

## MODIFICATION OF AUTOCLAVED AERATED CONCRETE WITH RECYCLED MATERIALS

### MODYFIKACJA AUTOKLAWIZOWANEGO BETONU KOMÓRKOWEGO MATERIAŁAMI RECYKLINGOWYMI

#### Abstract

The paper compares the effect of additions such as plastic waste and natural process rejects on physical and mechanical properties and on phase composition of autoclaved aerated concrete (AAC) products. Two modifiers were used: pulverized high impact polystyrene regranulate (HIPS) and chalcidonite dust as a waste product from the chalcidonite production site. The analysis indicated that the incorporation of HIPS improved the physical and mechanical properties of the modified AAC with the best results. The addition of 30% substrate increased the compressive strength by 28% and decreased the water absorption coefficient by 38% compared with the specimens containing chalcidonite. The modified AAC phase composition was studied through XRD.

**Keywords:** autoclaved aerated concrete, high impact polystyrene (HIPS), chalcidonite dust, modification

#### Streszczenie

Celem artykułu jest porównanie wpływu dodatków w postaci odpadów z tworzyw sztucznych i naturalnych odrzutów po produkcyjnych na właściwości fizykomechaniczne oraz skład fazowy wyrobów z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK). Do modyfikacji użyto regranulatu polistyrenu wysokoudarowego (HIPS) poddanego pulweryzacji oraz mączki chalcidonitowej powstałej jako odpad poprodukcyjny w kopalni chalcidonitu. Analiza wyników wykazała, iż najbardziej korzystny wpływ na poprawę właściwości fizykomechanicznych modyfikowanego ABK ma dodatek w postaci HIPS-u. Substrat w ilości 30% spowodował wzrost wytrzymałości na ściskanie o 28% oraz obniżenie współczynnika absorpcji wody o 38% w porównaniu z próbkami zawierającymi chalcidonit. Przeprowadzono również analizę składu fazowego badanych wyrobów za pomocą dyfraktometrii rentgenowskiej (XRD).

**Słowa kluczowe:** autoklawizowany beton komórkowy, polistyren wysokoudarowy (HIPS), mączka chalcidonitowa, modyfikacja

#### 1. Introduction

Autoclaved aerated concrete (AAC) is one of the most commonly used building materials in Poland for erecting walls. Its advantages include low bulk density range (300–1000 kg/m<sup>3</sup>), high thermal insulation (thermal conductivity  $\lambda = 0.085\text{--}0.185$  W/(m·K)) and high fire resistance. Even though this material has a relatively high compressive strength (2.0–7.4 MPa) at such low densities, it is not high enough to provide stiff competition for other wall building materials [1]. Modification of AAC composition may be one of possible

#### 1. Wprowadzenie

Autoklawizowany beton komórkowy (ABK) należy do najpopularniejszych materiałów budowlanych stosowanych w Polsce do wznoszenia ścian. Do jego zalet można zaliczyć niską gęstość objętościową (300–1000 kg/m<sup>3</sup>), wysoką izolacyjność termiczną (przewodzenie ciepła:  $\lambda = 0,085\text{--}0,185$  W/(m·K)) i dużą ognioodporność. Materiał ten posiada również stosunkowo wysoką wytrzymałość na ściskanie (2,0–7,4 MPa), jak na tak niską gęstość objętościową, lecz nie dość wysoką, by był pod tym względem konkurencyjny z innymi ściennymi materiałami budow-

options for the improvements of its physical and mechanical characteristics. The aim of this study was to improve AAC physical and mechanical properties by incorporating additives such as HIPS and chalcedonite. The use of these substrates for modification of building materials intended for walls certainly contributes to environmental protection.

## 2. Characteristics of the materials used

Polymers have long been used in building materials modifications. These natural or synthetic chemical compounds made up of macromolecules are formed through the polymerization of ethylene or its derivatives (vinyl monomers) [2]. High costs of polymer production are a factor in using polymer waste derived from plastics. Other factors that encourage the use of the waste include its growing amount and poor biodegradability of plastics, which is problematic from both environmental and economic standpoints [3].

One of the oldest polystyrenes is high impact polystyrene (HIPS). HIPS is a copolymer, obtained through the grafting reaction on polybutadiene (PB) and polystyrene (PS), with improved impact characteristics relative to non-modified PS. High impact polystyrene shows low density, high stiffness and resistance to cracking [4, 5]. The HIPS used in the tests was the regranulate pulverized to a size of 630  $\mu\text{m}$ , with a bulk density of 1.05  $\text{g}/\text{cm}^3$  [6].

