

dr inż. Mariusz Sobolewski<sup>1)</sup>

# Wpływ porowatości na przewodnictwo cieplne piaskowego betonu komórkowego

## *Influence of the porosity on the thermal conductivity of the sand aerated concrete*

DOI: 10.15199/33.2018.02.09

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań porowatości całkowitej, otwartej i zamkniętej oraz przewodnictwa cieplnego bloczków z autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) klas gęstości od 350 do 700 kg/m<sup>3</sup>. Uzyskano zgodność wyników wybranych parametrów z danymi literaturowymi. Sprawdzone wpływ porowatości na przewodnictwo cieplne wyrobów z ABK w technologii piaskowej i wyjaśniono przyczyny zachodzących zmian w różnych odmianach betonu komórkowego.

**Słowa kluczowe:** beton komórkowy; porowatość całkowita; pory otwarte; pory zamknięte; przewodnictwo cieplne; aparat pływowy HFM; piknometr gazowy; piknometr quasi-cieczowy.

**Abstract.** The paper presents results of total, open and closed porosity and thermal conductivity coefficient of commercially AAC products in the density classes from 350 to 700 kg/m<sup>3</sup>. The results of selected parameters were matched with the literature data. The influence of different porosity on the thermal conductivity of AAC products in sand technology was investigated and the causes of changes in various types of aerated concrete were explained.

**Keywords:** aerated concrete; cellular concrete; total porosity; open pores; closed pores; thermal conductivity; HFM apparatus; gas pycnometer; quasi-liquid pycnometer.

Polska jest największym wytwórcą betonu komórkowego w Europie, a jakość wykonywanych wyrobów dorównuje europejskim стандартам [15]. Autoklawizowany beton komórkowy (ABK) jest materiałem konstrukcyjno-izolacyjnym stosowanym w budownictwie mieszkaniowym, przemysłowym i usługowym. Beton komórkowy ma największy udział w rynku krajowym w kategorii materiałów ściennych (40%) [4, 6]. Są to wyroby o kapilarno-porowatej strukturze i bardzo dużej porowatości (65 – 90%), produkowane najczęściej w technologii piaskowej. W związku z tym, że gęstość związana jest z porowatością, w procesie produkcyjnym otrzymuje się wyroby z ABK w klasie gęstości od 300 do 800 kg/m<sup>3</sup>. W betonie komórkowym występują dwa zasadnicze rodzaje porów: powietrzne o wielkości 0,5 ÷ 3 mm i szkieletowe o dużo mniejszej średnicy, rzędu 10 ÷ 120 nm. Te dwa zakresy wielkości porów wykazują wąski i monomodalny rozkład [4, 11]. Ze względu na ograniczenia porozymetrii ręcznej metodą tą mierzone są pory powietrzne do 1 mm. Pełną charakterystykę struktury porów można otrzymać, stosując uzupełniające techniki instrumentalne.

W zależności od metody produkcji i czynnika porotwórczego pory powietrzne stanowią 25 ÷ 70% porowatości całkowitej. Dodatkowo poziome pęknięcia rozprężne występujące w betonie komórkowym łączą pory powietrzne, co powiększa liczbę porów otwartych w strukturze tego materiału. Uznaje się, że dopiero przy gęstości objętościowej większej niż 550 kg/m<sup>3</sup> możliwa jest zamkniętokomórkowa struktura betonu komórkowego [11]. Rozkład wielkości porów oraz skład mineralny ABK decydują o jego podstawowych właściwościach użytkowych, takich jak wytrzymałość i izolacyjność cieplna. Związek między porowatością a wytrzymałością jest wykładniczy, a porowatość i przewodnictwo cieplne są odwrotnie proporcjonalne. W artykule przedstawiono strukturę porowatości w powiązaniu z przewodnictwem cieplnym wyrobów z ABK jednego z producentów na polskim rynku oraz wartości mierzone współczynnika przewodzenia ciepła, na podstawie których można określić wartości deklarowane i obliczeniowe stosowane w projektowaniu przegród budowlanych [3, 5, 12].

