Sorela stało się nowym polem badawczym. Perspektywa wykorzystywania odpadów i zanieczyszczeń ma coraz większe uzasadnienie w produkcji nowych materiałów budowlanych.

Czynnikami wpływającymi na właściwości i jakość zapraw budowlanych oprócz surowców podstawowych takich jak cement, gips czy kruszywa są dodatki modyfikujące. Stosowane powszechnie w różnego rodzaju wyrobach budowlanych w celu poprawy ich właściwości technologicznych oraz zapewnienia możliwości zastosowania w różnych warunkach. Powszechnymi dodatkami są upłynniacze, uszczelniacze, środki napowietrzające, hydrofobizujące lub przeciw spieniające. Wpływ różnych domieszek, np. proszków redyspersgowalnych (ester etenylu kwasu octowego) czy innych związków organicznych złożonych z polimerów na właściwości uzyskiwanych zapraw cementowych był przedmiotem wielu badań.

2. Rozwój cementów Sorela

Jako specjalne spoiwo, szczególnie do posadzek przemysłowych z różnymi kruszywami i wypełniaczami cement Sorela znalazł zastosowanie pod koniec XIX wieku w Niemczech, Francji i innych krajach europejskich. Czasem jednak wynikały problemy z tym cementem z następujących powodów:

- optymalne stężenie roztworu MgCl_2 (chlorku magnezu),
- jakość stosowanego chlorku magnezu,
- jakość surowców magnezytowych, które powinny być poddane lekkiej kalcynacji (termiczny rozkład ciał stałych z wydzieleniem składników lotnych, w tym dwutlenku węgla), nieaktywne MgO (przepalone);
- mała odporność na wpływ warunków atmosferycznych,
- wydzielanie roztworów korozyjnych w odniesieniu do zbrojenia, co może powodować osłabienie konstrukcji lub jej zniszczenie.

Początkowe prace w XX wieku wykazały, że utworzenie się żelu (wiązanie) łączy się z hydratacją cementu Sorela, po którym następuje twardnienie. Jednak ogólny skład chemiczny był niepewny, praca Robinsona i Waggamana [3]. Dowiadujemy się, że w badaniach obejmujących analizy chemiczne nasyconych roztworów maksymalna rozpuszczalność tlenku magnezu w roztworach MgCl_2 to niespełna 0,003% masy wagowej. Zawartość wodorotlenku magnezu ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) w roztworze wodnym chlorku magnezu wynosi 34,22% masy wagowej.

Znaleziono fazę $2\text{MgO} \cdot \text{HCl} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (później określoną, jako $3\text{MgO} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$), która tworzyła igiełkowate kształty i $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ w warunkach równowagowych. W późniejszym czasie podobne wyniki podali Bury i Davies, którzy stwierdzili obecność $3\text{MgO} \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ (faza 3: 1: 11), $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ i $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Według nich „rozpuszczalność MgO w roztworach MgCl_2 była tak mała, że praktycznie niemierzalna”.

W latach 1937–1958 Walter-Lèvy i deWolff [4] opublikowali dokładniej powstałe fazy krystaliczne, jako $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (faza 5: 1: 8) i $3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (faza 3: 1: 8), oraz utworzona oksychlorowęgłanowa faza $\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 2\text{MgCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ w wyniku reakcji z atmosferycznym CO_2 . Ta ostatnia ma rolę ochronną dla oksychlorokowo cementu magnezu i w porównaniu do poprzednio omawianych hydratów jest znacznie mniej rozpuszczalna w wodzie.

Porównując fazy Bury'ego i Daviesa (3: 1: 11), która zawiera słabo związaną wodę oraz Waltera-Lèvy i deWolffa (3: 1: 8) są one podobne do siebie, gdyż mają porównywalną strukturę. Obie te formy nie są wcale różnymi fazami utworzonych w trakcie hydratacji w ogólnym zbiorze różnych hydratów. Obie z tych faz są quasi-zeolitowymi zamiennikami, których dodatkowa woda związana fazy 3: 1: 11 może zostać przyłączona do struktury lub może ją łatwo opuścić.

W roku 1950 w trakcie szczegółowych badań cementu Sorela Demediuk [5] ustalił zakres temperatur, powyżej których trwale są różne fazy w przypadku małej zawartości MgO. W fazie 3: 1: 8 wymagana jest wyższa koncentracja MgCl_2 w roztworze niż w fazie 5: 1: 8. Mogą one ulegać powolnej karbonatyzacji, która daje zasadowy węglan magnezu o mniejszej rozpuszczalności, co powoduje większą trwałość niż hydraty oksychlorkowe. W temperaturze ponad 100°C autorzy eksperymentów stwierdzili powstawanie różnych hydratów. Uzyskali oni oksychlorkowe wapniowe cementy podobne do cementów Sorela ale z ograniczonym zastosowaniem architektonicznym. Z tego też względu badania własności i struktury nie były prowadzone.

Szersze eksperymenty chemiczne były przeprowadzone na Uniwersytecie Misso-
uri-Rolla w USA. Sorel wraz ze współpracownikami gruntownie badali reakcje i warunki równowagi cementów magnezowych. Wyniki tych doświadczeń poszerzyły wiedzę na temat podstawowych właściwości cementów Sorela. Określono równowagę fazową i reakcje układu $\text{MgO} - \text{MgCl}_2 - \text{H}_2\text{O}$ za pomocą rentgenografii. Wykazano w ten sposób równowagowe fazy w temperaturze 25°C (faza – 3 i faza – 5).

W roztworze MgCl_2 reaktywne MgO zostaje rozpuszczone, a przemianie ulega tirkotropowa zawiesina w żel, który później krystalizuje i tworzą się trójskładnikowe fazy oksychlorów. W wyniku odparowania wody ogólny skład może ulec przesunięciu gdyż mało aktywne MgO wolniej rozpuszcza się w układzie otwartym. Wpływ na warunki atmosferyczne zależą od utworzenia hydratu węglanu magnezu $\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{MgCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, który powstaje w wyniku reakcji z atmosferycznym CO_2 . Przed szybkim zniszczeniem materiał ochrania warstwa węglanu na powierzchni. Przemiana cementu w uwodniony magnezyt $5\text{MgO} \cdot 4\text{CO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ i bardzo wolne wymywanie chlorku decyduje o dłuższym okresie trwałości cementu.

Badania układu $\text{MgO} - \text{MgCl}_2 - \text{H}_2\text{O}$ przez pomiar rozpuszczalności MgO w roztworze HCl były przeprowadzane w temperaturze 23°C . Przeprowadzono badania rentgenowskie, oznaczano kwasowość nasyconych roztworów MgO i ciężary właściwe oraz zawartość pary wodnej w atmosferze gazowej nad szczelnie zamkniętymi próbkami. Skutkowało to wyznaczeniem składu równowagowego dla dwóch faz krystalicznych. Stwierdzono, że faza – 5 krystalizuje szybciej niż faza – 3, natomiast z atmosferycznym CO_2 szybciej reagują cementy o składzie bliskim do fazy – 3 tworząc fazę chloro-węglanu magnezowego. Z tego względu, że MgCl_2 jak i HCl mają ograniczoną rozpuszczalność w wodzie w temperaturze pokojowej niemożliwym było ustalenie równowagi całego układu jak i (przy wykorzystaniu stosowanych metod) prawdopodobnej obecności kwaśnych soli.

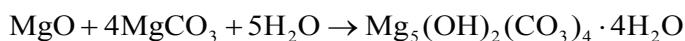
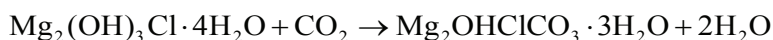
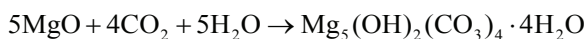
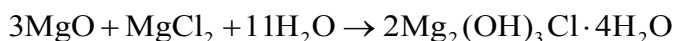
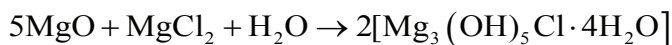
Matkovic i Young [6] w swoich pracach wskazali wzrost sztywności i tężenie poprzez szybki wzrost kryształów oksychlorku magnezu w przestrzeni pomiędzy ziarna-

mi MgO. Wzrost wytrzymałości spowodowany jest tym, że w razie braku przestrzeni do swobodnego wzrostu kryształy tworzą gęstszą strukturę. Powstanie mikrostruktury o minimalnej porowatości zależy od powstawania produktów reakcji, które mają właściwości dobrego wypełniania przestrzeni, przez co następuje wzrost wytrzymałości.

Rozwój wytrzymałości spoiw magnezowych jest uzależniony od aktywności MgO, który ma wpływ na szybkość reakcji i zależy od temperatury kalcynacji [7]. W zależności od tego czy surowcami są eksploatowane skały magnezowe czy zasadowy węgiel magnezu wpływają one na warunki dekarbonizacji i co za tym idzie na aktywność MgO w sposób zróżnicowany. Dla każdej partii surowców pochodzących z innego źródła jest wskazane przygotowanie próbek mieszanek cementu Sorela o określonym składzie ($\text{MgO}:\text{MgCl}_2:\text{H}_2\text{O}$) i zbadanie ich pod kątem szybkości reakcji.

Badania porowatości w porównaniu do wytrzymałości (mikrotwardość) dla pięciu różnych cementów przeprowadzili Ramachandran [8] i jego współpracownicy. Wykazali oni, że najniższą wytrzymałość uzyskał oksysiarczanowy cement magnezowy, cement portlandzki uplasował się na drugiej pozycji, a najsilniejszą strukturę spoiwa otrzymali przy użyciu cementu Sorela.