The building material industry is applying waste products such as stone waste powder to decrease the use of irrecoverable sources of natural minerals [7]. Management of this type of waste is beneficial for the environment and reduces the cost of building materials production [8, 9].

Chalcedonite is in a group of sedimentary, rich in silica rocks which are unique due to a very limited number of locations. In Poland, chalcedonite occurs in the deposits of Dęborzynka, Gapinin, Lubocz and Teofilów in the area of Tomaszów Mazowiecki and Nowe Miasto. The only quarry from which chalcedonite is currently obtained is that of the Teofilów site. Chalcedony is the main constituent of the rock also consisting of small quantities of quartz, opal, iron hydroxides, pyrite, manganese compounds and clay minerals. The mineral composition of chalcedonite by volume expressed as percentage is as follows: chalcedony, opal and autogenous quartz 68.3–95.4%, quartz and other terrigenous components 0.3–6.6%, and free and filled pores

lanymi [1]. Jednym z kierunków działań umożliwiających poprawę jest modyfikacja jego składu. Celem badań jest poprawa właściwości fizykomechanicznych ABK, przy wprowadzeniu do jego składu dodatków w postaci polistyrenu wysokoudarowego oraz chalcedonitu. Wykorzystanie tego typu substratów do modyfikacji materiałów budowlanych ściennych sprzyja ochronie środowiska.

## 2. Charakterystyka zastosowanych materiałów

Od lat do modyfikacji materiałów budowlanych stosuje się polimery. Są to naturalne i syntetyczne wielkocząsteczkowe związki chemiczne, które powstają w wyniku polimeryzacji etylenu lub jego pochodnych (zwanych monomerami winylowymi) [2]. Jednak wysoka cena produkcji polimerów przekonuje do zastosowania odpadów polimerowych z tworzyw sztucznych. Dodatkowym aspektem przemawiającym za wykorzystaniem tego typu odpadów jest także systematyczny wzrost ich ilości oraz słaba biodegradacja tych tworzyw przyczyniająca się do powstawania problemów ekologicznych i gospodarczych [3].

Jednym z najstarszych polimerów styrenowych jest polistyren wysokoudarowy (HIPS – High Impact Polystyrene). HIPS jest kopolimerem otrzymywanym w reakcji szczepienia polibutadienu (PB) oraz polistyrenu (PS), który posiada ulepszone właściwości udarowości w porównaniu z niemodyfikowanym PS. Polistyren wysokoudarowy charakteryzuje się małą gęstością objętościową, dużą sztywnością oraz odpornością na pękanie [4, 5]. Zastosowany w badaniach HIPS to regranulat poddany rozdrobieniu do frakcji 630  $\mu\text{m}$ , o gęstości objętościowej wynoszącej 1,05  $\text{g}/\text{cm}^3$  [6].

W przemyśle materiałów budowlanych w celu zmniejszenia eksploatacji nieodwracalnych źródeł naturalnych kopalin wykorzystuje się produkty odpadowe w postaci np. mączki kamiennej [7]. Zagospodarowanie tego typu odpadów sprzyja ochronie środowiska oraz redukuje koszty produkcji materiałów budowlanych [8, 9].

Do unikalnych osadowych skał krzemionkowych zaliczany jest chalcedonit z uwagi na bardzo niewielki obszar jego występowania. W Polsce znajduje się w złożach: Dęborzynka, Gapinin, Lubocz i Teofilów w rejonie Tomaszowa Mazowieckiego i Nowego Miasta. Obecnie jedynym miejscem eksploatacji jest złożo Teofilów. Chalcedon stanowi główny składnik skały, natomiast w niewielkich ilościach występują kwarc, opal, wodorotlenki żelaza, piryty, związki manganu oraz minerały ilaste. Procentowo objętościowy skład mineralny chalcedonitu przedstawia się nastę-

2.0–24.7%. As the content of silica exceeds 94% by weight, chalcedonite is a chemically homogeneous rock containing small amount of iron and aluminium oxides, alkaline elements and alkaline earth elements as well as organic substances and water [10, 11]. The chalcedonite dust used in the tests is a waste material from a chalcedonite aggregate quarry and has the same properties as the aggregate.

