

Otrzymywanie lekkich kruszyw szklano-krystalicznych na bazie surowca perlitowego i odpadu perlitu ekspandowanego

DR INŻ. ELŻBIETA ŻELAZOWSKA, DR INŻ. PAWEŁ PICHNIARCZYK, MGR INŻ. SEBASTIAN SACHA,
MGR INŻ. JÓZEF ZAWIŁA, MGR INŻ. JOANNA RYBICKA-ŁADA
INSTYTUT CERAMIKI I MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH,
ODDZIAŁ SZKŁA I MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH W KRAKOWIE

Jednym z surowców o szerokim potencjale zastosowań, w tym dla przemysłu materiałów budowlanych, jest perlit. Surowy perlit jako skała krzemianowa o charakterze szkła naturalnego jest materiałem chemicznie obojętnym, o pH równym ok. 7. Pod względem chemicznym, perlit stanowi uwodniony glinokrzemian potasowo-sodowy, zawierający także inne pierwiastki chemiczne. W jego składzie przeważa krzemionka SiO_2 (65-75%), a ponadto zawiera on tlenki: glinu (Al_2O_3 , 10-18%), sodu i potasu ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$, 6-9%), magnezu i wapnia ($\text{MgO} + \text{CaO}$, 2-6%) oraz żelaza (Fe_2O_3 , 1-5%). Pod względem mineralogicznym perlit stanowi przeobrażoną magmową skałę wylewną zbudowaną ze szkliwa wulkanicznego, utworzoną w dawnych epokach geologicznych i zawierającą w swojej strukturze od 2 do 6% obj. wody w formie związanej.

Skład chemiczny i właściwości perlitu mogą się różnić w zależności od złoża tego surowca. W tabeli 1 podano najczęściej występujące wartości dla podstawowych właściwości fizyko-chemicznych [1].

Perlit jest w dużych ilościach pozyskiwany i przetwarzany na potrzeby światowe. Najszersze zastosowanie znalazł on w produkcji materiałów dla budownictwa, głównie w charakterze dodatków zmniejszających gęstość i wypełniaczy mas wykończeniowych.

Ponadto materiał ten może również być wykorzystywany jako komponent innych materiałów dla budownictwa, np. jako dodatek do zestawów szklarskich, zastępujący częściowo surowce i/lub stłuczkę szklaną, jako baza do otrzymywania szkła i szkliw, itp.

Dane z literatury [2-11] na temat szkliw naturalnych, w tym perlitu, i ich przetworstwa są liczne, zarówno w postaci artykułów w czasopiśmie naukowych, jak i patentów. Stosunkowo najczęściej opisywane badania i próby zastosowań dotyczą szkła piankowego, porowatych materiałów izo-

lacyjnych i przegród z zastosowaniem takich materiałów. Skład i sposób ich otrzymywania jest jednak w zdecydowanej większości przedmiotem patentów [5-12] lub dotyczy wykorzystania lokalnych złóż występujących w danym kraju, co powoduje konieczność prowadzenia własnych badań dla opracowania użytecznych rozwiązań poszerzających możliwości wykorzystania rudy perlitowej i odpadu drobnoziarnistego powstającego przy jej przetworstwie.

Podczas procesu ekspansji surowego perlitu powstają frakcje o zróżnicowanej granulacji. Oprócz właściwego produktu, tj. ściśle określonych frakcji perlitu ekspandowanego, wytwarza się również duża ilość (sięgająca nawet 50% materiału wsadowego) pyłu

STRESZCZENIE

Rozwój przemysłu materiałów budowlanych wymaga poszukiwania nowych, tańszych materiałów i surowców o lepszych właściwościach niż tradycyjnie stosowane. Jednym z surowców, na bazie którego możliwe jest uzyskanie nowych materiałów mogących mieć szerokie zastosowanie w branży materiałów budowlanych jest perlit. Podczas procesu jego ekspansji obok ściśle określonych frakcji perlitu ekspandowanego powstaje również znaczna ilość pyłu perlitowego o uziarnieniu $< 0,1$ mm, który nie znajdując zastosowania stanowi uciążliwy odpad generujący koszty składowania. Mając to na uwadze Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych – Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie podjął prace badawcze w celu opracowania na bazie surowego perlitu i odpadowego pyłu perlitowego nowych produktów przydatnych dla budownictwa, w tym szczególnie materiałów o charakterze lekkich kruszyw szklano-krystalicznych do produkcji elementów budowlanych.