Najlepszym scharakteryzowaniem cementu Sorela jest podanie wzorów strukturalnych głównych tworzących się faz $\text{Mg}_2(\text{OH})_3\text{Cl} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (faza 3) oraz $\text{Mg}_3(\text{OH})_5\text{Cl} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (faza 5), fazy węglanowe $\text{Mg}_2\text{OHClCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (oksywęglan, faza A) i $\text{Mg}_5(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (oksywęglan, faza B):



Reakcje, które zachodzą w czasie twardnienia cementu Sorela nakładają się na siebie, co w praktyce oznacza, że przebiegają równocześnie. W porównaniu do siebie fazy 5 i 3 ta pierwsza krystalizuje szybciej, natomiast cement o składzie podobnym do fazy 3 szybciej reaguje z atmosferycznym CO_2 i tworzy hydrat hydroksychlorowęglanu (faza A, oksykarbonat) co ze względu na jego mniejszą rozpuszczalność wpływa na jego trwałość w długim okresie. Efektem tego jest utworzenie się gęstej masy produktów hydratacji, która składa się głównie z fazy 5 (przy niewielkim udziale fazy 3 i faz węglanowych z heksagonalną formą $\text{Mg}(\text{OH})_2$ i resztkowym $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Najlepszą wytrzymałość osiągają stwardniałe cementy, gdy głównym produktem końcowym jest faza 5.

Czas wiązania zaczynu cementu magnezowego został wraz z fazami krystalicznymi skorelowany za pomocą badań rentgenograficznych. Następstwem tego było wysunięcie twierdzenia, że występują tu cztery etapy:

- rozpuszczanie się tlenku magnezu (MgO) w roztworze chlorku magnezu (MgCl_2);
- zarodkowanie hydratów;
- bardzo szybkie strącanie hydratów;
- powolne przejście do stanu równowagi.

W 1986 roku Sorrentino, Kurdov i Georgevsk [9] w wyniku swoich badań stwierdzili, że w temperaturze 25°C występują cztery hydraty:

- faza 5,
- faza 3,
- $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (brucyt),
- $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (biszowit)

Badania nad szybkością hydratacji, ustalenie diagramów równowag fazowych jak i zrozumienie etapów reakcji dają wyraźny obraz tego, że ze względu na dużą rozpuszczalność hydratów w cemencie Sorela nie może być on zastosowany w konstrukcjach narażonych na działanie warunków atmosferycznych. Stwierdzono, że zastosowanie cementu magnezowego powinno obejmować jedynie wnętrza budynków.

Pod koniec XX wieku Zhang i Deng [10] przeprowadzili badania nad cementem Sorela w związku z odpornością na wodę i mechanizmem powstawania uwodnionych faz. Powstał wtedy pomysł wprowadzenia dodatków do zaczynu cementowego w celu poprawienia odporności na wodę. Problemem była zbyt mała ilość jonów fosforanowych (mniej niż 1% zaczynu cementu Sorela) rozpuszczalnych w roztworze, które mogłyby poprawić odporność na wodę. Zbyt mała ilość jest niewystarczająca do utworzenia się nierozpuszczalnej warstwy fosforanów, która zabezpieczyłaby wszystkie ziarna w cemencie fazy 5.

Poprawę odporności cementu na wodę poprzez zwiększenie trwałości może powodować dodatek rozpuszczalnych fosforanów lub też kwasu ortofosforowego H_3PO_4 . Wiąże się to nie tylko ze stężeniem jonów OH^- ale i stężeniem jonów Mg^{2+} . Dla utworzenia i trwałego występowania głównych faz cementu magnezowego wymagane jest zmniejszenie stężenia jonów Mg^{2+} poprzez dodatek fosforanu, który wpływa na powstawanie wielocząsteczkowych kompleksów. Wynikami tych badań dla oceny zwiększonej trwałości cementu Sorela była możliwość wprowadzenia współczynnika zachowania wytrzymałości.

Deng [11] wraz z początkiem XXI wieku rozważał jak poprawić odporność na wodę cementu Sorela poprzez dodanie rozpuszczalnych fosforanów. Wraz ze wzrostem udziału masowego fosforanów wzrastał współczynnik zachowania wytrzymałości stwardniałego zaczynu cementu magnezowego. Do spełnienia wymagań większości zastosowań inżynierskich udział masowy fosforanów musiał oscylować na poziomie 0,5–1% w stosunku do zaczynu cementu Sorela w celu zwiększenia współczynnika zachowania wytrzymałości.

Ze względu na to, że fazy główne tj. faza 5 i 3 są nietrwałe w wodzie skład fazowy zaczynu ulega w niej całkowitej zmianie. Aczkolwiek dodatek do zaczy-

nu cementu Sorela w postaci rozpuszczalnych fosforów (aniony fosforanowe) zwiększając trwałość głównych faz w wodzie, co zapobiega zmianie składu fazowego, czego rezultatem jest zwiększenie współczynnika zachowania wytrzymałości zaczynów stwardniałych cementu magnezowego. Aniony fosforanowe zmniejszają koncentrację jonów Mg^{2+} w roztworze, które są nieodzownym warunkiem do trwałego występowania głównych faz. Mniejsze stężenie Mg^{2+} sprzyja twardnieniu głównych faz i w wodzie zaczyn cementu Sorela pozostaje bez zmian.

2.1 Zastosowanie materiałów na bazie cementu Sorela

Zalety materiałów otrzymywanych z wykorzystywania cementów Sorela są rozległe:

- Zastosowanie cementów, jako podłogi przemysłowe jak i podłogi bezspoinowe wykorzystywane w budownictwie od ponad 100 lat.
- Rozszerzony zakres zastosowania z uwagi na modyfikację poprzez dodawanie kruszywa, wypełniaczy i pigmentów (np. wiązanie płyt drzewno - wełnianych).
- Mają zastosowanie przy łączeniu ze sobą metalu i szkła.
- Stwardniałe cementy Sorela za pomocą skarbonatyzowania wykazują dobrą odporność na wodę.
- Przy właściwych zastosowaniach zapewniona jest duża wytrzymałość na ściskanie i zginanie. Dużą wytrzymałość początkową osiągają dzięki szybkiemu wiązaniu i twardnieniu jak również w późniejszym okresie.
- pełnią rolę tynków wewnętrznych.
- W razie chwilowej naprawy korzystna jest dobra rozpuszczalność w kwasie.
- Stosuje się go ze specjalnymi domieszkami opóźniającymi jak i przyspieszającymi wiązanie.
- Prawidłowe wiązanie i twardnienie w słonej wodzie.
- Można dodawać do niego większość pigmentów.
- Zastosowanie dekoracyjnego cementu Sorela zapewnia walory artystyczne.
- Większa wytrzymałość na ściskanie, mikrotwardość i moduł sprężystości. Posiadają dobrą odporność na ścieranie.
- Są odporne na działanie wszelkich olejów, farb i tłuszczów.
- Przydatne do renowacji budynków zabytkowych jak i do wszelkich napraw wewnętrznych.
- Stanowią sprężysty materiał.
- Charakteryzują się dobrą odpornością ogniową.
- Są dosyć odporne na działanie popularnych soli, siarczanów, zasad i rozpuszczalników organicznych.
- Popularne zastosowanie do sztucznych marmurów jak i sztucznych materiałów kamiennych.
- Szczególnie cementy wiertnicze z kruszywem glinowym i krzemionkowym mają ogniotrwałość aż do 850°C.
- Produkcja kul bilardowych i sztucznych kości słoniowych.

- Bardzo atrakcyjne dekoracyjne zewnętrzne stiuki z kruszywem kamiennym, z dobrym zabezpieczeniem przed wodą.
- Ochrona środowiska poprzez tworzywo do immobilizacji metali ciężkich w popiołach ze spalarni odpadów.

W celu uniknięcia złych zastosowań cementu Sorela w budownictwie należy brać pod uwagę szereg niekorzystnych właściwości oraz wad wpływających z wykorzystywania cementów Sorela:

- W dłuższym okresie czasu w celu zapewnienia odpowiedniej trwałości wymaga ją ochrony przed wodą, gdyż wykazują one znaczną rozpuszczalność w wodzie.
- Z powodu braku dostatecznej odporności na wodę problematyczne jest wykonywanie tynków zewnętrznych ścian.
- Stwardniały materiał wykazuje skłonność do zmiany wymiarów.
- W kontakcie z elementami konstrukcji zbrojonej jak i z samym zbrojeniem stalowym może zachodzić zjawisko hydrolizy, która powoduje uwalnianie się rozтворów korozyjnych (HCl), co w następstwie może powodować zniszczenie.
- Stwardniały „Sorel” może wykazywać kruchość.
- Bez zabezpieczenia posiada złą odporność na wpływy atmosferyczne.
- Nie może być wykorzystywany do konstrukcji zbiorników na odpady toksyczne, które zawierają metale ciężkie.
- Ma małą odporność na zamrażanie.

Wzrost wykorzystania odpadów przemysłowych w celu zmniejszenia zanieczyszczenia środowiska naturalnego ma obecnie gigantyczne uzasadnienie w prowadzonych pracach badawczych nad cementem Sorela.

3. Dodatki wykorzystane w badaniach

3.1. Włókna polipropylenowe

Cięte włókna [11] wykonane z czystego polipropylenu, obojętnego chemicznie, o właściwościach hydrofilowych gwarantują ich łatwą zwilżalność w kontakcie z wodą w mieszance betonowej. Dodanie włókien polipropylenowych do mieszanek betonowych powoduje: redukcję rys skurczowych i mikropęknięć na skutek osiadania plastycznego; eliminację konieczności stosowania przeciwskurczowych siatek stalowych; zmniejszenie nasiąkliwości i wodoprzepuszczalności; ograniczenie penetracji betonu przez substancje chemiczne; ograniczenie korozji betonu oraz stali zbrojeniowej; zwiększenie mrozoodporności; zwiększenie odporności na ścieranie, ściskanie oraz rozciąganie przy zginaniu o ponad 10%; zwiększenie uderzalności i odporności na rozkruszanie; poprawę spójności i jednorodności betonu; zwiększenie urabialności oraz odporności na segregację składników; zwiększenie trwałości wyrobów betonowych i żelbetowych.

Włókna tworzą w mieszance betonowej przestrzenną siatkę, która pełni rolę mikrozbrojenia eliminując konieczność stosowania przeciwskurczowych siatek stalowych. Eliminacja rys skurczowych w obrębie betonu poprawia jego szczelność i ogranicza przesiąkliwość, chroniąc zbrojenie konstrukcyjne żelbetu przed korozją,

zapobiega też starzeniu się betonu, zwiększa mrozoodporność bez konieczności „dopowietrzania” masy betonowej, a co za tym idzie, nie postępuje proces łuszczenia się powierzchni betonu podczas eksploatacji.