### 3. Composition and technology of autoclaved aerated concrete

The purpose of the laboratory tests was to assess the influence of the recycled materials on physical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete. For this purpose, the AAC was modified with high impact polystyrene (HIPS) and chalcedonite dust.

The tests were performed on cubic specimens with a side of 100 mm produced under semi-industrial conditions at an AAC plant. The concrete, variant 500, was produced according to the slow-setting silicate *technology* (SW), which involves producing a slurry from ground quartz sand and water. Ground quicklime and non-ground cement are used as a binder. Individual constituents, i.e., lime, gypsum, sand slurry and additional water are dozed by weight. The pore-forming and surface active agents are prepared in the form of a powder suspension in water. The ingredients are mixed in adequate proportions (sand and gypsum jointly constitute about 72% of the product mass, cement and lime – about 20%, with 7% water) for about six minutes. At this stage, suitable quantities of additives are incorporated. The percentage content of the additives relative to sand and gypsum in individual specimens was 10%, 20% and 30% of HIPS or chalcedonite. The additives used in the tests were selected based on earlier multi-criteria technical and economic analyses. After mixing the components, the product was placed in tripartite moulds. The moulds were stored for three hours in initial curing chambers at 60°C. During this process, the specimens achieved sufficient compressive strength to be demoulded and placed in autoclaves for hydrothermal treatment for about 13 h at a temperature of 191°C and steam pressure of 1.2 MPa [1].

pująco: chalcedon, opal i autogeniczny kwarc 68,3–95,4%, kwarc i inne składniki terygeniczne 0,3–6,6%, pory wolne i wypełnione 2,0–24,7%. Chalcedonit jest skałą jednorodną pod względem chemicznym z uwagi na fakt, iż zawartość krzemionki przekracza 94% wagowo. W mniejszych ilościach chalcedonit zawiera tlenki żelaza, glinu, pierwiastki alkaliczne i pierwiastki ziem alkalicznych oraz substancje organiczne i wodę [10, 11]. Zastosowana w badaniach mączka chalcedonitowa to materiał odpadowy powstały w kopalni kruszywa chalcedonitowego i ma takie same właściwości jak kruszywo.

### 3. Skład i technologia autoklawizowanego betonu komórkowego

Celem badań laboratoryjnych była ocena wpływu materiałów recyklingowych na właściwości fizyko-mechaniczne autoklawizowanego betonu komórkowego. W tym celu do modyfikacji ABK zastosowano polistyren wysokoudarowy (HIPS) oraz mączkę chalcedonitową.

Badania przeprowadzono na sześciennych próbkach o boku 100 mm. Elementy zostały wyprodukowane w zakładzie produkcyjnym betonu komórkowego w warunkach półprzemysłowych.

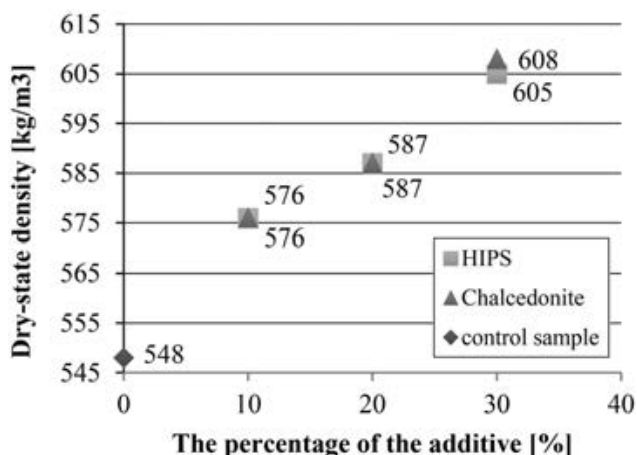
Autoklawizowany beton komórkowy został wytworzony w technologii SW o odmianie 500. W technologii tej mielony piasek kwarcowy jest łączony z wodą na szlam. Spoiwo stanowią mielone wapno palone oraz cement bez dodatkowego przemiału w wytwórni. Poszczególne składniki: wapno, cement, gips, szlam piaskowy oraz dodatkowa woda dozowane są do mieszarki w sposób wagowy. Dodatkowo w postaci zawiesiny proszku w wodzie przygotowywany jest środek porotwórczy wraz ze środkiem powierzchniowoczynnym. Składniki zostają mieszane w odpowiednich proporcjach (ok. 72% masy wyrobu stanowią łącznie piasek oraz gips, ok. 20% – cement i wapno, ok. 7% – woda) przez około 6 minut. Na tym etapie do części zarobu wprowadzono odpowiednie ilości dodatków. Procentowa zawartość dodatków w stosunku do piasku i gipsu w poszczególnych próbkach wynosiła 10%, 20% i 30% dodatku HIPS lub chalcedonitu. Stosowane w badaniach laboratoryjnych dodatki zostały wybrane na podstawie wcześniej przeprowadzonych wielokryterialnych analiz techniczno-ekonomicznych. Po połączeniu składników zarób został wleany do form trójdzielnych. Formy z masą umieszczono na ok. 3 h w komorach wstępnego dojrzewania w temperaturze ok. 60°C. Podczas tego procesu próbki osiągnęły wytrzymałość na ści-

