

Wpływ dodatku nanokrzemionki na mikrostrukturę i właściwości autoklawizowanego betonu komórkowego

The influence of silicon dioxide nanoparticles on microstructure and properties of autoclaved aerated concrete

1. Wstęp

Bardzo dobre właściwości izolacyjne autoklawizowanego betonu komórkowego [ABK] są konsekwencją obecności w materiale dużej ilości porów zamkniętych. Dodatkowo, wytrzymałość mechaniczna ABK jest na tyle duża, że można z niego wznosić budynki. Te dwie cechy czynią z ABK materiał o dobrych perspektywach rozwoju (1-5). W Chinach celem jest uzyskanie oszczędności energii w nowo oddawanych budynkach mieszkalnych na poziomie 65%. W celu spełnienia tego wymogu należy optymalizować mikrostrukturę i skład fazowy ABK dążąc do poprawy właściwości izolacyjnych i wytrzymałości.

Nanokrzemionka jest rodzajem amorficznej krzemionki o bardzo rozwiniętej powierzchni właściwej. Jest coraz powszechniej stosowana w materiałach cementowych, w celu poprawy ich właściwości (6-8). Givi i in. (9) badali przepuszczalność betonów zawierających nanokrzemionkę. Wyniki ich badań wykazały, że dodatek nanokrzemionki zmniejszał ciekłość mieszanki betonowej, zwiększał trwałość betonu i sprzyjał powstawaniu żelu C-S-H i ettringitu. Stefanidou (10) i Jo (11) wykazali, że nanokrzemionka ma właściwości pucolanowe. Może ona reagować z wodorotlenkiem wapnia z utworzeniem żelu C-S-H. Dodatkowo Nazari (12,13) i Khalaj (14) stosowali nanokrzemionkę jako nanowypełniacz w betonach samozagęszczalnych. Wyniki ich badań dowiodły, że dodatek nanokrzemionki zmniejsza ilość porów kapilarnych w mikrostrukturze betonu i przyspiesza powstawanie hydratów. Givi i in. (15) stwierdzili, że małe cząstki nanokrzemionki mogą stanowić zarodki krystalizacji. W związku z tym może powstać większa ilość żelu C-S-H i zwiększona zostaje początkowa wytrzymałość betonu. Li (16) i Huang (17) dowiedli, że dodatek nanokrzemionki nie musi powodować zwiększenia wytrzymałości na ściskanie, poprawia on natomiast odporność betonu na pękanie.

Dotychczas brak jest badań poświęconych wykorzystaniu nanokrzemionki w produkcji ABK. Przedstawiona praca poświęcona jest wpływowi różnych dodatków nanokrzemionki na wytrzymałość,

1. Introduction

The heat insulating performance of autoclaved aerated concrete [AAC] is very good because of the closed pores present in AAC microstructure. In addition, good mechanical performance of AAC can meet the needs of the building maintenance structure. Therefore, AAC is a thermal insulation material with good development prospect (1-5). In China, the target of energy-savings is 65% for new residential buildings. In order to meet this requirement, the microstructure of AAC should be optimized to make AAC have both excellent heat insulation property and appropriately high strength.

Silicon dioxide nanoparticles [SDN] is a kind of amorphous silica material with pozzolanic properties. It is widely used to improve the properties of cement based material (6-8). Givi et al. (9) studied the permeability of SDN composite concrete. The results indicated that SDN densify the concrete mix enhance the durability of the concrete and promote the formation of C-S-H gel and ettringite. Stefanidou (10) and Jo (11) found that SDN have pozzolanic properties and can react with calcium hydroxide and produce C-S-H gel. In addition, Nazari (12,13) and Khalaj (14) used SDN as nano-filler in self-compacting concrete. The results showed that SDN refined the harmful pores in the concrete structure and accelerated the formation of hydrates. Givi et al. (15) put forward the theory that the smaller the particle size of SDN was, the more crystallization sites could form. Therefore, the formation of C-S-H gel was promoted and the early strength of concrete was improved. Li (16) and Huang (17) found that SDN could not improve the compressive strength of concrete obviously. It mainly improved the fracture toughness of concrete.

The hitherto research of the influence of SDN on the property and microstructure of AAC is very deficient. In this study, the strength, thermal conductivity and density of AAC with different contents of SDN were measured. SEM and XRD are adopted to analyse the influence of SDN on microstructure and hydratis content of AAC.

przewodnictwo cieplne, gęstość ABK. Badano również mikrostrukturę [SEM] oraz skład fazowy ABK.

2. Doświadczenia

2.1. Materiały

Nanokrzemionka AEROSIL200 pochodziła z firmy EVONIK, Niemcy. Jej właściwości przedstawiono w Tabelicy 1. Pył krzemionkowy pochodził z Luoyang Ji He Micro-Silica Fume Co., LTD., China. Właściwości fizyczne pyłu przedstawiono w Tabelicy 2. Skład chemiczny pyłu krzemionkowego przedstawiono w Tabelicy 3. Do badań wykorzystano cement portlandzki klasy 52.5 z cementowni Jiangnan-Xiaoyetian Cement Co., Ltd. Właściwości cementu podano w Tabelicy 4. Popiół lotny krzemionkowy [typ F wg. ASTM] pochodził z elektrowni Zhenjiang Jianbi, Suyuan Co. Ltd. Jego powierzchnia właściwa wynosiła 390 m²/kg. Proszek glinowy pochodził z Nanjing Chemical Co., Ltd.