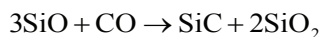
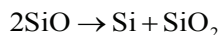
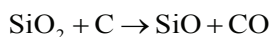
Dodanie do betonu włókien polipropylenowych poprawia jego homogeniczność. Rozprowadzone równomiernie w masie betonowej włókna nie absorbują wody zarobowej, lecz zatrzymują ją w całej objętości mieszanki ograniczając grawitacyjne opadanie cięższych składników i nadmierne wypływanie wody w postaci mleczka cementowego na powierzchni elementu betonowego. Ta właściwość włókien wpływa na zwiększenie wytrzymałości powierzchni przy bardzo wysokiej temperaturze otoczenia. Nie trzeba specjalnej pielęgnacji, aby zapobiec pękaniu skurczowemu powierzchni betonu na skutek nadmiernego parowania wody, powierzchnia betonowej płyty pozostaje wilgotna przez długi czas momentu zabetonowania. Włókna polipropylenowe rozprowadzone równomiernie w całej masie betonu ograniczają segregację jego składników i nie dopuszczają do powstawania „pustek” powietrznych. Beton z dodatkiem włókien jest bardziej odporny na ścieranie. Zwiększa się także o 10% wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu oraz o 14% wytrzymałość na ściskanie. Włókna nadają betonowi zdolność do samo podtrzymywania i nierozpadania się przy pęknięciu, dlatego można je wykorzystywać w prefabrykacji (umożliwiają wcześniejsze rozformowywanie prefabrykatów i zwiększają ich odporność na uszkodzenia podczas transportu - np. obłamywanie krawędzi czy naroży). Działanie stabilizujące włókien polipropylenowych powoduje, że są wykorzystywane przy naprawie konstrukcji żelbetowych, np. do torkretowania.

Włókna można dodawać do mieszanki betonowej przed lub w trakcie mieszania, jednak najlepszy efekt uzyskuje się dodając włókna polipropylenowe w czasie dozowania składników mieszanki betonowej, po wsypaniu kruszywa a przed dodaniem cementu. Mieszanie betonu z dodatkiem włókien przez 5 minut z prędkością 12 obr./min. gwarantuje dokładne ich rozprowadzenie. Włókna polipropylenowe można dodawać również do gotowej mieszanki betonowej w mieszarce samochodowej. Beton powinien być mieszany, przez co najmniej 5 minut. Zalecana ilość włókien na 1 m³ mieszanki betonowej wynosi 0,6–0,9 kg. Nie pociąga to za sobą konieczności zmiany proporcji pozostałych składników. Beton z dodatkiem włókien polipropylenowych nie wymaga żadnych dodatkowych zabiegów pielęgnacyjnych, poza rutynowymi wymaganymi przez Polską Normę, a powierzchnia elementów betonowych może być wyrównywana i zacierana typowymi narzędziami przeznaczonymi do tego celu.

3.2. Mikrokrzemionka

Pyły krzemionkowe (mikrokrzemionka) [13] są odpadem przemysłu hutniczego, który powstaje przy produkcji krzemu metalicznego, żelazokrzemu i innych stopów krzemowych w efekcie redukcji kwarcu o wysokiej czystości przez węgiel w piecach łukowo-oporowych o działaniu ciągłym. Elementy częściowo tylko zredukowanego kwarcu wyparowują, jako SiO i są ponownie utleniane do SiO₂ w wyniku kontaktu z tlenem w chłodniejszej części pieca. Tak oto powstaje amorficzna forma tlenku krzemu – skondensowana w postaci mikroskopijnych okrągłych drobin o wymiarach ziarna ok. 0,1 μm.

Powstawanie pyłów krzemionkowych można ująć za pomocą następujących reakcji:



Ilość SiO_2 w pyłach wzrasta proporcjonalnie do wzrostu krzemu w stopie i tak np. dla stopu żelazokrzemowego zawierającego 50%, czy 75% krzemu – mamy odpowiednio 61÷77%, lub 84÷88% krzemionki w pyłach, a dla krzemu metalicznego: do 98% krzemionki w pyłach.

Początkowo na zainteresowanie pyłami krzemionkowymi miała głównie wpływ ochrona środowiska i względy oszczędnościowe, by część cementu zastąpić materiałem odpadowym. Przydatność mikrokrzemionki w technologii betonu znalazła swe praktyczne odzwierciedlenie już ćwierć wieku temu. W roku 1971 wykonano beton konstrukcyjny w hucie Fiska w Norwegii z wykorzystaniem pyłów krzemionkowych. W tymże roku firma „Sika Chemie” uzyskała swój pierwszy patent na cement z dodatkami mikrokrzemionki i superplastyfikatorów.

Pierwsze realizacje z zastosowaniem pyłów krzemionkowych do produkcji betonów w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie nastąpiły na początku lat 80. XX wieku.

Obecnie pyły te są na świecie przedmiotem stale rosnącego zainteresowania, jako atrakcyjny materiał do stosowania w betonie, zwłaszcza w dobie rozwoju superplastyfikatorów umożliwiających większe ich dawkowanie. Efektem tego współdziałania są betony o wysokim poziomie trwałości i wytrzymałości.

W Polsce mikrokrzemionka dostępna jest w postaci suchego pyłu krzemionkowego o charakterze koloidu powietrznego oraz wodnej zawiesiny krzemionkowej (z dodatkami, lub bez). Dla pełni obrazu dodać należy, że istnieją jeszcze inne postacie mikrokrzemionki – jednak nie są one szeroko stosowane w budownictwie. Mowa tu o granulacie krzemionkowym, szlamie krzemionkowym i pyłe krzemionkowym zbrylonym.

4. Badania właściwości materiałów na bazie cementu Sorela

4.1. Badanie wytrzymałości na ściskanie

Badanie to przeprowadza się w celu sprawdzenia maksymalnych naprężeń ścisających dla betonu, w celu zaprojektowania betonu. Badania były przeprowadzone na próbkach sześciennych o wymiarach (150x150x150 [mm]). Wykonywanie i pielęgnację próbek betonowych do badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono w oparciu o normę PN-EN12390-2 [3]. Mieszanke betonową ułożoną w formie natychmiast zagęszczano wibratorem wglębnym na stole wibracyjnym. Nadmiar spoiwa powyżej górnej krawędzi formy usuwano, używając dwóch stalowych kielni lub pacek. Próbkę do badania zostały wyraźnie i trwale oznakowane. Wykonane próbki rozformowano nie wcześniej niż po upływie 16 godzin i nie

później niż po upływie 3 dni, zabezpieczając je przed wstrząsami oraz utratą wody. Próbki w formach przechowywano w temperaturze $20\pm 5^{\circ}\text{C}$. Po wyjęciu próbek z form przechowywano w warunkach pokojowych w temperaturze $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza $\geq 95\%$.

Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono po 28 dniach dojrzewania. Próbki po suszeniu z wilgoci umieszcza się w maszynie wytrzymałościowej na płycie dociskowej. Próbki sześciennie ustawia się tak, aby obciążenie było przykładane prostopadłe do kierunku formowania. Przyrost naprężeń powinien wynosić od 0,2 do 1,0 MPa/s. Badanie trwa do momentu zniszczenia próbek. Należy odnotować największe obciążenie.

Wytrzymałość na ściskanie oblicza się ze wzoru:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

gdzie:

F – maksymalna siła niszcząca [kN],

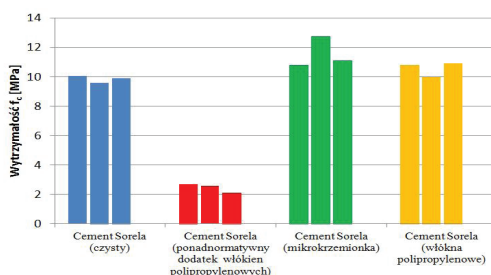
A_c – pole przekroju poprzecznego próbki, na które działa siła ściskająca, $[\text{m}^2]$.

Tabela 1. Wyniki badań wytrzymałościowych kostek sześciennych

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE - KOSTKI 150x150x150 [mm]			
MATERIAŁ	SKŁAD PRÓBKİ	SIŁA NISZCZĄCA [kN]	WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE [MPa]
CEMENT SORELA (CZYSTY)	MgO 6720 g	226,1	10,05
	MgCl ₂ 3033 g	215,5	9,58
	H ₂ O 2660 ml		
	Piasek (0-2 mm) 9492 g	222,4	9,88
	Żwir (2-8 mm) 14240 g		
	Fluorokrzemian cynku 8,6 ml		
CEMENT SORELA (WŁÓKNA POLIPROPYLENOWE - PONADNORMATYWNY DODATEK)	MgO 4320 g	61	2,71
	MgCl ₂ 1950 g		
	H ₂ O 2750 ml		
	Piasek (0-2 mm) 7120 g	57,7	2,56
	Żwir (2-8 mm) 10680 g		
	Włókna polipropylenowe 66,8 g	47,7	2,12
	Fluorokrzemian cynku 8,6 ml		
CEMENT SORELA (MIKROKRZEMIONKA)	MgO 4320 g	243,3	10,81
	MgCl ₂ 1950 g		
	H ₂ O 1500 ml		
	Piasek (0-2 mm) 7120 g	287,4	12,77
	Żwir (2-8 mm) 10680 g		
	Mikrokrzemionka 62,7 g	250	11,11
	Fluorokrzemian cynku 8,6 ml		

CEMENT SORELA (WŁÓKNA POLIPROPYLE- LENOWE)	MgO 4320 g	232,56	10,8
	MgCl ₂ 1950 g		
	H ₂ O 2750 ml		
	Piasek (0-2 mm) 7120 g	213,18	9,99
	Żwir (2-8 mm) 10680 g		
	Włókna polipropylenowe 6,6 g	234,71	10,9
	Fluorokrzemian cynku 8,6 ml		

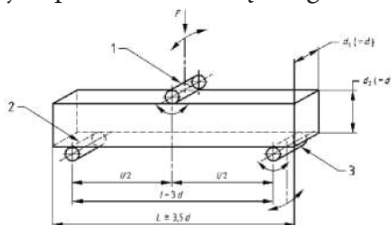
Na podstawie uzyskanych wartości wytrzymałości na ściskanie określa się klasę wytrzymałościową materiału na bazie cementu Sorela w oparciu o normę PN-EN 206-1 [16].