#### 4. Test results and their analysis

The tests for the physical and mechanical properties of the autoclaved aerated concrete products were performed according to the standardized procedures [12–15]. The test results are shown in the Figures as an arithmetic average from the six specimens for each percentage content of the additives.

##### 4.1. Bulk density

The test results (Fig. 1) indicate that both HIPS and chalcedonite contributed to an increase in the bulk density of the material being tested. It also follows from the results that both additives have a similar effect on the bulk density increase observed with increasing additive contents in the specimens. Compared with the reference specimens, those containing 10%, 20% and 30% of HIPS showed a bulk density gain of 5%, 7% and 10%, respectively. In the specimens containing 10%, 20% and 30% of chalcedonite, the bulk density increased by 5%, 7% and 11%, respectively.



skanie, pozwalającą na wyjęcie ich z form i umieszczenie w autoklawach, gdzie poddano je przez ok. 13 h obróbce hydrotermalnej w temperaturze 191°C i ciśnieniu pary wodnej 1,2 MPa [1].

#### 4. Wyniki badań i ich analiza

Badania właściwości fizykomechanicznych modyfikowanych wyrobów z autoklawizowanego betonu komórkowego przeprowadzono zgodnie z metodyką określoną w normach [12–15]. Wyniki badań przedstawiono na rysunkach jako średnią arytmetyczną otrzymaną z sześciu próbek dla poszczególnych procentowych zawartości dodatków.

##### 4.1. Gęstość objętościowa

Na podstawie uzyskanych wyników (rys. 1) stwierdzono, że zarówno dodatek HIPS, jak i dodatek chalcedonitu spowodowały wzrost gęstości objętościowej badanego materiału. Stwierdzono również, że oba dodatki wpływają w podobnym stopniu na wzrost gęstości objętościowej ABK wraz ze zwiększeniem zawartości dodatków w próbkach. W stosunku do próbek kontrolnych próbki zawierające 10%, 20% i 30% dodatku HIPS osiągnęły przyrost gęstości objętościowej odpowiednio o 5%, 7% i 10%, natomiast w próbkach zawierających 10%, 20% i 30% dodatku chalcedonitu, przyrost ten wynosił odpowiednio 5%, 7% i 11%.

Fig. 1. Bulk density of the material under analysis  
Rys. 1. Gęstość objętościowa badanego materiału

##### 4.2. Compressive strength

Analysis of the results (Fig. 2) indicates that in the case of HIPS, the compressive strength increases with increasing content of the additive in the specimens. As for chalcedonite, the compressive strength decreases with increasing amount of the additive. The highest compressive strength was recorded in the specimen containing 30% of the HIPS additive. Its compressive strength was 4.70 MPa, i.e., it was 28% higher than the highest value of compressive strength recorded for the specimens with chalcedonite addition (the specimen containing

##### 4.2. Wytrzymałość na ściskanie

Na podstawie analizy wyników (rys. 2) stwierdzono, że dodatek w postaci HIPS-u powoduje wzrost wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem zawartości tego dodatku w próbkach. Natomiast dodatek w postaci chalcedonitu powoduje spadek wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem zawartości tego dodatku w próbkach. Najwyższą wytrzymałość na ściskanie osiągnęła próbka zawierająca 30% dodatku HIPS. Próbka ta osiągnęła wytrzymałość na ściskanie 4,70 MPa i jest to o 28% wyższa wytrzymałość na ściskanie niż najwyższa wytrzymałość na ściska-