### Materiał i metody badań

Badaniom porowatości i przewodnictwa cieplnego poddano bloczki pięciu odmian ABK w technologii piaskowej (kla-

sy gęstości: 350, 400, 500, 600 i 700 kg/m<sup>3</sup>). Gęstość objętościową netto badanych betonów komórkowych określono zgodnie z normą [8, 9] na podstawie pomiarów masy i objętości wycinanych próbek sześciennych o wymiarach 100 x 100 x 100 mm. Natomiast do określenia porowatości zastosowano dwa piknometry automatyczne: gazowy oraz quasi-cieczowy. Porowatość całkowitą wyznaczono z gęstości piknometrycznej i obwiedniowej, które z definicji różnią się od gęstości właściwej i objętościowej. Gęstość piknometryczna odpowiada gęstości właściwej w przypadku, gdy materiał charakteryzuje się tylko porami otwartymi. Natomiast gęstość obwiedniowa jest obliczana na podstawie objętości próbki zmniejszonej o zagłębienia, które tworzą pory na jej chropowatej powierzchni. Ponadto piknometr gazowy ma zdolność mierzenia objętości porów większych od  $0,255 \times 10^{-9}$  m ze względu na wymiar cząsteczek stosowanego medium. Wykonano po 10 pomiarów w każdej klasie gęstości ABK obydwoma piknometrami na próbkach walcowych o średnicy 37 mm i wysokości 43 mm. Metodyka badań piknometrycznych została przedstawiona w pracy [14]. Z obu piknometrów wyznaczono również porowatość zamkniętą i otwartą badanych odmian ABK.

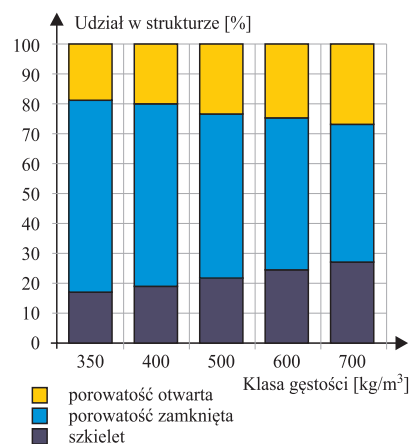
<sup>1)</sup> Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska; mariusz.sobolewski@gmail.com

Badania współczynnika przewodzenia ciepła wykonano aparatem płytowym z czujnikami gęstości strumienia ciepła FOX 600 zgodnie w normą [10]. Próbki były wcześniej sezonowane aż do uzyskania stałej masy w temperaturze  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  przy wilgotności otoczenia  $50 \pm 5\%$ . Pomiaru przewodnictwa cieplnego przeprowadzono na próbkach o grubości 120 mm w celu wyeliminowania efektu grubości (weryfikację przeprowadzono na najniższej klasie gęstości). W każdej odmianie betonu komórkowego wykonano po 6 pomiarów przewodnictwa cieplnego. Przepływ ciepła odbywał się od górnej do dolnej powierzchni próbek przy różnicy temperatury  $\Delta T = 10\text{ K}$ . Średnia temperatura badania wynosiła  $T_m = 293,15\text{ K}$  i odpowiadała temperaturze otoczenia aparatu.

## Wyniki badań

Udział porowatości zamkniętej, otwartej i szkieletu w strukturze badanych próbek ABK przedstawiono na rysunku 1. Wyniki badań wskazują na wzrost zawartości szkieletu o 10% przy zmianie klasy gęstości z 350 na  $700\text{ kg/m}^3$ . Podobny rezultat podaje Schober w pracy [11]. Jednocześnie ze wzrostem gęstości objętościowej wyrobów z ABK zwiększa się porowatość otwarta maksymalnie o 7,9% i zmniejsza porowatość zamknięta o 18,9%.