2.2. Przygotowanie ABK

Przygotowano pięć ABK z różną zawartością nanokrzemionki. Składy mieszanek przedstawiono w tabelicy 5. Całkowita ilość pyłu krzemionkowego i nanokrzemionki była jednakowa we wszystkich pięciu betonach. Woda, popiół lotny, gips, cement i wapno były mieszane wspólnie przez pięć minut. Następnie wprowadzano proszek aluminiowy i mieszano przez 30 sekund. Wszystkie surowce mieszano do uzyskania jednorodnej masy i wylewano do form, napełniając je do dwóch trzecich ich wysokości. Próbkę do badań przewodnictwa cieplnego miały rozmiar 300 mm x 300 mm x 30 mm. Wytrzymałość badano na próbkach 100 mm x 100 mm x 100 mm. Próbkę dojrzewały przez 1,5 godziny w temperaturze 60°C i 90% wilgotności względnej. Następnie były przetrzymywane przez 10 godzin w temperaturze 25±2°C, po czym autoklawizowane przez 8 godzin w temperaturze 190°C i ciśnieniu nasyconej pary wodnej [1,25 MPa].

2.3. Metody badań

Po autoklawizacji próbki ABK suszono w temperaturze 60±5°C przez 24 godziny następnie w 80±5°C przez kolejne 24 godziny. Kolejnym etapem było suszenie w 105±5°C do osiągnięcia stałej masy. Gęstość i wytrzymałość na ściskanie ABK oznaczano na suchych próbkach zgodnie z chińską normą GB/T11969-2008:

Tabelica 4 / Table 4

WŁAŚCIWOŚCI CEMENTU
PROPERTIES OF CEMENT

Powierzchnia właściwa, m ² /kg Specific surface area, m ² /kg	Wodożądność, % Water requirement at normal consistency, %	C ₃ A, %	Straty prażenia, % LOI %
390	26.8	6.6	2.97

2. Experimental

2.1 Materials

Silicon dioxide nanoparticles [AEROSIL200] were produced by EVONIK Ind., Germany. The chemical and physical properties of SDN are showed in Table 1. Silica fume was produced by Luoyang Ji He Micro-Silica fume Co., LTD., China. The physical properties of silica fume are shown in Table 2. The chemical composition of silicon fume is showed in Table 3. Cement used in this study is P-O 52.5 supplied by Jiangnan-Xiaoyetian Cement Co., Ltd. The physical and chemical properties of cement are given in Table 4. Fly ash, F type was supplied by Zhenjiang Jianbi power plant, Suyuan Co. Ltd. The specific surface area is 390 m²/kg. Aluminium powder was supplied by Nanjing Chemical Co., Ltd.

Tabelica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI NANOKRZEMIONKI
THE PROPERTIES OF SDN

Średnia wielkość ziaren, nm Mean diameter, nm	Powierzchnia właściwa, m ² /g Specific surface area, m ² /g	Gęstość, g/cm ³ Density, g/cm ³	Czystość, % Purity, %
12	200±25	0.05	≥99.8

Tabelica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI PYŁU KRZEMIONKOWEGO
PROPERTIES OF SILICA FUME

Średnia wielkość ziaren, μm Mean diameter, μm	Gęstość, g/cm ³ Density, g/cm ³	Powierzchnia właściwa, m ² /g Specific surface area, m ² /g	Czystość, % Purity, %	Straty prażenia, % LOI %
0.1	2.40	25	≥98	0.80

Tabelica 3 / Table 3

SKŁAD CHEMICZNY PYŁU KRZEMIONKOWEGO
CHEMICAL COMPOSITION OF SILICA FUME

SiO ₂ , %	K ₂ O, %	Na ₂ O, %	Straty prażenia, % LOI %
98.0	0.26	0.29	0.80

2.2. Preparation and curing of AAC

AAC samples with different contents of SDN were prepared. The mix proportions of the samples are showed in Table 5. The total content of silica fume and SDN is the same in all five samples. Water, fly ash, gypsum, cement and lime were mixed together for five minutes. Then, aluminium powder was added and mixed

Tablica 5 / Table 5

SKŁADY ABK

MIX PROPORTIONS OF AAC

Próbka Sample	Pył krzemionkowy, % Silica fume, %	Nanokrzemionka, % SDN, %	Cement, % Cement, %	Popiół lotny, % Fly ash, %	Wapno, % Lime, %	Gips, % Gypsum, %	Domieszki, % masy cementu Admixtures, % of cement mass
S1	7.2	0	10.4	58.7	21.7	2.0	42.9
S2	6.0	1.2	10.4	58.7	21.7	2.0	42.9
S3	4.8	2.4	10.4	58.7	21.7	2.0	42.9
S4	3.6	3.6	10.4	58.7	21.7	2.0	42.9
S5	2.4	4.8	10.4	58.7	21.7	2.0	42.9

Uwagi: Domieszki to plastyfikator oraz opóźniacz czasu wiązania [cytrynian sodu]

Remarks: Admixtures contain water reducing agent and retarder [sodium citrate]

„Metody badań betonu komórkowego”. Szybkość narastania siły wynosiła $2,0 \pm 0,5$ kN/s. Przewodność cieplną ABK zmierzono zgodnie z chińską normą GB/T10294-2008: „Izolacja termiczna”. Przewodnictwo cieplne w stanie stacjonarnym zmierzono za pomocą aparatu płytowego CD-R3030A [Shenyang Ziwei Mechanical and Electrical Equipment Co., Ltd, Chiny]. Obserwacje mikrostruktury ABK wykonano przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego XL30ESEM [PHILIPS, Holandia]. Napięcie przyspieszające wynosiło 20 kV, a ciśnienie próżni było niższe od 10^{-5} mbar. Analizy składu fazowego wykonano za pomocą dyfraktometru XRD D8 Advance [Bruker, Niemcy]. Napięcie przyspieszające wynosiło 35 kV przy natężeniu prądu równym 40 mA. Czas zliczania wynosił 0,15 s/krok, przy szerokości kroku równej $0,02^\circ$.