SUMMARY

Preparing of light weight glass-ceramic aggregates on a base of raw perlite and waste fraction of expanded perlite

The requirements for new and less expensive raw materials and components is connected with the continuous development in building technologies. The perlite is one of the most promising raw material which have potential to be widely applicable in obtaining the new products for building industry. Additionally, as a secondary product of the perlite expansion process the fraction of expanded perlite with very small grain size $< 0,1$ mm, is produced as a waste material. The Institute of Ceramics and Building Materials – Division of Glass Building Materials has undertaken research work on technology of the new products, especially light weight glass-ceramic aggregates for building industry use, prepared on a base of raw perlite and waste fraction of the expanded perlite.

Tabela 1. Typowe właściwości fizyczne perlitu

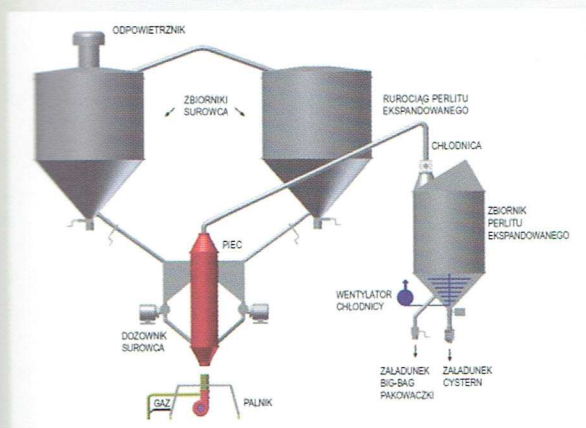
Typowe właściwości fizyczne	
Kolor	biały
Współczynnik załamania światła	1,5
Ciężar właściwy	2,2 - 2,4 G/cm ³
Punkt mięknięcia	871-1093°C
Punkt topienia	1260-1343°C
Ciepło właściwe	387 J/kg•K
Przewodność cieplna (24°C)	$\lambda = 0,04-0,06$ W/m•K

SŁOWA KLUCZOWE

perlit, odpad perlitu, lekkie kruszywa, materiały szklano-krystaliczne

KEYWORDS

perlite, waste fraction of perlite, light weight building aggregates, glass-ceramic materials



Rys. 1. Przykładowa linia do ekspansji perlitu [18]

perlitowego o uziarnieniu < 0,1 mm, który wymaga odseparowania od właściwych grubszych frakcji. Ze względu na brak zastosowania, pył ten stanowi obecnie odpad, generujący koszty składowania i stanowiący zagrożenie dla środowiska naturalnego.

Na rysunku 1 można zobaczyć przykładowy schemat linii do ekspansji perlitu.

Przy szybkim podgrzaniu do temperatury powyżej 850-870°C, ziarna rudy pęcznią, gdyż woda związana gwałtownie przechodzi w stan pary, tworząc liczne drobne pęcherzyki, czemu ekspandowany perlit zawdzięcza niski ciężar nasypowy i dużą objętość.

Gęstość pozorną perlitu surowego (rudę) wynosi ok. 1300 kg/m³, podczas gdy perlitu ekspandowanego już tylko 50-150 kg/m³.

Z analizowanych danych zawartych w literaturze [13-17] wynika, że przedmiotem badań były już tworzywa szklano-krystaliczne otrzymywane na bazie takich materiałów mineralnych lub odpadowych, jak bazalt, popioły ze spalania węgla, pyły dymnicowe, lokalne złoża surowców naturalnych, jak np. bułgaryt, łupki czy zeolity. Jednak w dostępnej literaturze nie znaleziono opisów otrzymywania tworzyw szklano-krystalicznych na bazie perlitu. W związku z tym badania i próby doświadczalne otrzymywania takich tworzyw wykonane w ramach niniejszej pracy przyczyniają się do istotnego poszerzenia stanu odnośnie możliwości otrzymywania nowych materiałów na bazie perlitu i ich wykorzystania w produkcji materiałów budowlanych.

Część doświadczalna

Charakterystyka surowców perlitowych

W badaniach nad otrzymywaniem lekkich kruszyw szklano-krystalicznych podstawowy surowiec stanowił perlit surowy. W niektórych próbach stosowano też perlit surowy z dodatkiem wybranej frakcji odpadu perlitu po ekspansji. Na rysunku 2, dla porównania objętości, pokazano 5-gramowe próbki perlitu surowego i odpadowego pyłu perlitowego.

Dla stosowanych do badań materiałów perlitowych wykonano analizy składu chemicznego (tab. 2). Gęstość nasypowa drobnopiękarnego odpadu perlitowego wynosiła 0,07 g/cm³ podczas gdy dla surowego perlitu - 0,11 g/cm³.