Rys.1 Wykres graficzny wartości porównawczych wytrzymałości na ściskanie kostek sześciennych

4.2. Badanie wytrzymałości na zginanie

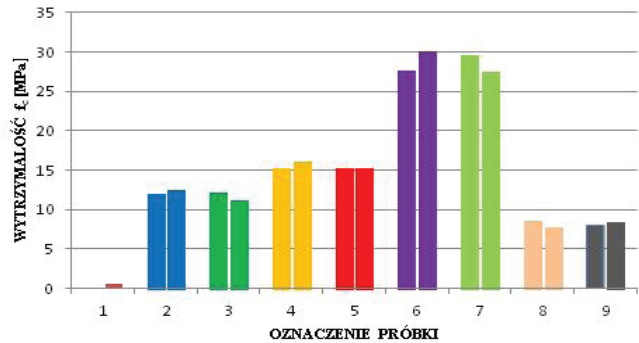
Próbki prostopadłościennne o wymiarach 40 x 40 x 160 [mm] zgodnie z normą PN-EN 12390-1 poddawane zostały działaniu momentu zginającego przez zastosowanie obciążenia przekazywanego przez dolne i górne wałki. Zapisuje się maksymalne obciążenie przenoszone przez próbkę i oblicza wytrzymałość na zginanie.[14,16] Badania zostały przeprowadzane za pomocą maszyny wytrzymałościowej zgodnej z normą PN-EN 12390-4. Wybiera się stały przyrost naprężenia z zakresu 0,04 – 0,06 MPa/s. Po zastosowaniu obciążenia początkowego, nieprzekraczającego około 20% obciążenia niszczonego, należy bez wstrząsu obciążać próbkę w sposób ciągły zwiększać obciążenie z wybraną prędkością $\pm 10\%$ do momentu, gdy niemożliwe jest przeniesienie większego obciążenia.



Rys. 2 Schemat obciążenia próbki w badaniu wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu; 1 – wałek obciążający (z możliwością obrotu i nachylenia), 2 – wałek podpierający, 3 – wałek podpierający (z możliwością obrotu i nachylenia).

Tabela 2. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu. Dobór składu ($\text{MgO} + \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)(trójpunktowy schemat podparcia)

WYTRZYMAŁOŚĆ - BELKI 40x40x160 [mm]				WYTRZYMAŁOŚĆ - BELKI 40x40x160 [mm]	
SKŁAD PRÓBKII		NACISK [kN]	WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE [MPa]	SIŁA NISZCZĄCA [kN]	WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE [MPa]
1.	MgO 1000 g H ₂ O 250 ml	0,815	0,509	* rozpadła się	* rozpadła się
				1,79	0,559
2.	MgO 1000 g MgCl ₂ 100 g H ₂ O 200 ml	2,178	1,361	38,33	11,978
				39,7	12,406
3.	MgO 1000 g MgCl ₂ 100 g H ₂ O 200 ml	2,28	1,425	39,12	12,225
				35,88	11,213
4.	MgO 1200 g MgCl ₂ 200 g H ₂ O 160 ml	3,049	1,906	48,69	15,216
				51,38	16,056
5.	MgO 1200 g MgCl ₂ 200 g H ₂ O 160 ml	2,653	1,658	48,8	15,25
				48,75	15,234
6.	MgO 1300 g MgCl ₂ 300 g H ₂ O 150 ml	5,422	3,389	88,49	27,65
				96,06	30,019
7.	MgO 1300 g MgCl ₂ 300 g H ₂ O 150 ml	4,775	2,984	94,9	29,656
				87,8	27,438
8.	MgO 1200 g MgCl ₂ 200 g Piasek 400 g Żwir 200 g H ₂ O 130 ml	1,872	1,17	27,43	8,572
				25	7,813
9.	MgO 1200 g MgCl ₂ 200 g Piasek 400 g Żwir 200 g H ₂ O 130 ml	2,585	1,616	25,6	8
				26,89	8,403



Rys. 3 Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu (trójpunktowy schemat podparcia) w zależności od składu próbek ($\text{MgO} + \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

4.3. Badanie wodoszczelności

Wodoszczelność bada się na próbkach o wysokości 150 mm (dostęp wody od góry na powierzchnię próbki o średnicy 100 mm). Ciśnienie wody zmienia się skokowo co 24 godziny o wartość 0,2 MPa aż do wystąpienia oznak przeciekania [15] Stopień wodoszczelności jest równy maksymalnemu ciśnieniu wody (razy 10), przy którym nie wystąpiły objawy przecieku. Stopnie wodoszczelności konstrukcji przyjmuje się w zależności od wskaźnika ciśnienia. Wskaźnik ten jest równy stosunkowi wysokości słupa wody w metrach (ciśnienia wody w metrach słupa wody) do grubości przegrody w metrach. Na przykład dla zbiornika na wodę o głębokości 5 m i grubości dna 0,3 m wskaźnik ciśnienia wynosi 16,6. Dla wskaźnika ciśnienia od 16 do 20 norma PN-88/B-06250 zaleca stopień wodoszczelności betonu przy stałym parciu wody W 8.

Tabela 3. Badania wodoszczelności materiałów na bazie cementu Sorela. (*próbka po 1 dniu; **próbka po 2 dniach)

WODOSZCZELNOŚĆ – KOSTKI 150x150x150 [mm]		
MATERIAŁ	SKŁAD PRÓBKİ	GŁĘBOKOŚĆ WNIKNIĘCIA WODY [mm]
CEMENT SORELA (CZYSTY)	MgO 6720 g MgCl ₂ 3033 g H ₂ O 2660 ml Piasek (0-2 mm) 9492 g Żwir (2-8 mm) 14240 g Fluorokrzemian cynku 8,6 ml	Całkowicie przepuszczalna *
CEMENT SORELA (WŁÓKNA POLIPROPYLENOWE)	MgO 4320 g MgCl ₂ 1950 g H ₂ O 2750 ml Piasek (0-2 mm) 7120 g Żwir (2-8 mm) 10680 g Włókna polipropylenowe 66,8 g Fluorokrzemian cynku 8,6 ml	Całkowicie przepuszczalna **
CEMENT SORELA (MIKROKRZEMIONKA)	MgO 4320 g MgCl ₂ 1950 g H ₂ O 1500 ml Piasek (0-2 mm) 7120 g Żwir (2-8 mm) 10680 g Mikrokrzemionka 62,7 g Fluorokrzemian cynku 8,6 ml	Całkowicie przepuszczalna **

4.4. Badania korozji

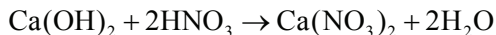
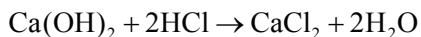
Szybkość chemicznych procesów korozyjnych zależy od wielu czynników materiałowych i środowiskowych:

- Składu chemicznego spoiwa – cementu (cement portlandzki, hutniczy, glinowy) i kruszywa (kruszywo kwarcowe, wapienne, zwarte, porowate),
- Struktury betonu (luźna, zwarta, porowata),

- Wieku betonu; istnieje optimum wieku betonu pod względem odporności korozyjnej – beton młody jest bardzo podatny na działania ługujące ze względu na niezupełne stwardnienie spoiwa i wysoką zawartość wodorotlenku wapnia, beton stary natomiast podatny jest na korozję ze względu na dużą porowatość. Beton stary jest jednak w dużym stopniu skarbonatyzowany i przez to mniej podatny na ługowanie,
- Składu chemicznego i stężenia środowiska a także jego stanu skupienia (gaz, ciecz, grunt agresywny) oraz dynamiki zmian (zmiana stężenia, przepływ, środowisko). Im większa dynamika zmian tym większa szybkość korozji.

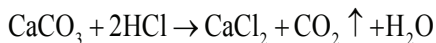
Ze względu na rodzaj środowiska agresywnego będącego przyczyną korozji betonu, rozróżnia się:

- Korozję ługowania – wywołaną działaniem wód miękkich pozbawionych Ca^{2+} , polegającą głównie na wymywaniu Ca(OH)_2 . Sprzyjają jej przepływ i ciśnienie wody oraz niskie temperatury,
- Korozję kwasową – wywołaną działaniem roztworów mocnych kwasów mineralnych – HCl , HNO_3 , H_2SO_4 , H_3PO_4 , słabego kwasu siarkowodorowego H_2S , kwasów organicznych – octowego, mlekowego i zawartych w gruncie kwasów humusowych. Ten typ korozji polega na tworzeniu łatwo rozpuszczalnych soli wapnia, rozkładzie fazy C-S-H lub rozkładzie węglanu wapnia w strefie skarbonatyzowanej w materiałach na bazie cementu portlandzkiego.

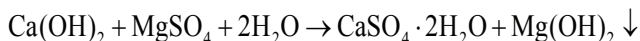


Roztwory kwasu siarkowego obok korozji kwasowej wywołują korozję siarczanową, charakteryzującą się tworzeniem uwodnionych siarczanów o zwiększonej objętości, wywołujących ekspansję materiału i rozsadzanie,

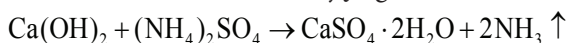
- korozję węglanową – wywołaną działaniem wód i wolnego agresywnego CO_2 . Nadmierna ilość agresywnego dwutlenku węgla zawarta np. w wodach mineralnych wywołuje korozję materiału spowodowaną tworzeniem łatwo rozpuszczalnego wodorowęglanu wapnia



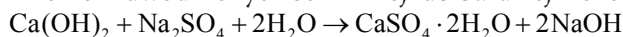
- korozję magnezową – wywołaną działaniem soli Mg^{2+} , reagujących z wydzieleniem żelowego Mg(OH)_2 , który nie posiada właściwości wiążących,



- korozję amonową – wywołaną działaniem soli NH_4^+ , reagujących z wydzieleniem amoniaku rozsadzającego materiał



- korozję siarczanową – wywołaną działaniem soli SO_4^{2-} , reagujących z wydzielaniem uwodnionych soli mniej lub bardziej złożonych (gips, sól Candlota).



Szczególnie niebezpieczne jest cykliczne zawilgacanie i osuszanie materiału.

- korozję zasadową – wywołaną działaniem stężonych roztworów mocnych zasad (ługów : sodowego i potasowego).