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Wpływ nanokrzemionki na gęstość i wytrzymałość na ściskanie

Lepkość masy wzrastała wraz ze zwiększającym się udziałem nanokrzemionki. Współczynnik woda/składniki stałe [w/s] poszczególnych mieszanek poddawano korekcie, aby wyeliminować wpływ konsystencji na proces wydzielania gazu i wyrastania masy. Wartości stosunków w/s zapewniających stałą konsystencję masy przedstawiono na rysunku 1. Współczynnik w/s zwiększa się od 0,36 do 0,44 wraz ze wzrostem udziału nanokrzemionki od 0 do 4,8%. Jest to spowodowane dużą powierzchnią właściwą nanokrzemionki i wynikającą z tego dużą wodożądnością.

Wyniki oznaczeń gęstości oraz wytrzymałości na ściskanie przedstawiono na rysunku 2. Gęstość ABK spada wraz ze zwiększeniem zawartości nanokrzemionki. Jednakże wytrzymałość na ściskanie wzrasta wraz ze wzrostem zawartości nanokrzemionki. Wytrzymałość na ściskanie ABK bez dodatku wynosi 2,14 MPa, zaś dla betonu zawierającego 4,8% nanokrzemionki jest o 22% większa. Wzrost współczynnika wodno-spoiwowego i obniżenie gęstości nie powoduje spadków wytrzymałości ABK z dodatkiem nanokrzemionki. Oznacza to, że nanokrzemionka najprawdopodobniej

for 30 seconds. All the raw materials were mixed into slurry and then poured into moulds up to two thirds of their height. The size of the specimen was 300 mm × 300 mm × 30 mm for the thermal insulation test and 100 mm × 100 mm × 100 mm for the compressive strength test, respectively. They were cured for 1.5 hours [60°C, 90 % RH]. Then they were cured at $25 \pm 2^\circ\text{C}$ for 10 hours. Afterwards they were autoclaved for 8h [1.25 MPa, 190° C].

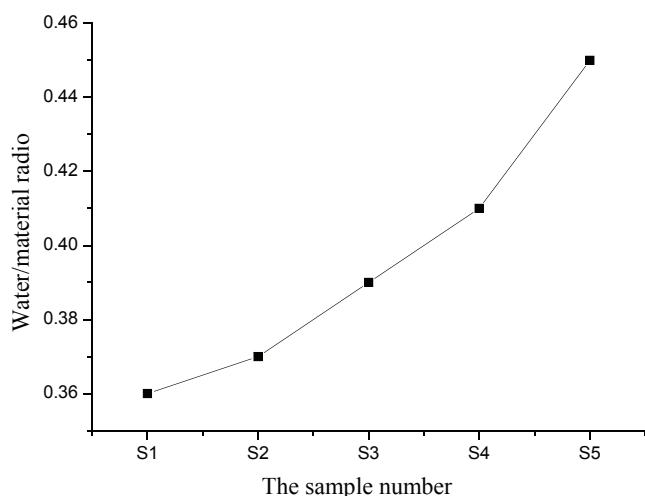
2.3 Methods

After autoclaving AAC samples were dried at $60 \pm 5^\circ\text{C}$ for 24h and then at $80 \pm 5^\circ\text{C}$ for another 24h, following by drying at $105 \pm 5^\circ\text{C}$, until samples reached constant weight. The dry density and compressive strength of AAC were measured according to GB/T11969-2008 Chinese Standard: Test Methods of Autoclaved Aerated Concrete. The loading rate was set as 2.0 ± 0.5 kN/s. Thermal conductivity of AAC were measured according to GB/T10294-2008 Chinese Standard: Thermal insulation - Determination of Steady-state thermal resistance and related properties—Guarded hot plate apparatus, with a thermal conductivity measuring instrument CD-R3030A [Shenyang Ziwei Mechanical and Electrical Equipment Co., Ltd, China]. Scanning Electron Microscope [XL30ESEM, PHILIPS] was used to observe the microstructure of AAC. The voltage used was 20 kV and vacuum pressure was less than 10^{-5} mbar. Phase composition of AAC was determined with a XRD diffractometer [XRD D8 Advance. Bruker, Germany]. The voltage of X-tube was 35 kV and the current was 40 mA. The scan speed and step width were 0.15 s/step and $0.02^\circ/\text{step}$, respectively.

3 Results and discussion

3.1. The influence of SDN on the compressive strength and dry density

The viscosity of the slurry increased gradually with the increasing content of SDN. In order not to affect the process of gas generation, the water/material ratio was adjusted. The result is presented in Fig. 1. The dry density and compressive strength were measured, as shown in Fig. 2.