10% of this additive). A comparison of specimens containing 30% addition showed that the one with HIPS had a 35% higher compressive strength than that with chalcedonite. Further, compared with the reference specimen, the strength of the one with 30% HIPS was 40% higher and of the specimens with 10% and 20% HIPS was 26% and 36% higher, respectively. The specimens with 10%, 20% and 30% chalcedonite showed a strength increase of 10%, 6% and 4%, respectively.

nie spośród próbek z dodatkiem chalcedonitu (czyli próbki zawierającej 10% tego dodatku). Natomiast porównując próbki zawierające po 30% dodatku, ta zawierająca HIPS osiągnęła o 35% wyższą wytrzymałość na ściskanie niż próbka zawierająca halcedonie. Ponadto próbka zawierająca 30% dodatku HIPS osiągnęła o 40% wyższą wytrzymałość niż próbka kontrolna, a próbki zawierające 10% i 20% HIPS-u osiągnęły odpowiednio o 26% i 36% wyższą wytrzymałość niż próbka kontrolna. Próbki zawierające halcedonie w ilości 10%, 20% i 30% osiągnęły przyrost wytrzymałości na ściskanie odpowiednio o 10%, 6% i 4% w stosunku do próbek kontrolnych.

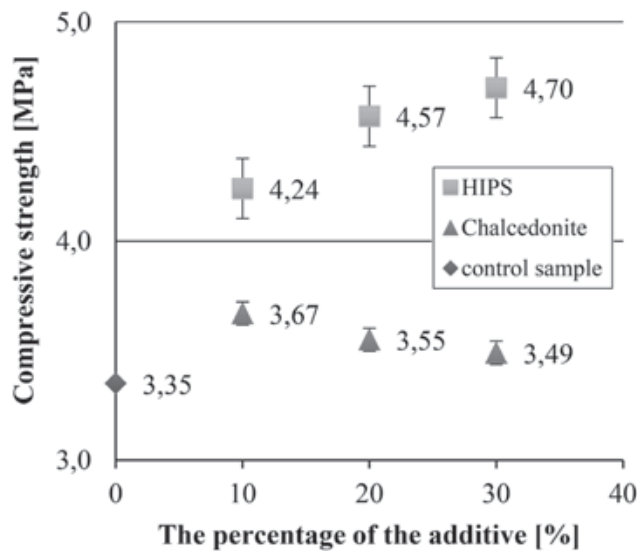


Fig. 2. Compressive strength of the material under analysis  
Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie badanego materiału

### 4.3. Water absorption

Analysis of the test results (Fig. 3) shows that both additions cause a decrease in the water absorption coefficient with increasing contents of the additives in the specimens.

### 4.3. Absorpcja wody

Na podstawie analizy otrzymanych wyników (rys. 3) zaobserwowano, że oba dodatki powodują spadek współczynnika absorpcji wody wraz ze wzrostem zawartości dodatków w próbkach.

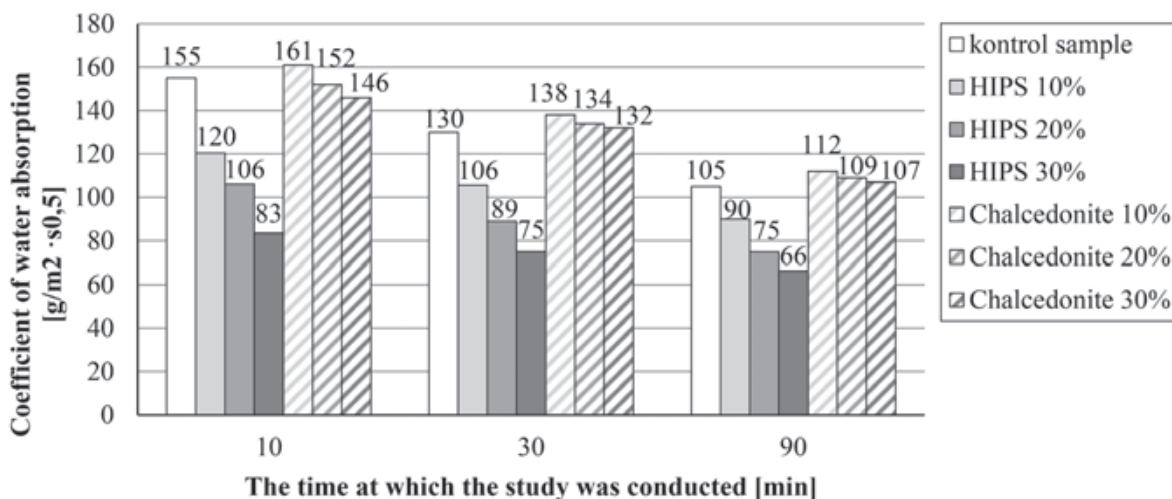


Fig. 3. Water absorption of the materials under analysis  
Rys. 3. Absorpcja wody badanego materiału