W próbach otrzymywania porowatych materiałów



Rys. 2. Porównanie objętości 5-gramowych próbek rudy perlitu i odpadowego pyłu perlitowego

Tabela 2. Analiza składu chemicznego surowego perlitu i odpadu perlitu ekspandowanego

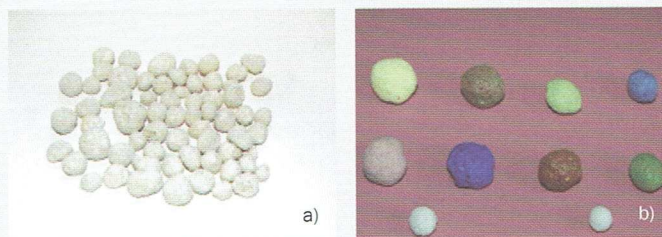
Oznaczany składnik	Zawartość w [%] mas.	
	Surowy perlit	Odpad perlitu ekspandowanego (frakcja < 0,1 mm)
Straty prażenia	3,79	1,67
SiO ₂	71,34	74,60
CaO	1,64	0,87
MgO	0,11	0,05
Al ₂ O ₃	14,04	14,39
Fe ₂ O ₃	1,48	1,20
TiO ₂	0,09	0,07
Na ₂ O	3,34	2,29
K ₂ O	4,02	4,67
Inne tlenki o zawartości < 0,04% (w tym Ba, Sr, Zr, Ni, Mn, W, Rb)	0,15	-

szklano-krystalicznych jako dodatki spieniające stosowano węgiel aktywny C oraz węgiel krzemu SiC. W charakterze nukleatora krystalizacji stosowano tlenek tytanu TiO₂. Składniki modyfikujące skład materiałów perlitowych stanowiły m.in. węgiel sodu Na₂CO₃, węgiel wapnia CaCO₃ i wodorotlenek wapnia Ca(OH)₂, dwuwodny fosforan (diwodofosforan) sodu NaH₂PO₄·2H₂O i dwuwodny fosforan dwusodowy Na₂HPO₄·2H₂O. Ponadto, w poszukiwaniu surowca fosforanowego alternatywnego i możliwie tańszego od fosforanów sodowych, przeprowadzono rozeznanie odnośnie możliwych do zastosowania materiałów odpadowych. Jako środki ułatwiające obróbkę mechaniczną i chemiczną zestawów surowcowych zastosowano szkło wodne sodowe oraz nasycony roztwór sody.

Otrzymywanie tworzyw szklano-krystalicznych

Do prób syntezowania materiałów szklano-krystalicznych wytypowano surowy perlit mielony, o uziarnieniu ok. 0,063 mm. Próby rozpoczęto od zestawów surowcowych zawierających: surowy perlit - 100 g, Na₂CO₃ - 10,3 g, CaCO₃ - 44,0 g, Fe₂O₃ - 3,0 g.

Do składu podstawowego dodawano węgiel aktywny jako materiał spieniający (0,3-1,0%), TiO₂ jako nukleator krystalizacji (0,5-2%), oraz surowiec fosforanowy w postaci uwodnionego fosforanu sodowego (jedno- i dwusodowego) lub szlamu fosforanowego. Z dodatkiem roztworu sodowego szkła wodnego ręcznie formowano granule o średnicy ok. 0,5-0,8 cm, które poddawano wypalaniu w piecu elektrycznym laboratoryjnym w temperaturze 850-900°C. Pomimo dużej porowatości uzyskiwane materiały granulowane nie wykazywały kruchości. Porównanie stopnia porowatości materiałów otrzymywanych ze wstępnych prób z różną zawartością węgla pozwoliło ustalić, że jego optymalny dodatek powinien wynosić ok. 1%. Do zestawu surowcowego stosowano też dodatek wodorotlenku wapnia Ca(OH)₂ lub węglanu wapnia, w przeliczeniu na tę samą ilość wprowadzanego CaO. Wodorotlenek wapnia ma postać pylistą, podczas gdy węgiel wapnia ma stosunkowo grube uziarnienie.



Rys. 3. Typowe próbki tworzywa szklano-krystalicznego: a) o barwie naturalnej, b) barwionego w masie

Wprowadzenie CaO w postaci wodorotlenku wapnia ułatwiło w związku z tym mieszanie składników, co pozwoliło zwiększyć jednorodność zestawów surowcowych. Ponadto wodorotlenek wapnia ulega rozkładowi termicznemu w temperaturze 600°C, o przeszło 200°C niższej niż węglan wapnia (825°C) i dzięki obecności grup hydroksylowych wykazuje większą reaktywność w podwyższonych temperaturach. Dzięki temu możliwa jest poprawa stopnia spęcznienia przy równoczesnym zmniejszeniu ilości porów otwartych na powierzchni otrzymywanych materiałów oraz skrócenie czasu ogrzewania dla osiągnięcia właściwej temperatury wypału.