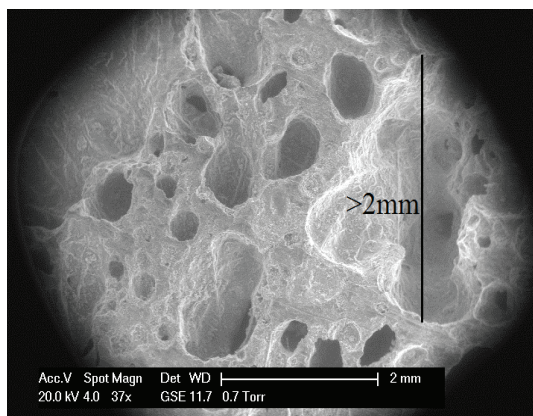
Rys. .1. Współczynnik woda/składniki stałe ABK zawierającego różną ilość nanokrzemionki

Fig. 1 Water/material ratio of AAC with different contents of SDN

przyczynia się do wzrostu wytrzymałości na ściskanie ABK poprzez poprawę mikrostruktury, zarówno jeśli chodzi o strukturę napowietrzenia, jak również budowę i skład fazowy matrycy. Obserwacje mikroskopowe wykazały różnice w strukturze napowietrzenia betonów bez i z nanokrzemionką. Na rysunku3 przedstawiono fotografię przykładowych porów powietrznych w mieszance wzorcowej S1. Rozkład wielkości porów i kształt porów nie są jednolite. W mieszance S1 występują pory, których rozmiar przekracza 2 mm. Obserwacje betonów z dodatkiem nanokrzemionki pokazały, że udział porów większych niż 2 mm był bardzo mały. Przykładową morfologię makro porów próbek S4 i S5 przedstawiono na Rys. 4.

3.2. Wpływ nanokrzemionki na przewodnictwo cieplne ABK

Wartości przewodnictwa cieplnego i porowatości próbek przedstawiono na Rys. 5. Spadek przewodnictwa cieplnego ABK jest spowodowany głównie zmianą struktury porów.

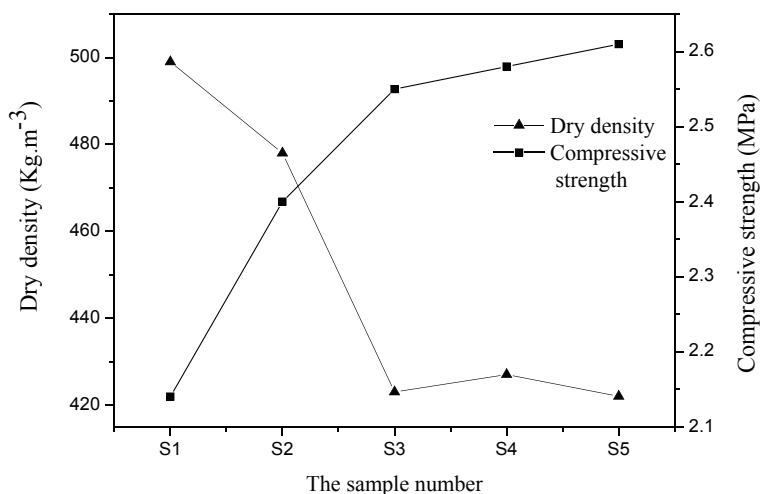


Rys. 3. Morfologia porów próbki S1

Fig. 3. Macro-pore morphology of S1

Fig. 1 shows that the water/material ratio of AAC is increasing from 0.36 to 0.44 when the content of SDN is increased from 0 to 4.8%. This is because that SDN has large specific surface and high water demand.

Fig. 2 shows that the dry density of AAC is decreasing with the addition of SDN. However, the compressive strength of AAC is increasing with the increased content of SDN. The compressive strength of AAC without SDN is 2.14 MPa. Compared to the AAC without SDN, the compressive strength of AAC is increased by 22 % when the content of SDN is 4.8 %. Figs. 1 and 2 show that the increase of the water/material ratio and the decrease of the dry density do not decrease compressive strength of AAC with SDN. This result means that SDN contribute to the increase of the compressive strength of AAC by improving the microstructure of AAC. The macro-pore morphology of S1 is showed in Fig. 3. It can be seen that the size distribution of pores and the pore shape are not uniform. The pores with the diameter of more than 2 mm are found in S1. Therefore, the compressive strength of S1 is lower although the dry density of S1 is high. The macro-pore morphology of S4



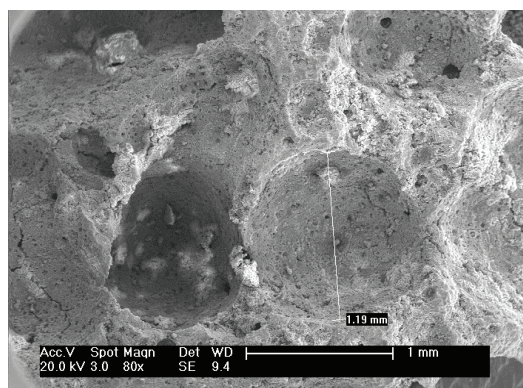
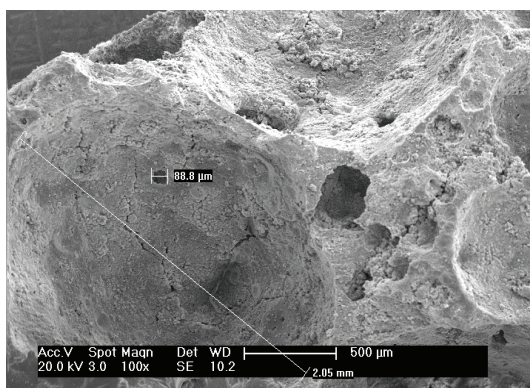
Rys. 2. Gęstość i wytrzymałość na ściskanie ABK z różną zawartością nanokrzemionki

Fig. 2. Dry density and compressive strength of AAC with different contents of SDN

and S5 are shown in Fig. 4. The pores with the diameter of more than 2 mm are hardly found in SDN bearing samples.