Zmiana gęstości objętościowej oznacza, że zmienia się przede wszystkim objętość porów powietrznych. Zdaniem Schobera

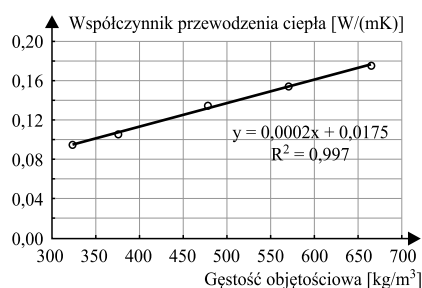


**Rys. 1. Zmiana porowatości otwartej i zamkniętej oraz szkieletu w strukturze badanych próbek z ABK**

*Fig. 1. The change in open and closed porosity and skeleton in the structure of AAC products*

[11], pory powietrzne stanowią ok. 70% w klasie gęstości  $350\text{ kg/m}^3$  i ok. 40% w klasie  $700\text{ kg/m}^3$ . Zatem wraz ze wzrostem gęstości objętościowej występuje zmniejszenie objętości porów powietrznych ok. 30%. Z kolei objętość porów szkieletowych zwiększa się ok. 20% (ok. 15% w klasie 350 i ok. 35% w klasie 700).

Zależność przewodnictwa cieplnego od gęstości objętościowej analizowanych wyrobów z ABK w stanie suchym jest liniowa (rysunek 2). Trend zmian jest zgodny z wynikami literaturowymi [7, 11]. Dwukrotne zwiększenie gęstości objętościowej powoduje również dwukrotny wzrost przewodnictwa cieplnego betonów komórkowych. Przy zmianie klasy gęstości z 350 na  $700\text{ kg/m}^3$  współczynnik przewodzenia ciepła zwiększył się o  $0,08\text{ W/(mK)}$ . Jest to spowodowane tym, że wartość współczynnika przewodzenia ciepła zależy od udziału poszczególnych faz oraz ich przewodnictwa cieplnego. Szkielet charakteryzuje

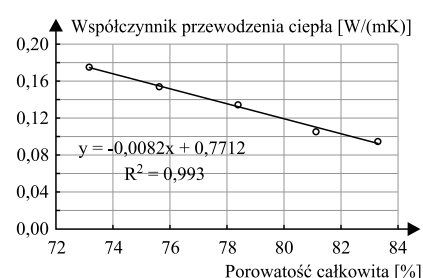


**Rys. 2. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od gęstości objętościowej badanych odmian betonu komórkowego w technologii piaskowej**

*Fig. 2. The dependence of the thermal conductivity coefficient on the bulk density of tested AAC products in the sand technology*

się dużo większym przewodnictwem cieplnym niż składnik gazowy, a więc im większy jest udział szkieletu, tym większa jest wartość współczynnika przewodzenia ciepła betonu komórkowego.

Obserwowany trend zmiany przewodnictwa cieplnego w zależności od gęstości potwierdza zależność przewodnictwa cieplnego od porowatości całkowitej badanych wyrobów z ABK. Pomiędzy największą i najmniejszą klasą gęstości zmiana porowatości całkowitej wynosi 10%, przy czym materiał o większej gęstości charakteryzuje się mniejszą porowatością całkowitą (zależność pomiędzy porowatością całkowitą i współczynnikiem przewodzenia ciepła jest odwrotnie proporcjonalna). Wyniki badań przedstawiono na rysunku 3.



**Rys. 3. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od porowatości całkowitej badanych odmian ABK o klasach gęstości 350 ÷  $700\text{ kg/m}^3$**

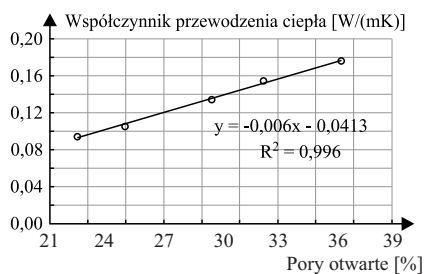
*Fig. 3. The dependence of thermal conductivity coefficient on total porosity by various types AAC with density class of 350 ÷  $700\text{ kg/m}^3$*

Zakłada się, że przepływ ciepła w betonach komórkowych odbywa się przez przewodzenie w matrycy szkieletu oraz przez przewodzenie i promieniowanie w gazie wypełniającym pory (powietrzne i szkieletowe). Przepływ ciepła przez konwekcję w porach o rozmiarach komórek mniejszych niż 3 mm jest bardzo niewielki i może być pominięty [13]. Ponadto wyeliminowanie składnika konwekcyjnego w pomiarach przepływu ciepła aparatami płytowymi uzyskuje się, kierując strumień ciepła w dół, co również zostało uwzględnione.