Biorąc pod uwagę problemy ze składowaniem i brakiem zastosowań odpadu perlitu ekspandowanego, przeprowadzono także próby otrzymywania materiałów szklano-kryształicznych z dodatkiem odpadu perlitowego, w celu ustalenia możliwości jego wykorzystania i wpływu na właściwości otrzymywanych materiałów. Próby wykonywano na bazie surowego perlitu na próbkach zestawów surowcowych, w których część surowego perlitu, w ilości 5-25% zastępowano odpadem perlitowym. Ze względu na postać pylistą i bardzo niski ciężar nasypowy a w związku z tym dużą objętość w stosunku do masy, odpad jest trudniejszy w stosowaniu niż pozostałe

składniki zestawu surowcowego. Tym niemniej próby z zastosowaniem odpadu wykazały, że w przypadku użycia perlitu surowego z dodatkiem perlitu odpadowego, zamiana rzędu 10-15% jego ilości na odpad nie powoduje zmniejszenia porowatości.

Zestawy surowcowe zoptymalizowane w wyniku prób laboratoryjnych wytypowano do prób granulowania w skali półtechnicznej. Wytworzony granulata poddano następnie wypalaniu w temperaturze ok. 930-940°C w piecu obrotowym do wypału klinkieru portlandzkiego o wydajności rzędu 40-50 kg/h. W wyniku tych prób otrzymano lekkie porowate tworzywo szklano-kryształiczne w formie kruszywa (rys. 3).

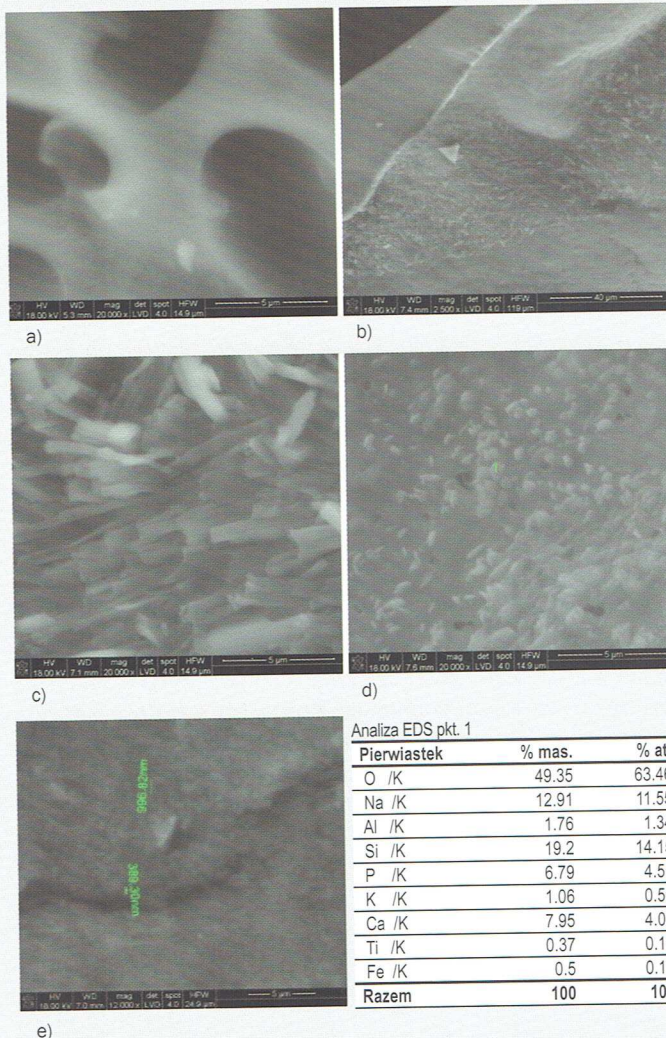
W ramach prób w skali laboratoryjnej przeprowadzono również próby barwienia otrzymywanych porowatych tworzyw szklano-kryształicznych m.in. tlenkami kobaltu i chromu oraz przy użyciu wybranych pigmentów ceramicznych. Na rysunku 3 pokazano również wyniki niektórych laboratoryjnych prób barwienia.