3.2. The influence of SDN on the thermal conductivity of AAC

The thermal conductivity and porosity of samples are presented in Fig. 5. The decrease of the thermal conductivity of AAC is mainly due to the alteration of pores structure. It can be seen from Fig. 5 that the porosity of AAC is increasing with the increased content of SDN. It means that SDN play an active role in improving the pores structure of AAC. There are two main reasons to explain the decrease in thermal conductivity of AAC. One is that the porosity of AAC is increased. Another is that the thermal conductivity of the solid phase of AAC [without addition of aluminum powder] is



Rys. 4. Morfologia porów betonów S4 i S5

Fig. 4. Macro-pore morphology of S4 [left] and S5 [right]

Porowatość ABK wzrasta wraz ze wzrostem zawartości nanokrzemionki. Oznacza to, że nanokrzemionka w dużym stopniu wpływa na poprawę struktury porów ABK. Spadek przewodności cieplnej ABK wynika z dwóch powodów. Pierwszy to wzrost całkowitej porowatości próbki, drugi to zmniejszenie przewodności samej matrycy ABK. Xiao i in. (18) wykazali, że popiół lotny może zwiększać stopień przereagowania cementu i tym samym obniżać przewodność cieplną betonu. W celu określenia wpływu nanokrzemionki na przewodność cieplną matrycy ABK przygotowano próbki nienapowietrzonych matryc [bez dodatku proszku glinowego] oznaczone odpowiednio SP1-SP5. Ich współczynniki przewodności cieplnej przedstawiono w tabelicy 6.

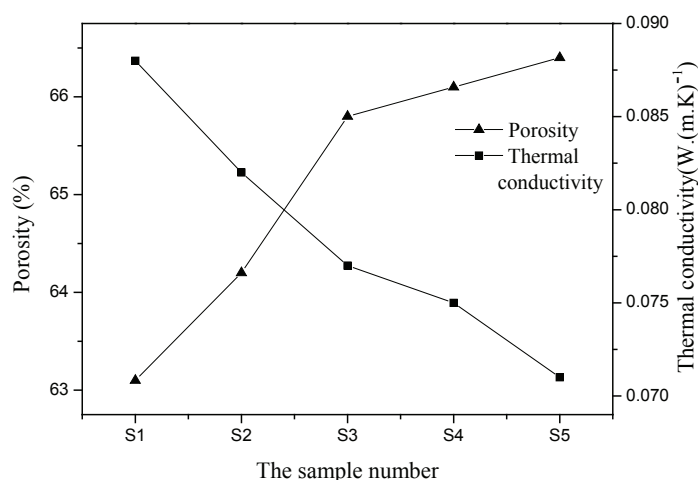
Wyniki przedstawione w tabelicy 6 wskazują, że współczynnik przewodnictwa cieplnego nienapowietrzonej matrycy ABK zmniejsza się wraz ze wzrostem zawartości nanokrzemionki. Wskazuje to na wpływ nanokrzemionki zarówno na mikrostrukturę porów w materiale jak również na mikrostrukturę samej matrycy ABK.

3.3. Analiza mikroskopowa autoklawizowanego betonu komórkowego z różną zawartością nanokrzemionki

Obserwacje mikroskopowe wykorzystano do określenia zmian w mikrostrukturze ABK z różną zawartością nanokrzemionki. Rysunek 6 przedstawia mikrostrukturę ABK na ścianie porów jak i przełamów matrycy. Obserwacje SEM pokazały, że wraz ze wzrostem zawartości nanokrzemionki w betonie zmienia się pokrój kryształów tobermorytu. Większy dodatek nanokrzemionki powoduje lepsze wykształcenie kryształów. Wewnątrz porów w obecności nanokrzemionki powstają duże kryształy płytkowe, mniej lub bardziej wydłużone. Morfologia produktów hydratacji w przekroju matrycy jest nieregularna, zaś ziarna kształtem przypominają pręciki i nieregularne płytki. Wiąże się to z ograniczoną przestrzenią w której mogą krystalizować produkty.

3.4. Wpływ nanokrzemionki na skład fazowy ABK

Na rysunku 7 przedstawiono dyfraktogramy ABK z różnymi zawartościami nanokrzemionki. Główne fazy występujące w badanych betonach to: tobermoryt [11.46 Å, 5.42 Å, 3.08 Å, 2.97 Å, 2.70 Å,



Rys. 5. Porowatość i przewodnictwo cieplne ABK z różną zawartością nanokrzemionki