Korozję wywołują także tłuszcze i oleje roślinne lub zwierzęce. Występuje także korozja wewnętrzna spowodowana reakcją kruszywa zawierającego aktywną krzemionkę np. opal z alkaliami (Na_2O , K_2O) zawartymi w cemencie. Silnie korozyjne działanie na materiał cementowy wywierają kwaśne gazy spalinowe:

- SO_2 – zawarty w gazach spalinowych po utlenieniu tlenem z powietrza i przyłączeniu wody tworzy kwas siarkowy,
- NO_x – zawarty w zanieczyszczonym powietrzu tworzy kwas azotowy,
- CO_2 – zawarty w gazach spalinowych działa szkodliwie, podobnie jak w wodach mineralnych, poprzez tworzenie łatwo rozpuszczalnego wodorowęglanu wapnia, a także:
 - H_2S – siarkowodor (naturalne źródła siarkowe, gazy gnilne, gazy technologiczne) działa szkodliwie przez tworzenie siarczków wapnia lub po utlenieniu, kwasu siarkowego,
 - HF – fluorowodor działa niekorzystnie reagując z SiO_2 zawartym w kruszywie a także z wodorotlenkiem wapnia.

Korozji betonu materiałów na bazie cementów zapobiegać można w następujący sposób:

- stosując odpowiedni do składu środowiska rodzaj cementu, np.: hutniczy, glinowy, portlandzki z dodatkami pucolanowymi,
- stosując kruszywo odporne w danym środowisku,
- stosując odpowiedni skład granulometryczny kruszywa i niski stosunek woda/cement (wraz z ewentualnym dodatkiem superplastyfikatorów),
- stosując technologie zwiększające szczelność: wibrowanie, wstrząsanie, obróbka hydrotermalna,
- stosując powłoki ochronne organiczne i nieorganiczne,
- stosując rozwiązania konstrukcyjne zapobiegające gromadzeniu wilgoci lub okresowemu wysychaniu i zawilgacaniu materiału.

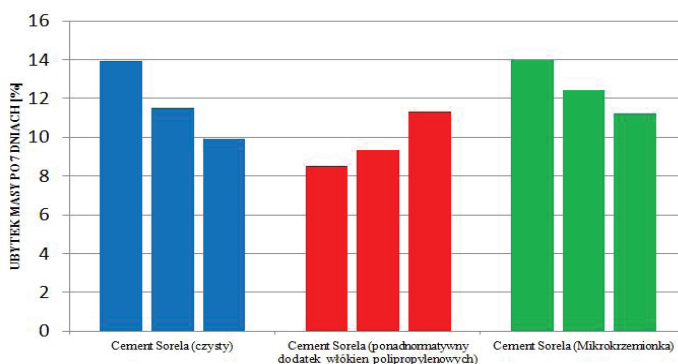
Znajomość stopnia agresywności środowiska, określonego zgodnie z normą PN-80/B-01800 umożliwia dobór odpowiednich metod ochrony przed korozją.

4.4.1. Korozja kwasowa – roztwór 5% HCl

Przedstawienie wyników badań przyspieszonej korozji modyfikowanych próbek w roztworze 5% HCl.

Tabela 4. Wyniki badań korozji kwasowej (5% HCl) kostek sześciennych

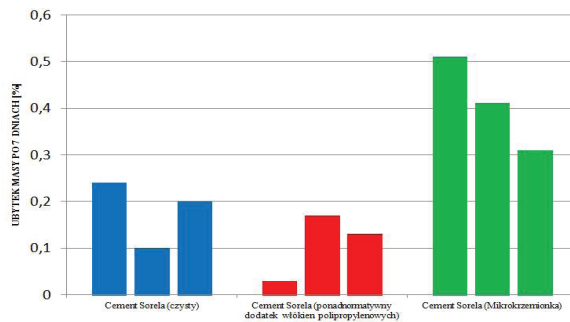
MATERIAL	NR PRÓBK	MASA POCZĄTKOWA [g]	MASA PO 24h [g]	ZMIANA MASY PO 24h [%]	MASA PO TY- GODNIU [g]	ZMIANA MASY PO 7 DNIACH [%]
CEMENT SORELA (CZYSTY)	MgO 6720 g MgCl ₂ 3033 g H ₂ O 2660 ml Piasek (0-2 mm) 9492 g Żwir (2-8 mm) 14240 g Fluorokrzemian cynku 8,6 ml	823,73				
		822,05				
		854,48				
		808,28	696,64	-13,81	695,57	-13,94
		792,43	702,48	-11,35	701,38	-11,49
		877,23	791,43	-9,78	790,3	-9,91
CEMENT SORELA (WŁOKNA POLI- PROPYLENOWE)	MgO 4320 g MgCl ₂ 1950 g H ₂ O 2750 ml Piasek (0-2 mm) 7120 g Żwir (2-8 mm) 10680 g Włókna 66,8 g Fluorokrzemian cynku 8,6 ml	911,49				
		846,18				
		829,62				
		930,69	852,07	-8,45	851,5	-8,51
		770,74	700,61	-9,01	698,93	-9,32
		775,51	689,48	-11,09	687,62	-11,33
CEMENT SORELA (MI- KROKRZEMIONKA)	MgO 4320 g MgCl ₂ 1950 g H ₂ O 1500 ml Piasek (0-2 mm) 7120 g Żwir (2-8 mm) 10680 g Mikrokrzemionka 62,7 g Fluorokrzemian cynku 8,6 ml	715,69				
		730,45				
		760,46				
		762,3	656,41	-13,89	656,04	-13,96
		735,36	664,07	-9,69	643,93	-12,43
		746,27	661,84	-11,31	662,48	-11,23



Rys. 4 Przedstawienie graficzne zmiany masy w roztworze 5% HCl

4.4.2. Badania korozji – w 15% roztworze soli drogowej

Przedstawienie wyników badań przyspieszonej korozji modyfikowanych próbek w roztworze soli drogowej. Skład roztworu 15% soli drogowej: 15% NaCl, siarczany SO₄ (max 3%), antyzbrylacz- K₄ (FeCN)₆ 40 mg/kg, wilgotność – max 3%



Rys. 5 Przedstawienie graficzne zmiany masy w roztworze 15% soli drogowej

Tabela 5. Wyniki badań korozji w 15% roztworze soli drogowej

MATERIAŁ	NR PRÓBK	MASA POCZĄTKOWA [g]	MASA PO 24h [g]	ZMIA- NA MASY PO 24h [%]	MASA PO TY- GODNIU [g]	ZMIANA MASY PO 7 DNIACH [%]
CEMENT SORELA (CZYSTY)	MgO 6720 g	823,73	825,74	0,24	825,28	0,19
	MgCl ₂ 3033 g	822,05	822,88	0,1	823,08	0,12
	H ₂ O 2660 ml	854,48	856,17	0,2	856,23	0,2
	Piasek (0-2 mm) 9492 g	808,28				
	Żwir (2-8 mm) 14240 g	792,43				
	Fluorokrzemian cynku 8,6 ml	877,23				
CEMENT SORELA (WŁÓKNA POLIPRO- PYLENOWE)	MgO 4320 g	911,49	911,78	0,03	912,48	0,11
	MgCl ₂ 1950 g	846,18	847,64	0,17	848,5	0,27
	H ₂ O 2750 ml	829,62	830,66	0,13	831,18	0,19
	Piasek (0-2 mm) 7120 g	930,69				
	Żwir (2-8 mm) 10680 g	770,74				
	Włókna 66,8 g	775,51				
CEMENT SORELA (MIKROKRZE- MIONKA)	Fluorokrzemian cynku 8,6 ml	715,69	719,34	0,51	723,04	1,03
	MgO 4320 g	730,45	733,46	0,41	736,31	0,8
	MgCl ₂ 1950 g	760,46	762,83	0,31	766	0,73
	H ₂ O 1500 ml	762,3				
	Piasek (0-2 mm) 7120 g	735,36				
	Żwir (2-8 mm) 10680 g	746,27				
	Mikrokrzemion- ka 62,7 g					
	Fluorokrzemian cynku 8,6 ml					

5. Podsumowanie

Wykorzystanie dodatków w postaci mikrokrzemionki oraz włókien polipropylenowych znacznie zmienia właściwości materiałów na bazie cementu Sorela.

Mikrokrzemionka dodana do cementu Sorela nadaje materiałowi nowe właściwości wytrzymałościowe i korzystnie wpływa na wszystkie parametry nowego materiału. Dodatek zwiększa wytrzymałość na ściskanie o 2 MPa i zmniejsza nasiąkliwość. Drobne cząstki mikrokrzemionki stosowane są do osnowy materiałów celem zapewnienia pustek pomiędzy kruszywem. Redukują one zawartość wody zarobowej w spoiwie i zwiększają ich gęstość.

Natomiast dodatek włókien polipropylenowych wpływa na redukcję rys skurczowych i mikropełnięć. Badania wodoszczelności potwierdziły, że cement Sorela wykazuje brak dostatecznej odporności na wodę. Wszystkie próbki na jego bazie wykazały całkowitą przepuszczalność (Tab.3), pomimo dodania do składu mieszanki fluorokrzemianu, pełniącego rolę częściowego uszczelniacza i utwardzania powierzchni materiału oraz nadawania właściwości hydrofobowych.

Włókna polipropylenowe zmniejszają nasiąkliwość i wodoprzepuszczalność materiału oraz jego penetrację. Dzięki temu ograniczają korozję. Nie zaleca się jednak stosowania większej ilości włókien niż ta, która została wskazana przez producenta. Próby wykorzystania dużych ilości włókien polipropylenowych (19 mm) w celu lepszego wykorzystania odpadów nie dały pozytywnych efektów. Ponadnormatywne (w tym przypadku dziesięciokrotne) zwiększenie ilości włókien w materiale prowadzi do znacznego obniżenia jego wytrzymałości (5-krotnie) (Rys.1).

Korozja wywołana chlorkami sodu powoduje spadek trwałości i wytrzymałości betonu. Następuje przyrost masy, który jest spowodowany wnikaniami i narastaniem kryształów soli chlorków na powierzchni spoiwa oraz w jego porach. Spoiwo magnezowe, wykazuje odporność na działanie soli np. soli drogowej, która wchodzi w strukturę porów powietrznych badanego materiału (Tab.5 oraz Rys.5). Analizując wyniki badań próbek zanurzonych w roztworze 15% soli drogowej oraz strukturę porów powietrznych badanego materiału można zauważyć korelację pomiędzy porowatością (ilością powietrza i mikroporów), a ilością NaCl zaabsorbowaną przez próbki materiału. Jest to jedna z zalet spoiwa magnezowego, które wykazuje odporność na działanie popularnych soli, jaką jest sól drogowa, co jest ściśle związane z porowatością materiału.