Wyniki badań

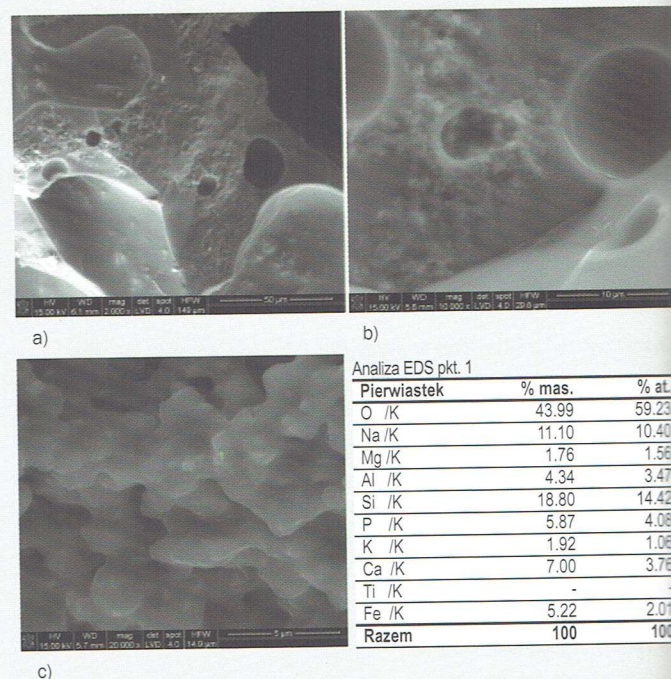
Badania morfologii, składu i struktury metodami SEM/EDS i XRD

Próbki otrzymywanych materiałów poddano badaniom metodami elektronowej mikroskopii skaningowej ze spektroskopią rozproszonego promieniowania rentgenowskiego (SEM/EDS) oraz dyfraktoometrii rentgenowskiej (XRD). Na rysunkach 4 i 5 pokazano odpowiednio wyniki badania morfologii metodą SEM/EDS materiałów wypalanych w 900 i 1000°C.

Badania metodą SEM/EDS potwierdziły, że przy zastosowaniu opracowanych składów zestawów surowcowych poddanych odpowiedniej obróbce mechano-chemicznej i wypalanych w zakresie temperatur 850-1000°C mogą być otrzymywane porowate materiały szklano-kryształiczne o charakterze lekkich kruszyw.



Rys. 4. Wyniki badania metodą SEM/EDS dla próbki o symbolu materiału szklano-kryształicznego uzyskanego na bazie surowego perlitu - wypał w 900°C: a) mikrofotografia SEM z przekroju próbki z widocznymi porami; b) mikrofotografia SEM z powierzchni próbki z widoczną krystalizacją; c) mikrofotografia SEM z przekroju próbki z widocznymi produktami krystalizacji, przy powiększeniu 20 000x; d) mikrofotografia SEM z powierzchni próbki z widoczną krystalizacją i zaznaczonym miejscem (pkt. 1) analizy EDS; e) mikrofotografia SEM z innego mikroobszaru powierzchni próbki z bardziej rozwiniętą krystalizacją i zaznaczonymi rozmiarami typowych krystalitów; f) wyniki analizy EDS dla zaznaczonego mikroobszaru (pkt. 1)



Rys. 5. Wyniki badania metodą SEM/EDS dla próbki materiału szklano-kryształicznego (wypał w 1000°C), uzyskanego na bazie perlitu surowego mielonego i odpadowego szlamu fosforanowego: a) mikrofotografia SEM z przekroju próbki z widocznymi porami i krystalizacją przy powiększeniu 350x; b) mikrofotografia SEM z przekroju próbki z widocznymi porami i produktami krystalizacji, przy powiększeniu 10 000x; c) mikrofotografia SEM z przekroju próbki z widocznymi produktami krystalizacji, przy powiększeniu 20 000x, z zaznaczonym miejscem (pkt. 1) analizy EDS; d) wyniki analizy EDS w zaznaczonym punkcie mikrofotografii (c)

Tabela 3. Właściwości fizyczne uzyskanego tworzywa szklano-kryształicznego

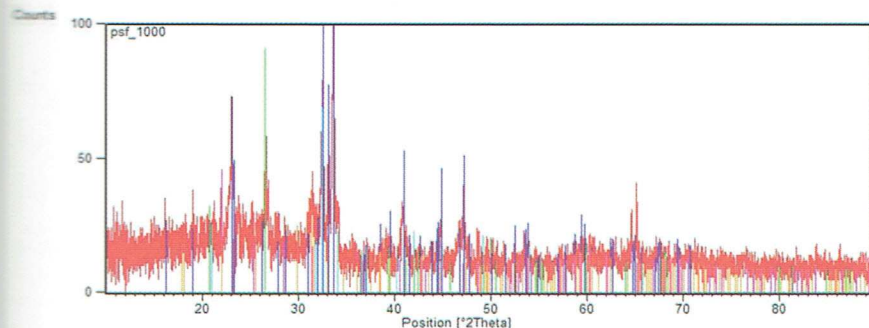
Właściwości	Tworzywo szklano-kryształiczne
Gęstość wyznaczona metodą wagi hydrostatycznej wg*) [g/ml]	0,680
Nasiąkliwość po 24 h wg PN-EN 1097-6 [%]	30
Odporność na miażdżenie wg PN-EN 13055-1 [N/mm ²]	1,87