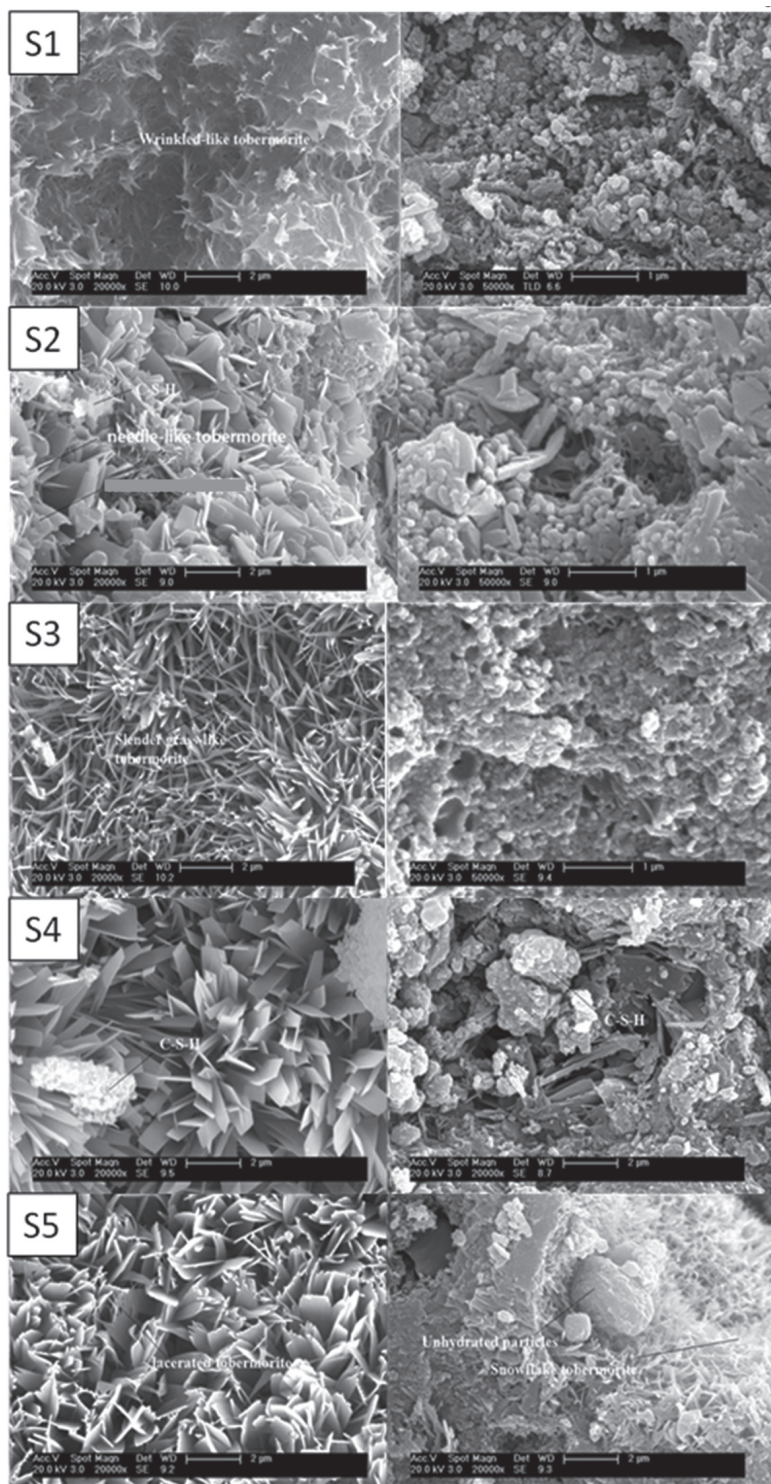
Fig. 5. Porosity and thermal conductivity of AAC with different contents of SDN

Tablica 6 / Table 6

PRZEWODNICTWO CIEPLNE NIENAPOWIETRZONEJ MATRYCY ABK
THERMAL CONDUCTIVITY OF UNAEATED AUTOCLAVED CONCRETE MATRIX

Próbka Sample	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
Współczynnik przewodnictwa cieplnego, W·(m·K) ⁻¹ Thermal conductivity, W·(m·K) ⁻¹	0.812	0.791	0.773	0.750	0.739

reduced. Xiao et al. (18) found that fly ash could raise hydration degree of cement and therefore decrease the thermal conductivity of concrete. In order to study the thermal conductivity of the solid phase of AAC, the solid phases of AAC were prepared and are marked as SP1~SP5. Their thermal conductivities are presented in Table 6.



Rys. 6. Obrazy SEM próbek ABK z różną zawartością nanokrzemionki. Po prawej widok ścian porów powietrznych i morfologia tworzącego się tobermorytu, po lewej mikrostruktura przełamania matrycy ABK

Fig. 6. SEM images of AAC with different content of SDN. On the right: Tobermorite formed on the walls of the entrained air pores, on the left: microstructure of AAC matrix fracture

1.44Å], żel C-S-H [5.42 Å, 3.04 Å, 2.79 Å, 2.54 Å, 1.84Å], kwarc [4.26 Å, 3.34 Å, 1.82 Å, 1.54Å] i hydrogranat [5.02 Å, 2.76 Å, 2.28 Å, 2.00 Å, 1.60Å].

Intensywność [I] i szerokość połówkowa [FWHM] refleksów tobermorytu [T], fazy C-S-H [C] i kwarcu [Q] podano w tablicy 7.

Table 6 shows that the thermal conductivity of solid phase of AAC decreases with the increasing content of SDN. This indicates that SDN can not only improve pore structures but also has an impact on the thermal conductivity of the solid phase of AAC.