A comparison of the effects of the two additives on the water absorption coefficient indicates that in all three measurements the specimens containing the HIPS additive had lower coefficients. The smallest coefficient at all times was recorded for the specimen with 30% of HIPS. After 10, 30 and 90 minutes, the coefficient of this specimen was 43%, 43% and 38% lower than the specimen containing 30% of chalcedonite (the specimen that showed the best results of all specimens containing chalcedonite additive). Further, compared with the conventional AAC specimen, the water absorption coefficient in the specimen with 30% HIPS after 10, 30 and 90 minutes was 46%, 42% and 37% lower. In the case of the specimens containing 30% chalcedonite, the decrease in the coefficient is observable only after 10 minutes and reaches 6%, whereas a 2% increase in the coefficient is observed after 30 and 90 minutes in both measurements.

#### 4.4. Phase composition analysis

The phase composition of the modified autoclaved aerated concrete was studied through XRD.

The XRD results for both chalcedonite- and HIPS-modified autoclaved aerated concretes and for the conventional AAC showed a similar quantity of tobermorite phases. The presence of anhydrite was also observed, regardless of the additive type used or lack of it. In all three products, numerous crystalline phases of quartz were seen but calcite was found only in the HIPS-modified products and in the conventional AAC. Xonotlite was found only in the conventional AAC products. Its presence may indicate a relationship with the compressive strength, contributing to its decrease.

#### 5. Conclusions

The tests show that the addition of the high impact polystyrene (HIPS) has a better effect on the improvement of AAC properties than the addition of chalcedonite.

The HIPS additive added at 30% increased the compressive strength by 28% compared with the specimen of the highest strength among the chalcedonite-modified specimens. The addition of HIPS lowers the water absorption coefficient more

Porównując wpływ obu dodatków na współczynnik absorpcji wody, zauważono, że niższy współczynnik we wszystkich trzech pomiarach osiągnęły próbki zawierające dodatek HIPS. Najmniejszy współczynnik absorpcji wody po każdym czasie uzyskała próbka zawierająca 30% dodatku HIPS. Próbka ta osiągnęła odpowiednio po 10, 30 i 90 minutach o 43%, 43% oraz 38% mniejszą wartość współczynnika absorpcji wody niż próbka zawierająca 30% dodatku chalcedonitu (czyli próbka, która osiągnęła najlepsze wyniki spośród próbek zawierających dodatek chalcedonitu). Ponadto próbka zawierająca 30% dodatku HIPS osiągnęła niższy współczynnik absorpcji po 10, 30 i 90 minutach o 46%, 42% oraz 37% w porównaniu z próbką tradycyjnego ABK. Natomiast porównując próbki zawierające 30% chalcedonitu z próbkami tradycyjnego ABK, spadek współczynnika absorpcji wody zauważalny jest jedynie po 10 minutach i wynosi on 6%, natomiast po 30 i 90 minutach zauważalny jest wzrost współczynnika absorpcji wody odpowiednio po 2% przy obu pomiarach.

#### 4.4. Analiza składu fazowego

Badania składu fazowego modyfikowanego autoclawizowanego betonu komórkowego zostały wykonane przy zastosowaniu dyfraktometrii rentgenowskiej (XRD).

Wyniki badań XRD autoclawizowanego betonu komórkowego zarówno w przypadku betonów modyfikowanych chalcedonitem i HIPS-em, jak i tradycyjnego ABK wykazały zawartość faz tobermorytu. W badanych materiałach niezależnie od dodatku i jego braku zaobserwowano także występowanie anhydrytu. Ponadto we wszystkich trzech wyrobach zaobserwowano występowanie licznych faz krystalicznych, tj. kwarcu oraz kalcytu jedynie w wyrobach z dodatkiem HIPS-u oraz w tradycyjnym ABK. Jedynie w wyrobach tradycyjnych zaobserwowano znaczną zawartość xonotlitu, którego występowanie może wskazywać na zależność z wytrzymałością na ściskanie, przyczyniając się do jej obniżenia.