*1) PB-BF-05 - wyd. 4. z dnia 10. 02. 2010 r. pt.: „Badanie gęstości szkła metodą wagi hydrostatycznej”

Dla porównania struktury fazowej, próbki materiałów wypalanych w różnych temperaturach poddano badaniom rentgenograficznym (XRD). Przykładowo, rysunek 6 zawiera wyniki badania metodą XRD typowe dla materiałów otrzymywanych przy zastosowaniu perlitu surowego i fosforanu jednosodowego $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ wypalanych w temperaturze 1000°C (próbka psf 1000).

Rentgenogramy i wyniki analizy fazowej XRD wskazują, że badane materiały zawierają znaczne ilości faz krystalicznych, jakkolwiek o różnym składzie, przy czym w próbkach z udziałem perlitu niemielonego i fosforanu jednosodowego obserwuje się więcej silniejszych pików od faz krystalicznych. Przykładowo, w rentgenogramie próbki „psf 1000” otrzymanej z perlitu surowego niemielonego i fosforanu jednosodowego (rys. 6), obecne są piki od SiO_2 w postaci kwarcu i krystalitu (zaznaczone odpowiednio kolorem zielonym i ciemnoróżowym), a ponadto od fosforanu sodowo-wapniowego NaCaPO_4 (odpowiadająca faza krystaliczna – renanit, zaznaczone kolorem ciemnoniebieskim) oraz fosforanu sodowo-magnezowego NaMgPO_4 (kolor jasnoniebieski) i węgla potasowego K_2CO_3 (kolor pomarańczowy). Rentgenogramy próbek otrzymanych z perlitu i szlamu fosforanowego, zawierały linie dyfrakcyjne od faz krystalicznych o znacznie bardziej złożonym składzie, zwłaszcza w przypadku pików pochodzących od fosforanów, reprezentowanych m.in. przez NaCaPO_4 i $\text{Na}_{2,43}\text{Al}_{0,19}(\text{PO}_4)$. Na uwagę zasługuje brak krystalicznych faz SiO_2 , co w tych próbkach należy wiązać z jego obecnością w formie amorficznej. Biorąc pod uwagę skład chemiczny i postać występowania, odpadowy szlam fosforanowy stanowi materiał o wysokiej reaktywności. Sprzyja to zapoczątkowaniu reakcji już w niższych temperaturach i tłumaczy większą ilość faz krystalicznych o charakterze raczej niższej temperatury.

Wyniki badań metodą SEM/EDS w pełnej zgodności z wynikami badań rentgenograficznych potwierdziły, że w zastosowanych



Rys. 6. Rentgenogram i wyniki analizy fazowej dla próbki materiału szklano-kryształicznego otrzymanego przez wypalanie w temperaturze 1000°C, przy zastosowaniu rudy perlitowej i fosforanu jednosodowego $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

warunkach obróbki termicznej, wszystkie badane materiały uzyskały charakter szklano-kryształiczny przy równoczesnej znacznej porowatości. Wskazują one, że tak otrzymywane materiały mają korzystne właściwości strukturalne pod względem zastosowań w charakterze lekkich kruszyw dla budownictwa.

Właściwości fizyczne otrzymywanych tworzyw szklano-kryształicznych

Wymagania dla kruszyw lekkich uzyskiwanych w wyniku procesu naturalnego, przemysłowego lub z recyklingu oraz mieszanek tych materiałów stosowanych do betonu, zapraw i wypełnień drogowych, w drogownictwie i obiektach inżynierskich podaje norma PN-EN 13055-1. Dla sprawdzenia właściwości fizycznych otrzymanego granulatu tworzywa szklano-kryształicznego wykonano badania gęstości, nasiąkliwości i odporności na miażdżenie. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 3.

Wyniki badań podane w tabeli 3 wskazują, że wytworzone tworzywa szklano-kryształiczne mogą znaleźć zastosowanie jako kruszywo lekkie. Tworzywa te odznaczają się też korzystnymi parametrami w zakresie odporności mechanicznej i nasiąkliwości.