Z przesłanek literaturowych wynika, że klasy gęstości 600 i  $700\text{ kg/m}^3$  charakteryzują się zamkniętymi porami powietrznymi o mniejszych wymiarach (jednocześnie występuje zmniejszenie ich liczby i zwiększenie porów szkieletowych) [11]. Przyczynia się to do zwiększenia udziału szkieletu na drodze przepływu ciepła, co powoduje zwiększenie składowej przewodzenia. Dużą rolę w wymianie ciepła przez promieniowanie odgrywają interfejsy międzyfazowe, tj. przejścia z jednego ośrodka do drugiego (z gazowego do stałego i odwrotnie). Przejścia między różnymi ośrodkami mogą powodować odbijanie fotonów, co skutecznie osłabia promieniowanie cieplne. Wykazano to na przykładzie zamkniętokomórkowych izolacji cieplnych typu EPS [1, 2]. Wraz ze zwiększeniem liczby interfejsów międzyfazowych udział składowej radiacyjnej w całkowitym transporcie ciepła ulega zmniejszeniu. Ponadto w badanych wyrobach obserwuje się wzrost udziału porów otwartych maksymalnie o 13,9%. Zwiększona porowatość otwarta w przypadku wyższych klas gęstości ABK świadczy o występowaniu w większej liczbie pęknięć rozprężnych. W betonach

komórkowych o dużej gęstości pozornej wzrost przewodnictwa cieplnego nie jest bardzo duży w porównaniu z najbliższymi odmianami wyrobów. Wynika z tego, że jest on podyktowany głównie przez większy udział szkieletu, lecz wzrost porowatości otwartej nie pozostaje bez znaczenia.

Gębarowski i in. [4] podali związek korelacyjny współczynnika przenikania ciepła ABK z gęstością i porowatością otwartą wyrobów z jedenastu zakładów produkcyjnych oraz osobno dla dwóch spośród nich (zakres gęstości  $300 \div 700 \text{ kg/m}^3$ ). Skład mineralogiczny różnych wytwórni powoduje różnice w opisie matematycznym materiału, dlatego do celów porównawczych struktury porów oraz liczby mikrorys rozprężnych w wyrobach z ABK można stosować prostszą postać związku, dotyczącą tylko porowatości otwartej lub zawartości porów otwartych. Na rysunku 4 przedstawiono regresję liniową pomiędzy współczynnikiem przewodzenia ciepła a procentową zawartością porów otwartych.



**Rys. 4. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od zawartości porów otwartych w ABK o klasach gęstości  $350 \div 700 \text{ kg/m}^3$**

Fig. 4. The dependence of thermal conductivity coefficient on open pore contents in AAC products with density classes of  $350 \div 700 \text{ kg/m}^3$

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono zmianę porowatości całkowitej, otwartej i zamkniętej występującą w wyrobach z ABK piaskowego o różnych klasach gęstości. Wraz ze wzrostem gęstości betonu komórkowego obserwuje się zmniejszenie porowatości zamkniętej w znacznie więk-

szym stopniu niż zwiększenie porowatości otwartej. W wyniku zmniejszenia wielkości i liczby porów powietrznych w strukturze ABK [11], ze wzrostem gęstości pojawia się więcej ścian komórkowych, o czym świadczy obserwowany wzrost udziału szkieletu. Efektem zwiększenia udziału szkieletu i zmniejszenia porowatości zamkniętej jest zmniejszenie porowatości całkowitej. Procentowy wzrost zawartości porów otwartych, a tym samym porowatości otwartej może być podyktowany większą liczbą mikrorys w cięższych odmianach ABK. Z obserwacji bloczków z ABK wynika, że zdarzają się w nich rysy widoczne za pomocą lupy do pomiaru szerokości rozwarcia rys, a więc nie można wykluczyć również występowania większej liczby mikrorys. W celu postawienia jednoznacznego wniosku należałoby przeprowadzić badania bloczków za pomocą dokładniejszej aparatury. Obecność mikrorys jest bezpośrednią przyczyną zmian w przewodnictwie cieplnym betonu komórkowego. Redukcja pęknięć i uszczelnienie mikrostruktury betonu komórkowego mogą przynieść poprawę izolacyjności cieplnej i korzyści związane ze zmniejszeniem anizotropii wytrzymałości wyrobów z ABK. Zmniejszenie wielkości porów powietrznych w betonie komórkowym nie ma istotnego wpływu na jego wytrzymałość [11], ale ma duże znaczenie w przypadku przewodnictwa cieplnego.