3.3. SEM analysis of AAC with different contents of SDN

SEM method was used to observe changes in microstructure of AAC with different contents of SDN. Fig. 6 shows the microstructure at the wall of pores and the cross sections of AAC matrix.

Fig. 6 shows that introduction of SDN results in changes in tobermorite crystals morphology. Poorly crystallized wrinkled-like tobermorite was found in S1 concrete. Presence of SDN results in higher degree of crystallization of tobermorite in pores. The tobermorite crystals are larger and possess more crystalline morphology. The hydration products at the cross section of pores have more amorphous microstructure than that at the wall of pores. Products formed at the cross section of pores is mainly rod-like irregular and irregular flake-like. This is mainly due to the limited space for crystallization.

3.4. XRD Analysis of the hydration products of AAC

XRD patterns of AAC are shown in Fig. 7. The phases present in hydrated AAC specimens are mainly tobermorite [11.46, 5.42, 3.08, 2.97, 2.70, 1.44Å], C-S-H phase [5.42, 3.04, 2.79, 2.54, 1.84Å], quartz [4.26, 3.34, 1.82, 1.54Å] and hydrogranat [5.02, 2.76, 2.28, 2.00, 1.60Å].

The intensity [I] and full width at half maximum [FWHM] changes for tobermorite [T], C-S-H phase [C] and quartz [Q] are listed in Table 7. It can be seen from Table 7 that the intensity of tobermorite and C-S-H phase increase and FWHM of tobermorite and C-S-H phase decrease with the increasing content of SDN. This means that the crystallinity degree and content of tobermorite and C-S-H phase are increasing with the increasing dosage of SDN. Tobermorite and C-S-H phase contribute to the compressive strength of AAC. Increased content of hydration products may be the explanation of strength increase which was noted despite the drop of density connected with increased water/solid ratio in the presence of SDN.

4 Conclusions

Different contents of SDN were used in AAC and the influence of SDN on the microstructure, compressive strength and the thermal conductivity of AAC were studied. The following conclusions can be drawn:

Intensywność refleksów tobermorytu i fazy C-S-H wzrasta a szerokość połówkowa tych faz maleje wraz ze wzrostem zawartości nanokrzemionki. Oznacza to, że stopień krystaliczności oraz zawartość tobermorytu i żelu C-S-H wzrasta w obecności nanokrzemionki. Tobermoryt i żel C-S-H odpowiadają za wytrzymałość na ściskanie ABK. Zwiększona ilość produktów hydratacji może wyjaśniać większą wytrzymałość próbek, pomimo spadku gęstości wynikającego ze zwiększonego stosunku wodno-spoiwowego dla betonów z dodatkiem nanokrzemionki.

4. Wnioski

Zbadano wpływ zmiennej zawartości nanokrzemionki na mikrostrukturę, wytrzymałość na ściskanie i przewodność cieplną ABK. Na podstawie przeprowadzonych badań wyciągnięto następujące wnioski:

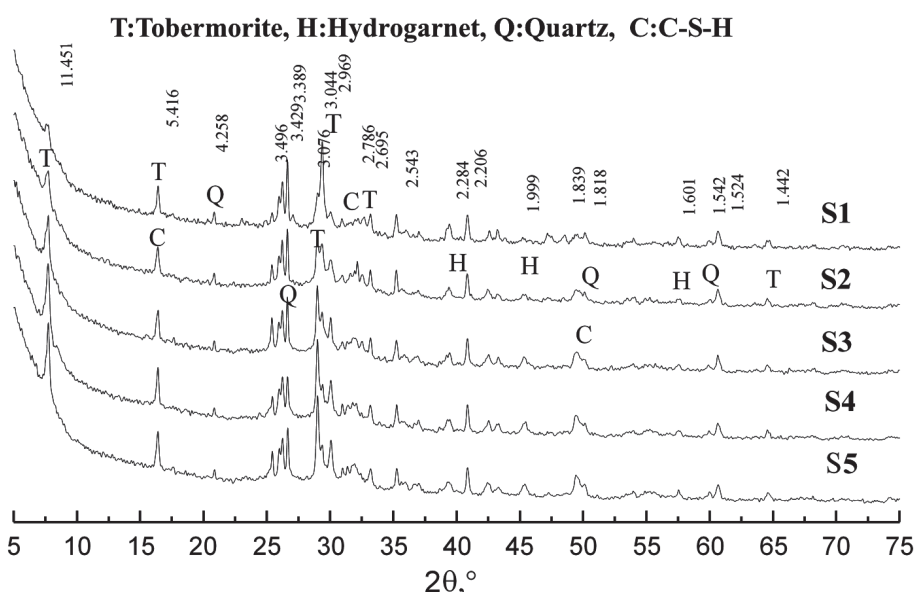
- 1) Wytrzymałość na ściskanie ABK wzrasta ze wzrostem zawartości nanokrzemionki, pomimo mniejszej gęstości ABK.
- 2) Współczynnik przewodności cieplnej ABK zmniejsza się wraz ze wzrostem zawartości nanokrzemionki. Nanokrzemionka wpływa nie tylko na mikrostrukturę porów ale także na mikrostrukturę i skład fazowy matrycy ABK, wpływając tym samym na przewodność cieplną.
- 3) Dodatek nanokrzemionki powoduje wzrost zawartości tobermorytu i żelu C-S-H w badanych ABK.

Podziękowania

Autorzy dziękują za finansowe wsparcie pochodzące z Podstawowych Funduszy Badawczych dla Uniwersytetów Centralnych (2242016K41003).