W przypadku materiałów z cementu Sorela wpływ roztworu 5% HCl powoduje relatywnie duży ubytek masy próbki (Tab.4 oraz Rys.4). Jest to wadą spoiwa magnezowego, który źle reaguje przy kontakcie z kwasem, co potwierdza, że nie może być on wykorzystywany do konstrukcji zbiorników na odpady toksyczne, które zawierają agresywne związki. Z kolei dobra rozpuszczalność w kwasie jest zaletą w przypadku konieczności usuwania uszkodzonych części elementów wykonanych na bazie spoiwa magnezowego.

Literatura

- [1] Bensted J., *Novel cements: Sorel and related chemical cements* (1989) 217–228.
- [2] PN-EN 12390-5:2001, *Badania betonu. Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badania.*
- [3] Robinson W. O., Waggman W. H., *Basic magnesium chlorides*. Journal of Physical Chemistry 13, (1909) 673–678.
- [4] DeWolff, P. M., Walter-Levy, L., *Acta Cryst.*, 6, (1953) 40.
- [5] Cole, W.F., Demediuk, T., Aust. J., *Chem.* 10, (1957) 287–194.
- [6] Matkovic B., Young J. F., *Microstructure of magnesium oxychloride cements*. Nature Physical Science 246 (1973) 79–80.
- [7] Harper F. C., *L'effet de la temperature de calcination sur les proprietes de l'oxyde de magnesium prepare au depart de carbonate basique de magnesium* (1954) 45–48.
- [8] Beaudoin J. J., Ramachandran V. S., *Cement, Concrete, Res.* 8(1). (1978) 103–112.
- [9] Sorrentino W., Kurdov. C. M., Georgevsk F. P., *8th IC CCC Rio de Janeiro*, vol.8p. (1986) 292.
- [10] Deng D., Zang C., *The formation mechanizm of the hydrate phases in magnesium oxychloride cement: Cement and Concrete Research* (1999) 1365–1371.
- [11] Deng D., *The mechanizm for soluble phosphates to improve the water resistance of magnesium oxychloride cement. Cement and Concrete Research* (2003) 1311–1317.
- [12] *Budownictwo, technologie, architektura, Domieszki do betonu, Polski Cement*, numer specjalny, Kraków (2003).
- [13] Jasiczak J., Mikołajczak P., *Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami* Politechnika Poznańska (2003).
- [14] PN-EN 12390-5:2001, *Badania betonu. Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badania.*
- [15] PN-EN 12390-8:2001, *Badania betonu. Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem.*
- [16] PN-EN 206-1: 2003, *Beton. Cz. I. Wymagania. Właściwości. Produkcja. Zgodność.*

Study of influence of additive on properties of cement-based Sorel materials

Anna Tatarczak¹, Jarosław Brzozowski², Justyna Jaroszyńska-Wolińska³

¹*Department of General Construction, Civil Engineering and Architecture Faculty, Lublin University of Technology,*

e-mail: a.tatarczak@pollub.pl

²*Civil Engineering and Architecture Faculty, Lublin University of Technology*

e-mail: j.brzozowski.ikr@gmail.com

³*Department of General Construction, Civil Engineering and Architecture Faculty, Lublin University of Technology,*

e-mail: j.wolinska@gmail.com

Abstract: The subject of the research is the effect of additives on the physical and mechanical properties of materials using Sorel cement.

The research was aiming to improve the durability of these materials by adding to the cement micro silica as an additive, and the fibre reinforcement in the form of polypropylene fibres. These courses of action were discussed in more detail and show the typical results for the effects of these additives on the properties of the materials. Analyses were made on the basis of compressive strength and flexural strength, corrosively and modified waterproofing materials. The addition of micro silica preferably influences the performance of the material. Increases strength and reduces water absorption.

Keywords: Sorel Cement, Materials properties, Micro silica, Polypropylene fibres.

Wpływ energii ultradźwięków i napelniaczy nieorganicznych na właściwości reologiczne nanopolimerów

Stanisław Fic¹, Andrzej Szewczak²

¹Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: s.fic@pollub.pl

²Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,
e-mail: a.szewczak@pollub.pl

Streszczenie: Rozwój chemii polimerów (organicznych i nieorganicznych), pozwala na stosowanie tych związków chemicznych w wielu dziedzinach życia codziennego. Jednym z zastosowań polimerów jest ich wykorzystywanie w hydrofobizacji porowatych materiałów budowlanych. Właściwości reologiczne wykorzystywanych polimerów mają duże znaczenie w kontekście wnikania w porowatą strukturę powierzchni ceramiki budowlanej i wytwarzanie szczelnych powłok chroniących przed wnikaniem wilgoci. Efektem jest zabezpieczenie tych materiałów przed degradacją na skutek zmian stopnia zawilgocenia i temperatury. Jest to szczególnie istotne w przypadku ochrony obiektów zabytkowych. Ewentualna zmiana podstawowych właściwości reologicznych polimerów – lepkości oraz napięcia powierzchniowego – wpływa na łatwość wypełniania porów przez polimery. Zmiany te można uzyskać poprzez dodatek tzw. środków pomocniczych tj. napelniacze. Zainicjowanie reakcji cząstek polimerów z cząsteczkami napelniaczy możliwe jest m.in. na drodze reakcji sonochemicznych. Poniższy artykuł przedstawia wyniki badań nad możliwością modyfikacji właściwości reologicznych nanopolimeru na bazie alkilosiloksanów dodatkiem napelniacza – nanokrzemionki. Czynnikiem inicjującym reakcje chemiczne i dodatkowo powodującym zmianę lepkości i napięcia powierzchniowego w tak powstałej mieszaninie była energia ultradźwięków o częstotliwości 24kHz. Dodatkowo określono właściwości tiksotropowe polimerów z różną zawartością napelniacza.

Słowa kluczowe: polimery, napelniacz, siloksany, lepkość, napięcie powierzchniowe, tiksotropia, ultradźwięki.

1. Wprowadzenie

Jedną z najważniejszych grup zaliczanych do związków chemicznych są polimery. (makrocząstki). Ich zasadniczą cechą jest obecność w ich strukturze powtarzalnej sekwencji grup atomów połączonych wiązaniami chemicznymi[1,2]. Wraz z rozwojem badań w dziedzinie chemii organicznej, opracowywane są nowe polimery, które w zależności od wymaganych właściwości, modyfikowane są poprzez tzw. składniki dodatkowe. Badaniom podlegają także metody i sposoby otrzymywania nowych rodzajów polimerów[1].

Szeroki zakres właściwości fizyko-chemicznych polimerów pozwala na wykorzystywanie ich w wielu dziedzinach życia, tj. budownictwo (polimerobeton, tynki żywiczne) [3,4], przemysł, medycyna, chemia, technologia żywności.

W zależności od stosowanego kryterium polimery można podzielić na:

Ze względu na pochodzenie:

- polimery naturalne
- polimery syntetyczne
- polimery modyfikowane – polimery naturalne i syntetyczne, których struktura modyfikowana jest na drodze procesów fizyko-mechanicznych

Ze względu na budowę i obecność w łańcuchu polimeru określonych atomów lub grup atomowych[2]:

- polimery organiczne (węglowodorowe) - polimery, w których podstawowymi składowymi są wyłącznie grupy węglowodorowe (np. polietylen) lub grupy węglowodorowe z heteroatomami w grupach bocznych (np. poli(chlorek winylu)); w łańcuchach tych polimerów występują atomy węgla
- polimery nieorganiczne – polimery, w strukturze których nie występują atomy węgla (polimery z heteroatomami w łańcuchu głównym), tj. poliamidy, polisiarczki, polisiloksany.

Jednym z możliwych zastosowań polisiloksanów, które wynikają z zachowywania przez te związki odpowiednich właściwości reologicznych (głównie lepkości oraz napięcia powierzchniowego) w temperaturach pokojowych, przy odpowiednio dużej masie cząsteczkowej, jest wykorzystywanie ich w hydrofobizacji powierzchni przegród wykonanych z materiałów ceramicznych[5,6]. Hydrofobizacja powierzchniowa jest jednym z najczęściej wykorzystywanych sposobów zabezpieczania materiałów porowatych przed ich degradacją na skutek oddziaływania gradientu wilgoci i temperatury[7,8]. Cały proces polega na naniesieniu (poprzez np. natrysk, malowanie, nasycenie) na ceramiczną powierzchnię środka hydrofobizującego, który po pewnym czasie, na skutek ustabilizowania struktury, tworzy cienką, nieprzepuszczalną dla wilgoci błonkę. W przypadku stosowania siloksanów istotna jest także większa – w porównaniu z polimerami węglowodorowymi – elastyczność wiązań pomiędzy poszczególnymi grupami atomów, która wynika z chemicznego charakteru połączeń pomiędzy atomami krzemu Si i tlenu O[6,9].

Siloksany są związkami będącymi pojedynczymi merami silikonów – związków nieorganicznych uzyskiwanych na drodze syntetycznej polimeryzacji siloksanów. W chemii organicznej termin silikonowy przypisany jest polisiloksanom z grupami alkilowymi i aryłowymi w grupach bocznych [9].

Lepkość i napięcie powierzchniowe to podstawowe cechy reologiczne, które wpływają na wnikanie polimeru w porowatą strukturę materiału ceramicznego[10,11,12]. Lepkość jest właściwością charakteryzującą zachowanie cieczy wynikające z tarcia wewnętrznego pomiędzy cząsteczkami powstałego w czasie wzajemnego przemieszczania warstw cieczy.

Napięcie powierzchniowe jest natomiast zjawiskiem fizycznym charakteryzującym zachowanie danej cieczy na styku inną cieczą, ciałem stałym lub gazem. Wielkość napięcia zależy od sił kohezji i adhezji, a także – w przypadku styku cieczy z ciałem stałym – od chemicznego charakteru dyspersji kropli cieczy. Obecność sił napięcia powierzchniowego, sił grawitacyjnych oraz sił przylegania determinuje zachowanie cieczy na wewnętrznej powierzchni kapilar w porach materiału ceramicznego[10].