W celu oceny możliwości zastosowania otrzymanego kruszywa szklano-kryształicznego do wytwarzania betonów lekkich, wykonano badania polegające na określeniu takich własności jak: gęstość objętościowa, odporność na miażdżenie, gęstość świeżego betonu, gęstość stwardniałego betonu w stanie nasyconym, zawartość powietrza, wytrzymałość po 7 i 28 dniach dojrzewania, nasiąkliwość, odporność na ścieranie wg Böhme'go. Dla porównania przeprowadzono analogiczne badania dla dwóch komercyjnych kruszyw lekkich: Leca KERAMZYTU i PORAVERU oraz betonów wykonanych na ich bazie. Wyniki tych badań przedstawiono w tabeli 4.

Do badań przyjęto receptury mieszanki betonowej o stałej ilości cementu wynoszącej 380 kg/m³, punkcie piaskowym/kruszywa równym 40:60% oraz stały opad stożka ok. 17 cm. Zastosowano piasek kwarcowy o frakcji 0-2 mm oraz wyseparowane frakcje kruszyw lekkich 2-4 mm i 4-8 mm.

Przeprowadzone badania kruszywa wskazują, że otrzymane kruszywo szklano-kryształiczne można zaliczyć do kruszyw lekkich. Gęstość objętościowa badanego kruszywa wynosi 1,149 Mg/m³ (wymaganie normowe poniżej 2,00 Mg/m³). Otrzymane kruszywo szklano-kryształiczne charakteryzuje się jednakże najwyższą wartością gęstości objętościowej spośród przebadanych kruszyw. Uzyskana nasiąkliwość kruszywa szklano-kryształicznego jest porównywalna z nasiąkliwością kruszywa keramzytowego. Kruszywo keramzytowe jest jednym z najczęściej stosowanych na świecie kruszyw do wykonywania betonów lekkich konstrukcyjnych.

Na szczególną uwagę zasługuje wysoka odporność na miażdżenie kruszywa szklano-kryształicznego, wynosząca 1,87 N/mm², najwyższa spośród badanych kruszyw. Dla porównania kruszywo PORAVER charakteryzuje się odpornością na miażdżenie 1,18 N/mm² a kruszywo keramzytowe 1,39 N/mm².

Według normy PN-EN 206-1:2003 betony lekkie to betony charakteryzujące się gęstością od 800 kg/m³ do 2000 kg/m³, obejmujące klasy wytrzymałości od LC 8/9 do LC 80/88.

Przeprowadzone wstępne badania betonów wykazały, że dla opracowanej receptury w wyniku zastosowania kruszywa szklano-kryształicznego można uzyskać klasę

Tabela. 4. Właściwości betonu lekkiego z udziałem wytworzonego kruszywa – porównanie

Właściwości	Kruszywo szklano-kryształiczne	Kruszywo PORAVER	Kruszywo Leca KERAMZYT
Gęstość objętościowa [Mg/m ³] wg PN-EN 1097-6+:2002	1,149	0,286	0,548
Nasiąkliwość po 24 h [%] wg PN-EN 1097-6:2002	22,64	46,98	29,51
Odporność na miażdżenie [N/mm ²] wg PN-EN 13055-1:2002	1,87	1,18	1,39
Właściwości betonów lekkich na bazie cementu kruszywa szklano-kryształicznego, PORAVERU lub KERAMZYTU			
w/c	0,853	0,512	0,585
Opad stożka [cm] wg PN-EN 12350-2:2011	17,0	16,5	17,0
Gęstość świeżego betonu [kg/m ³] wg PN-EN 12350-6:2011	1740	1220	1350
Gęstość stwardniałego betonu w stanie nasyconym wg PN-EN 12390-7:2011 [kg/m ³]	1790 D1,8	1300 D1,4	1430 D1,6
Zawartość powietrza wg PN-EN 12350-7:2011	9,5	13,0	17,5
Wytrzymałość [MPa] wg PN-EN 12390-3:2011, po: 7 dniach dojrzewania 28 dniach dojrzewania	13,6 18,9 LC 16/18	11,0 11,4 LC 8/9	16,0 19,6 LC 16/18
Nasiąkliwość [%] wg PN-88/B-06250	21,7	23,1	18,1
Odporność na ścieranie wg Böhme'go wg PN-EN 13892-3:2005	16,65	25,59	19,1

wytrzymałości betonu LC 16/18. Przy takiej samej ilości cementu wynoszącej 380 kg/m³ w mieszance betonowej, taką klasę wytrzymałości uzyskano dla kruszywa keramzytowego, natomiast dla kruszywa PORAVER uzyskano o dwie klasy niższą wytrzymałość LC 8/9.

Podsumowanie i wnioski

W ramach niniejszej pracy, przeprowadzono dobór składników zestawów surowcowych do otrzymywania porowatych tworzyw szklano-kryształicznych o charakterze lekkich kruszyw.