Literatura / References

1. M. Jerman, M. Keppert, J. Výborný, R. Černý, Hygric, thermal and durability properties of autoclaved aerated concrete, *Constr. Build. Mater.*, **41**, 352–359 (2013).
2. Z. O. Pehlivanlı, İ. Uzun, Z. P. Yücel, İ. Demir, The effect of different fiber reinforcement on the thermal and mechanical properties of autoclaved aerated concrete, *Constr. Build. Mater.*, **112**, 325–330 (2016).
3. P. Walczak, P. Szymański, A. Różycka, Autoclaved Aerated Concrete based on Fly Ash in Density 350kg/m³ as an Environmentally Friendly Material for Energy - Efficient Constructions, *Procedia Eng.*, **122**, 39–46 (2015).



Rys. 7. Dyfraktogramy ABK z różną zawartością nanokrzemionki.

Fig. 7. XRD patterns of AAC with different contents of SDN

Tablica 7 / Table 7

INTENSYWNOŚĆ [I] I SZEROKOŚĆ POŁÓWKOWA [FWHM] REFLEKSÓW GŁÓWNYCH FAZ BADANEGO ABK

THE INTENSITY AND FWHM OF PEAKS ORIGINATING FROM MAIN PHASES OF INVESTIGATED AAC

Próbka Samples	T[11.46Å]		T[3.07Å]		C[3.04Å]		C[1.84Å]		Q[3.34Å]	
	FWHM	I	FWHM	I	FWHM	I	FWHM	I	FWHM	I
S1	0.439	161	0.251	183	0.174	71	0.858	56	0.118	326
S2	0.423	252	0.208	202	0.146	132	0.406	81	0.121	292
S3	0.399	397	0.189	322	0.125	133	0.373	101	0.125	285
S4	0.287	429	0.186	417	0.112	139	0.363	104	0.131	276
S5	0.282	507	0.166	438	0.119	158	0.294	110	0.146	247

1) The compressive strength of AAC is increasing with the increasing content of SDN despite the lower density of AAC incorporating SDN.

2) The thermal conductivity of AAC is decreased with the increasing content of SDN. SDN can not only improve pores structure but also has an impact on the microstructure and phase composition of the solid phase of AAC and thus its thermal conductivity.

3) Incorporation of SDN results in increased content of tobermorite and C-S-H phase within investigated AAC.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support for this research from the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2242016K41003).

4. S. Panyakaew, S. Fotios, New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse, *Energ. Buildings.*, **43**,1732-1739 (2011).
5. L.Q. Jiang, D. Q. Zhao, X. H. Wang, Development of a self-thermal insulation miniature combustor, *Energ. Convers. Manage.*, **50**,1308-1313 (2009).
6. A. S. Nik, O. L. Omran, Estimation of compressive strength of self-compacted concrete with fibers consisting nano-SiO₂ using ultrasonic pulse velocity, *Constr. Build. Mater.*, **44**, 654–662 (2013).
7. E. Güneysi, M. Gesoglu, O. A. Azez, H. Ö. Öz, Physico-mechanical properties of self-compacting concrete containing treated cold-bonded fly ash lightweight aggregates and SiO₂ nano-particles, *Constr Build Mater*, **101**(1), 1142–1153 (2015).
8. A. Khaloo, M. H. Mobini, P. Hosseini, Influence of different types of nano-SiO₂ particles on properties of high-performance, *Constr Build Mater*, **113**, 188–201(2016).
9. A. N. Givi, S. A. Rashid, F. N. A. Aziz, Investigations on the development of the permeability properties of binary blended concrete with nano-SiO₂ particles, *J Compos Mater*, **45**(19), 1931-1938(2011).
10. M. Stefanidou, I. Papayianni, Influence of nano-SiO₂ on the Portland cement pastes, *Compos Part B Eng*, **43**(6), 2706-2710 (2012).
11. B. W. Jo, C. H. Kim, G. H. Tae, Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles, *Constr Build Mater*, **21**(6), 1351-1355 (2007).
12. A. Nazari, S. Riahi, The effects of SiO₂ nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete, *Compos Part B Eng*, **42**(3), 570-578(2011).
13. S. Nazari, A. Riahi, The role of SiO₂ nanoparticles and ground granulated blast furnace slag admixtures on physical, thermal and mechanical properties of self-compacting concrete, *Mater Sci Eng A*, **528**(4-5), 2149-2157(2011).
14. G. Khalaj, A. Nazari, Modeling split tensile strength of high strength self-compacting concrete incorporating randomly oriented steel fibers and SiO₂ nanoparticles, *Compos Part B Eng*, **43**(4), 1887-1892(2012).
15. A. N. Givi, S. A. Rashid, F. N. A. Aziz, Experimental investigation of the size effects of SiO₂ nano-particles on the mechanical properties of binary blended concrete, *Compos Part B Eng*, **41**(8) , 673-677 (2010).
16. P. F. Li, Q. Zhang, Performance of cement concrete road mixing nano silica, *J Changan Univ*, **30**(3), 41-46(2010).
17. G. X. Huang, X. P. Xie, Influence and test research on durability of hydraulic concrete mixing with nano silica, *People's Yellow River*, **33**(7), 138-40(2011).
18. J.Z. Xiao, Z. W. Song, Thermal conductivity of concrete test and analysis, *J Build Mater*, **13**(1) ,17-21(2010).