Ewentualna zmiana lepkości oraz napięcia powierzchniowego stanowi punkt wyjściowy do osiągnięcia efektywniejszego stopnia zabezpieczenia ceramiki budowlanej przed wsiąkaniem wody. Modyfikacja właściwości reologicznych polimerów może odbywać się poprzez zmianę temperatury, ciśnienia lub dodanie

tw. środków pomocniczych tj. napełniacze nieorganiczne[10], których zastosowanie umożliwia otrzymanie powłoki hydrofobizującej o podwyższonej odporności chemicznej i mechanicznej. Podstawowym kryterium doboru rodzaju napełniacza jest jego kompatybilność ze składem chemicznym polimeru. W niektórych przypadkach, w celu uzyskania odpowiedniego wymieszania polimeru i napełniacza, konieczne jest dodanie tzw. środków powierzchniowo czynnych zmieniających napięcie powierzchniowe na stykach fazy ciekłej i stałej.

W chemii polimerów ultradźwięki wykorzystywane są w procesach inicjacji reakcji polimeryzacji (reakcje sonochemiczne). Energia ultradźwięków, przy ustalonej częstotliwości oraz prędkości rozchodzenia fali w danym ośrodku, może wpływać na tiksotropowe zachowanie roztworu polimeru[1].

Tiksotropia układu to proces, w którym na skutek rozbicia pierwotnej, wewnętrznej struktury np. polimeru, dochodzi do zmniejszania tarcia wewnętrznego płynu, a w konsekwencji do zmiany jego lepkości. Zmiany te zależą od czasu i prędkości działania źródła naprężeń ścinających tj. wstrząsanie, mieszanie[10,11,12]. Płyn powraca do swojej pierwotnej konsystencji po zakończeniu procesu ścinania – powrót ten jest opóźniony w czasie. Wzrost prędkości ścinania jest proporcjonalny do szybkości zmniejszania lepkości. Zmiana lepkości może natomiast powodować szybsze wnikanie nanopolimeru w porowatą strukturę materiału ceramicznego.

Poniższy artykuł zawiera opis badań nad możliwością modyfikacji podstawowych właściwości reologicznych nanopolimeru – polisiloksanu (nanosilikonu) – poprzez dodanie napełniacza w postaci nanokrzemionki. Odpowiednie wymieszanie polimeru i napełniacza uzyskano poprzez poddanie mieszaniny działaniu energii ultradźwięków. Zbadano także tiksotropowe zachowanie otrzymanych w ten sposób mieszanin.

2. Materiały i urządzenia wykorzystane w badaniach

Opisywane badania były częścią szerszego założenia badawczego, którego celem było określenie porównanie skuteczności hydrofobizacji materiałów ceramicznych preparatami na bazie polimerów nieorganicznych. We wstępnej fazie badań określone zostały podstawowe właściwości fizyczne (gęstość) i reologiczne – lepkość, napięcie powierzchniowe – nanopolimeru na bazie siloksanów, którego skład modyfikowany był poprzez dodatek nanokrzemionki (napełniacza nieorganicznego). Roztwór polimeru nie był dodatkowo rozcieńczany wodą.

W celu aktywacji pyłu krzemionkowego i uzyskania jednolitej mieszaniny polimeru przeprowadzono dezintegrację wewnętrznej struktury za pomocą sonifikatora laboratoryjnego stacjonarnego z końcówką UP400 o mocy 400W i wytwarzanej częstotliwości drgań 24 kHz. Urządzenie posiada certyfikat DIN-EN ISO 9001. Czas dezintegracji każdego polimeru wynosił 15 min.

Receptury badanych polimerów :

- polimer I – polisiloksan bez dodatków napęlniaczy
- polimer II – polisiloksan, którego wewnętrzna struktura została zdeintegrowana ultradźwiękami (bez dodatku napęlniacza)
- polimer III – roztwór na bazie siloksanu z dodatkiem napęlniacza - 0,5% nanokrzemionki
- polimer IV – roztwór na bazie siloksanu z dodatkiem napęlniacza - 1% nanokrzemionki
- polimer V – roztwór na bazie siloksanu z dodatkiem napęlniacza - 1,5% nanokrzemionki

Lepkość polimerów zbadano z wykorzystaniem wiskozymetru Ostwalda o zakresie pomiaru lepkości 0,5–2,5 mPa·s. Badanie polega na pomiarze czasu przepływu płynu pomiędzy dwoma ustalonymi poziomami w układzie szklanych kapilar. W celu zachowania dokładności pomiarów, wykonano je w stałej temperaturze 22,5°C. Budowa wiskozymetru umożliwia przeprowadzenie badania na jednakowej ilości cieczy – zachowana jest wówczas stała różnica ciśnień Δp pomiędzy dwoma kapilarami. Niezmiennosc temperatury i ciśnienia jest istotna, ponieważ są to czynniki w największym stopniu decydujące o zmienności lepkości badanego polimeru. Czas przepływu badanej cieczy odnosi się do czasu przepływu cieczy porównawczej – wody destylowanej. Lepkość dynamiczna wyznaczana jest zgodnie z wzorem[13]:

$$\eta = \frac{\rho_c \cdot t_c}{\rho_w \cdot t_w} \quad (1)$$

gdzie:

η – lepkość dynamiczna [mPa·s]

ρ_c – gęstość badanej cieczy (w danej temperaturze) [g/cm³]

t_c – czas przepływu badanej cieczy w wiskozymetrze [s]

ρ_w – gęstość wody destylowanej w danej temperaturze – 0,997 g/cm³

t_w – czas przepływu wody destylowanej w wiskozymetrze

Dla każdej badanej cieczy (polimeru) przeprowadzono 6 pomiarów czasu przepływu w wiskozymetrze.

Znając wartość lepkości dynamicznej i gęstość w danej temperaturze możliwe jest wyznaczenie lepkości kinematycznej, zgodnie ze wzorem[10]:

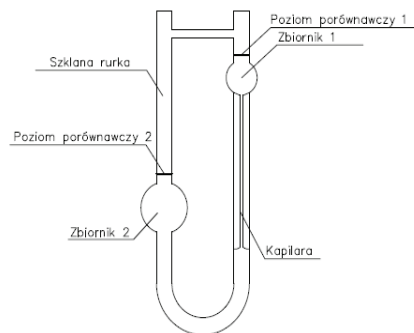
$$\nu = \frac{\eta_c}{\rho_c} \quad (2)$$

gdzie:

ν – lepkość kinematyczna [m²/s]

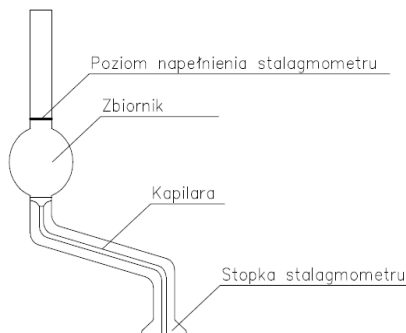
η_c – lepkość dynamiczna [mPa·s]

ρ_c – gęstość płynu [kg/m³]



Rys. 1. Wiskozymetr Ostwalda

Współczynnik napięcia powierzchniowego wyznaczono z wykorzystaniem stalagmometru. Badanie polega na zliczeniu liczby kropli płynu wypływającego pod wpływem ciśnienia hydrostatycznego ze specjalnie ukształtowanej szklanej kapilary zakończonej stopką – na skutek ciężaru cieczy wypływającej ze stalagmometru dana kropla o określonej masie odrywa się od stopki przyrządu – liczba i szybkość spadających kropli jest pośrednio wartością charakteryzującą daną ciecz.



Rys. 2. Stalagmometr

Wartość współczynnika napięcia powierzchniowego wyznaczana jest zgodnie z wzorem[13]:

$$\gamma_c = \frac{n_w \cdot \rho_c}{n_c \cdot \rho_w} \quad (3)$$

gdzie:

γ_c – współczynnik napięcia powierzchniowego badanej cieczy [N/m]

ρ_c – gęstość badanej cieczy w danej temperaturze [g/cm³]

ρ_w – gęstość wody destylowanej (cieczy porównawczej) [g/cm³]

n_c – liczba kropli ze stalagmometru dla badanej cieczy

n_w – liczba kropli ze stalagmometru dla wody destylowanej

Dla każdej z badanych cieczy przeprowadzono 6 pomiarów.

3. Wyniki badań i ich interpretacja

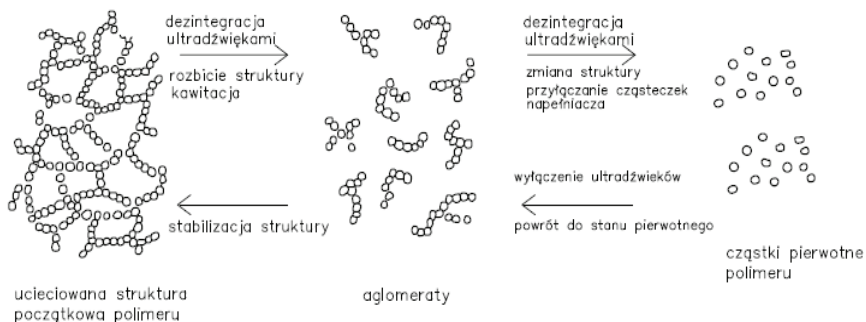
W trakcie badań wykonano pomiar lepkości dynamicznej oraz napięcia powierzchniowego 5 cieczy. Z powodu ścisłej zależności tych wielkości od temperatury i ciśnienia, przyjęto stałe wartości tych dwóch czynników: $T = 22,5^{\circ}\text{C}$, oraz ciśnienie równe ciśnieniu atmosferycznemu. Na podstawie uzyskanych wyników obliczono wartość lepkości kinematycznej, oraz określono wpływ ultradźwięków na w/w właściwości oraz tiksotropowy charakter cieczy.