W celu uzyskania odpowiednich właściwości fizycznych i chemicznych otrzymywanych materiałów, zestawy surowcowe poddawano odpowiednim zabiegom mechanicznym i chemicznym.

Próby otrzymywania w skali półtechnicznej porowatych tworzyw szklano-kryształicznych z wykorzystaniem opracowanych zestawów surowcowych i odpowiednio dobranych warunków obróbki termicznej, dały pozytywne wyniki. W szczególności, próby te pozwoliły opracować receptury oraz wstępne wytyczne technologiczne do otrzymywania materiałów szklano-kryształicznych o charakterze lekkich kruszyw.

Badania struktury i morfologii (metodą SEM/EDS), składu fazowego (metodą XRD) oraz gęstości materiałów otrzymywanych z prób doświadczalnych w skali od laboratoryjnej do półtechnicznej potwierdziły szklano-kryształiczny charakter i porowatość otrzymywanych tworzyw.

W wyniku prób doświadczalnych i badań stwierdzono, że do ich wytwarzania można stosować zamiennie (przy zachowaniu równoważności składu chemicznego) różne surowce wprowadzające P₂O₅ w tym odpadowe surowce fosforanowe, a także w ograniczonej ilości (do max. 15-20%) pylisty odpad perlitowy.

Istnieją potencjalne możliwości zastosowania tego rodzaju materiałów jako lekkich kruszyw do betonu lub innych materiałów budowlanych posiadających właściwości termoizolacyjne. Ponadto technologia ich produkcji może mieć charakter bezodpadowy, gdyż daje możliwość wykorzystania jako dodatku do zestawu surowcowego odpadów perlitowych istniejących i na bieżąco tworzących się przy ekspansji surowego perlitu.

Prace nad dalszymi możliwościami wykorzystania surowca perlitowego (surowego i odpadu perlitowego oraz innych surowców

i produktów odpadowych) są w trakcie kontynuacji. Materiały opracowane w wyniku realizacji tego etapu prac są przedmiotem zgłoszenia patentowego nr 398641 *Sposób wytwarzania tworzywa szklano-kryształicznego na bazie surowców perlitowych*.

Artykuł był prezentowany podczas Konferencji Naukowo-Technicznej „Przemysł Szklarski 2012” Ustroń, 10-12 października 2012 r.

LITERATURA

- [1] www.perlite.net.(2011)
- [2] Saaakyan E.R.: *Multifunctional foam glasses from volcanic glassy rocks*, „Steklo i Keramika”, 48, 1, (1991), 5-6
- [3] Saaakyan E.R., Badalyan M.G., Danielyan A.S.: *Granulated foamed glass from perlite rocks*, „Steklo i Keramika”, 41, 3, (1984), 3-4
- [4] Fain I.A. et al.: *Production of ultralightweight insulation using perlite at Bogdanovich Refractories Factory*, „Ogneupory”, 10, (1970), 10-13
- [5] Pat. US nr 4 248 810, 1981: *Foamed insulating materials and method of manufacture*
- [6] Pat. US nr 2 946 693, 1960: *Method of making a foamed and expanded product from volcanic glass*
- [7] Pat. US nr 2 956 891, 1960: *Method of making porous products from volcanic glass and alumina*
- [8] Pat. US nr 6 368 527 B1, 2002: *Method for manufacture of foamed perlite material*
- [9] Pat. US nr 5 827 457, 1977: *Method for manufacturing a lightweight ceramic foamed substance*
- [10] Pat. US nr 3 623 938, 1971: *Mineral aggregate insulation board*
- [11] Pat. US nr 3 952 830, 1974: *Mineral aggregate (perlite) acoustical board*
- [12] Pat. US nr 7 459 208 B2, 2008: *Foam glass product*
- [13] Cocić M. et al.: *Glass-ceramics obtained by the crystallization of basalt*, „Science of Sintering”, 42, (2010), 383-388.
- [14] Barbieri L. et al.: *Design, obtaintment and properties of glasses and glass-ceramics from coal fly ash*, „Fuel”, 78, (1999), 271-276
- [15] Pat. US nr 6 661 261 B1, 2003: *Open-cell glass crystalline porous material*
- [16] Sviretcova M., Bogdanov B.: *A study of the possibility to use natural rock materials in the synthesis of building glass-ceramics*, Annual Assen Zlatarov University, Burgas, Bulgaria, 32, 1, (2008), 73-76
- [17] Vereshchagin V.I., Sokolova S.N.: *Formation of porous structure in a granulated glass ceramic material from zeolite-bearing rock with alkali additives*, „Glass and Ceramics”, 63, 7-8, (2006), 227-229
- [18] tomar.org.pl