#### 5. Wnioski

Na podstawie zaprezentowanych badań stwierdza się, że dodatek w postaci polistyrenu wysokoudarowego (HIPS) korzystniej wpływa na poprawę właściwości autoclawizowanego betonu komórkowego niż dodatek w postaci chalcedonitu.

Dodatek HIPS w ilości 30% spowodował wzrost wytrzymałości na ściskanie o 28% w stosunku do próbki z najwyższą wytrzymałością zawierającą dodatek w postaci chalcedonitu. Ponadto dodatek HIPS

pronouncedly than the addition of chalcedonite. At 30% of HIPS in the modified material. In the final measurement, this additive reduced the coefficient of water absorption by 38% relative to the specimen with 30% chalcedonite.

powoduje większe obniżenie współczynnika absorpcji niż dodatek chalcedonitu. Przy ilości 30% HIPS-u w modyfikowanym materiale, w ostatnim pomiarze dodatek ten spowodował obniżenie współczynnika absorpcji wody o 38% w stosunku do próbki zawierającej 30% chalcedonitu.

## References

- [1] Zapotoczna-Sytek G., Balkovic S., *Autoklawizowany beton komórkowy. Technologia, właściwości, zastosowanie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
- [2] Czarnecki L., *Betony polimerowe*, „Cement – Wapno – Beton” 2010, 2, s. 63–85.
- [3] Dębska B., *Modyfikacja betonów i zapraw polimerowych odpadami z tworzyw sztucznych*, „Izolacje” 2009, 2, s. 56–63.
- [4] Alfarraj A., Nauman E.B., *Super HIPS: improved high impact polystyrene with two sources of rubber particles*, “Polymer” 2004, 45, pp. 8435–8442.
- [5] Vilaplana F., Ribes-Greus A., Karlsson S., *Chromatographic pattern in recycled high-impact polystyrene (HIPS) – Occurrence of low molecular weight compounds during the life cycle*, “Polymer Degradation and Stability” 2010, 95, pp. 172–186.
- [6] Dachowski R., Kapała S., *Modyfikacja autoklawizowanego betonu komórkowego polistyrenem wysokoudarowym*, „Materiały Budowlane” 2016, 6, s. 69–70.
- [7] Kapała S., Dachowski R., *The Influence of the Chalcedony on the Properties of Autoclaved Aerated Concrete*, “Procedia Engineering” 2016, 7, pp. 699–703.
- [8] Szaj P., *Wpływ wybranych dodatków mineralnych na właściwości reologiczne zaczynów cementowych*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, 134, s. 285–294.
- [9] Pytel Z., Kudowski W., Małolepszy J., Kocjan J., *Masa na wyroby wapienno-piaskowe o podwyższonej wytrzymałości*, opis patentowy, numer zgłoszenia: 372230.
- [10] Michel M.M., *Charakterystyka chalcedonitu ze złoża Teofilów pod kątem możliwości wykorzystania w technologii uzdatniania wody i oczyszczania ścieków*, „Gospodarka Surowcami Mineralnymi” 2011, 27, 1, s. 49–67.
- [11] Tchórzewska D., Pabis J., Kosk I., Nieć M., *Nowe zastosowania chalcedonitu jako sorbentu w procesie oczyszczania wód*, „Przegląd Geologiczny” 2001, 49/4, s. 303–306.
- [12] PN-EN 771-4:2012 Wymagania dotyczące elementów murowych – Część 4: Elementy murowe.
- [13] PN-EN 772-1:2011 Metody badań elementów murowych – Część 1: Określenie wytrzymałości na ściskanie.
- [14] PN-EN 772-11:2011 Metody badań elementów murowych – Część 11: Określenie absorpcji wody elementów murowych z betonu kruszywowego, kamienia sztucznego i kamienia naturalnego spowodowanej podciąganiem kapilarnym oraz początkowej absorpcji wody elementów murowych ceramicznych.
- [15] PN-EN 772-13:2001 Metody badań elementów murowych – Część 13: Określenie gęstości netto i gęstości brutto elementów murowych w stanie suchym.