Wyniki pomiaru lepkości i napięcia powierzchniowego przedstawiono tabela 1:

Tabela 1. Wyniki badań lepkości i napięcia powierzchniowego

Roztwór serii	Gęstość $[\text{g}/\text{cm}^3]$	Lepkość dynamiczna η $[\text{mPa}\cdot\text{s}]$	Lepkość kinematyczna ν $[\text{m}^2/\text{s}]$	Napięcie powierzchniowe σ $[\text{N}/\text{m} \cdot 10^{-3}]$	Iloraz η/σ
Polimer I	0,81	1,48	1,83	23,51	15,89
Polimer II	0,79	1,08	1,36	23,14	21,48
Polimer III	0,76	0,99	1,3	22,45	22,71
Polimer IV	0,77	1,03	1,33	25,71	24,97
Polimer V	0,79	1,04	1,32	21,02	20,17

Najniższą wartość gęstości uzyskano w przypadku polisiloksan z dodatkiem napełniacza (nanokrzemionki) w ilości 0,5%, największą – roztwór polimeru bez dodatków na który nie oddziaływano ultradźwiękami. Najmniejszą lepkość dynamiczną i kinematyczną także uzyskał roztwór siloksanu z dodatkiem 0,5% nanokrzemionki – zmiana odpowiednio o 27 i 29%), natomiast największą wartość tych wielkości – podobnie jak w przypadku gęstości – uzyskał niemodyfikowany roztwór polimeru.



Rys. 3. Schemat procesu sonifikacji polimeru

Uzyskane wyniki badań są punktem wyjściowym do określenia możliwości modyfikacji podstawowych właściwości użytego polisiloksan w hydrofobizacji. Biorąc pod uwagę mikroporowatą strukturę materiałów ceramicznych oraz rozmiar nanocząstek środka hydrofobizującego każda, nawet minimalna zmiana

podstawowych właściwości reologicznych nanopolimeru jest istotna dla procesu wnikania polisiloksanu w np. cegłę ceramiczną i tworzenia na jej powierzchni szczelnej powłoki uniemożliwiającej wnikanie wody w głębsze warstwy danego materiału. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że zmniejszenie lepkości oraz napięcia powierzchniowego badanych polimerów wynika zarówno z chemicznego jak i z fizycznego efektu działania na układ ultradźwiękami:

a) charakter chemiczny zjawiska – energia ultradźwięków spowodowała rozbicie pierwotnej struktury polisiloksanu; w przypadku polimeru II, na skutek działania naprężeń ścinających nastąpił rozpad układu złożonego z aglomeratów i znajdującego się w początkowej fazie w spoczynku – zjawisko to związane jest z rozerwaniem obecnych w roztworze polimeru wiązań wodorowych i sił van der Waalsa pomiędzy nanocząsteczkami; rozpad ten powoduje zmniejszanie lepkości i napięcia powierzchniowego; w polimerach III, IV i V dodatkowo nastąpiła aktywacja nanokrzemionki – na skutek rozerwania połączeń w pierwotnym układzie nanopolimeru, na drodze reakcji chemicznych możliwe było włączenie nanokrzemionki w strukturę polisiloksanu – czynnikiem przyspieszającym reakcję była podwyższona temperatura; w efekcie powstała nowa struktura, która ze względu na zmienione właściwości reologiczne może łatwiej wnikać w pory materiału ceramicznego.

b) charakter fizyczny zjawiska – energia ultradźwięków powoduje gwałtowną zmianę ciśnienia oraz temperatury na skutek ruchu i drgań cząsteczek – zmiany te powodują dezintegrację ciekłej fazy polimeru, jego częściowe przetopienie oraz powstawanie pęcherzyków par cieczy (polimeru) oraz gazów rozpuszczonych w roztworze – tlenu i azotu; jednocześnie na skutek dynamicznego charakteru oddziaływań ultradźwięków pęcherzyki zapadają się – proces tworzenia i zapadania pęcherzyków to kawitacja – efektem jest tworzenie wolnych rodników co ma wpływ na reakcje chemiczne zachodzące w polimerze – np. w/w połączenie nanokrzemionki z łańcuchami polisiloksanów; zmniejszenie lepkości wynika ze zmian tarcia pomiędzy cząsteczkami, podwyższonej temperatury oraz prędkości ścinania pomiędzy poszczególnymi warstwami badanej cieczy – szybkość zmiany lepkości jest w tym przypadku ściśle powiązana z prędkością rozchodzenia fal w danym ośrodku – mniejsza prędkość i natężenie fal powoduje wolniejszy spadek lepkości i napięcia powierzchniowego; wyłączenie źródła fal powoduje powrót zdeintegrowanego układu do stanu pierwotnego, co w dużej mierze związane jest ze spadkiem temperatury roztworu polimeru, jednak zmiany te zachodzą wolniej co wpływa na fakt, że właściwości reologiczne nie wracają do wartości początkowych; zjawisko to jest charakterystyczne dla układów tiksotropowych.

Istotnym do zaznaczenia faktem jest także, że pomimo dodatku nanokrzemionki, a więc w konsekwencji pomimo zwiększeniu masy molowej w danej objętości polimeru nie zaobserwowano zwiększenia gęstości polimerów. Nie ma także ścisłej zależności pomiędzy zawartością nanokrzemionki a wartością napięcia powierzchniowego – największa wartość współczynnika napięcia powierzchniowego uzyskał roztwór z dodatkiem 1% napelnacza.

4. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników badań należy stwierdzić, że nanokrzemionka jako napełniacz nanopolimeru nieorganicznego (polisiloksanu) jest skutecznym dodatkiem, który korzystnie wpływa na zmianę podstawowych właściwości reologicznych polimeru. Należy zauważyć także, że skuteczność dodatku napełniacza w dużej mierze zależy od sposobu dezintegracji początkowej struktury polimeru – w tym przypadku wykorzystana została energia ultradźwięków. Ultradźwięki są metodą pozwalającą na rozbicie wyjściowej struktury polisiloksanu i wejście nanokrzemionki w skład sieciowania przestrzennego polimeru.

Zmiana właściwości reologicznych wpływa na sposób wnikania polimeru w pory materiału ceramicznego i w konsekwencji na wytworzenie na powierzchni np. cegły ceramicznej powłoki hydrofobizującej. Należy przy tym zauważyć, że poddawany dezintegracji ultradźwiękami polimer charakteryzuje się właściwościami tiksotropowymi – również w przypadku dodatku napełniacza.

Przeprowadzenie badań wymaga dużej dokładności, zwłaszcza w zakresie kontroli temperatury, w której wykonywane są pomiary – temperatura jest głównym czynnikiem wpływającym na wartość lepkości danej cieczy.

Otrzymane wyniki stanowią podstawy do analizy możliwości wykorzystania innych rodzajów napełniaczy (organicznych i nieorganicznych), które jako dodatki do środków hydrofobizujących mogą znacznie zwiększyć skuteczność tego sposobu ochrony przed wilgocią obiektów zabytkowych.

Literatura

- Rabek J. F., *Współczesna wiedza o polimerach*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013, s. 5–70, 203–205.
- Kelar K., Ciesielska D., *Fizykochemia polimerów. Wybrane zagadnienia*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1997, s. 7–40.
- Czarnecki L., *Betony żywiczne*, Arkady, Warszawa 1982.
- Hop. T., *Betony modyfikowane polimerami*, Arkady, Warszawa 1976.
- Łukaszewicz J. W., *Badania i zastosowanie związków krzemoorganicznych w konserwacji zabytków kamiennych*. UMK Toruń, 2002
- Fic. S., Barnat-Hunek D., *The Effectiveness of Hydrofobisation of Porous Building Material by Using the Polymers and Nanopolymers Solution*. IMSE CN1002 Vol. 2 No. 2, 2014, p. 93–98.
- Hall C., Hoff W. D., Nixon H. R., *Water Movement in Porous Building Materials – VI Evaporation and Drying Brick and Block Materials*. Building and Environment, (1984). 19.1 p. 13–20.
- Barnat-Hunek D., *Hydrofobizacja opoki wapnistej w obiektach zabytkowych Kazimierza Dolnego*. Wyd. Uczelniane, Politechnika Lubelska, Lublin (2010), 10–11, 96.
- Bielański A., *Podstawy chemii nieorganicznej*, T. 2, PWN, Warszawa 2002, s. 724–727
- Szlezzyngier W., *Podstawy reologii polimerów*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1994, s. 5–60.
- Dziubiński M., Kiljański T., Sęk J., *Podstawy reologii i reometrii płynów*, Politechnika Łódzka, Łódź 2009, s. 5–95.
- Schramm G., *Reologia – podstawy i zastosowania*, Ośrodek Wydawnictw Naukowych, Poznań 1998, s. 7–75.
- Pomiar lepkości cieczy za pomocą viskozymetru Ostwalda; Pomiar napięcia powierzchniowego cieczy metodą stalagmometryczną – instrukcje do badań laboratoryjnych*, Katedra Fizyki i Biofizyki, Uniwersytet Warmiński – Mazurski.

Effect of ultrasonic energy on the rheological properties of nanopolymers

Stanisław Fic¹, Andrzej Szewczak ²

¹ *Department of Civil Engineering, Lublin University of Technology, e-mail: s.fic@pollub.pl*

² *Department of Civil Engineering, Lublin University of Technology, e-mail: a.szewczak@pollub.pl*

Abstract: The development of polymer chemistry (organic and inorganic) allows for the use of these compounds in many areas of daily life. One of the uses of polymers is their use as a means of waterproofing porous building materials. The rheological properties of the polymers used are of great importance in the context of penetration into the porous structure of the ceramic surface sealed construction and production of coatings to protect against ingress of moisture. The effect is to protect these materials against degradation due to changes in the degree of humidity and temperature. This is particularly important for the protection of historic buildings. Any change in the fundamental rheological properties of polymers – viscosity and surface tension - affects the ease of filling the pores of the polymer. These changes can be achieved by the addition of so-called. i.e. auxiliaries. fillers. Initiate the reaction with the molecules of the polymer particles can include fillers by sonochemical reaction. This article presents the results of research on the possibility of modifying the rheological properties nanopolimeru alkilosiloxanes nanofiller addition – nanosilica. Initiating factor chemical reactions, and further causing the change of viscosity and surface tension so the resulting mixture was ultrasound energy with frequency 24kHz. In addition, the thixotropic properties of the polymers was determined at different levels of filler.

Keywords: polymers, filler, siloxanes, viscosity, surface tension, thixotropy, ultrasounds