Przedstawione zależności liniowe przewodnictwa cieplnego i gęstości oraz przewodnictwa cieplnego i porowatości dotyczą asortymentu jednego z producentów. Mogą one posłużyć do przybliżonej oceny wyrobów z ABK i prognozowania właściwości użytkowych w pozostałych przypadkach (materiał o tej samej gęstości z poszczególnych zakładów produkcyjnych jest podobny pod względem mikrostruktury porowatości [4]).

## Literatura

[1] Baillis Dominique, Remi Coquard, Joana Randrianalisoa, Leonid Dombrovsky, Raymond Viskanta. 2013. „Thermal radiation properties of highly porous cellular foams”. *Special Topics & Re-*

*views in Porous Media – An International Journal* 4 (2): 111 – 136.

[2] Ferkl Pavel, Richard Pokorný, Juraj Kosek. 2014. „Multiphase approach to coupled conduction-radiation heat transfer in reconstructed polymeric foams”. *International Journal of Thermal Sciences* 83: 68 – 79.

[3] Firkowicz-Pogorzelska Katarzyna. 2001. „Metodyka określania wartości obliczeniowej współczynnika przewodzenia ciepła materiałów budowlanych”. *Prace ITB, Kwartalnik* 119 (3): 33 – 53.

[4] Gębarowski Piotr, Katarzyna Łaskawiec, Piotr Zajac. 2015. „Korelacje pomiędzy właściwościami fizykotechnicznymi a strukturą porowatości ABK”. *Materiały Budowlane* 519 (11): 214 – 216. DOI: 10.15199/33.2015.11.67.

[5] Łaskawiec Katarzyna. 2014. „Parametry cieplne ścian z ABK oraz metodologia ich wyznaczania”. *Materiały Budowlane* 502 (6): 106 – 107.

[6] Misiewicz Lech. 2012. „Rynek materiałów budowlanych do wznoszenia ścian w Polsce w 2011 r.”. *Materiały Budowlane* 476 (4): 2 – 3.

[7] Narayanan N., K. Ramamurthy. 2000. „Structure and properties of aerated concrete: a review”. *Cement & Concrete Composites* 22: 321 – 329.

[8] PN-EN 771-4+A1:2015. Wymagania dotyczące elementów murowych. Część 4. Elementy murowe z autoklawizowanego betonu komórkowego.

[9] PN-EN 772-13:2001. Metody badań elementów murowych. Część 13. Określenie gęstości netto i gęstości brutto elementów murowych w stanie suchym (z wyjątkiem kamienia naturalnego).

[10] PN ISO 8301: 1998. Izolacja cieplna. Określanie oporu cieplnego i właściwości z nim związanych. Aparat płytowy z czujnikami gęstości strumienia cieplnego.

[11] Schober Georg. 2011. „Porosity in autoclaved aerated concrete (AAC): A review on pore structure, types of porosity, measurement methods and effects of porosity on properties”. *Cement Wapno Beton, Special Issue*: 39 – 43.

[12] Schoch Torsten, Oliver Krefit. 2012. „Wpływ wilgotności na przewodność cieplną ABK”. *Materiały Budowlane* 478 (6): 46 – 48.

[13] Sobolewski Mariusz, Aurelia Błażejczyk. 2014. „Izolacyjność cieplna wysokoprężnej pianki poliuretanowej w aerozolu”. *Izolacje* (11/12): 69 – 72.

[14] Webb Paul A., Clyde Orr. 1997. „Analytical Methods in Fine Particle Technology”. *Micromeritics Instrument Corporation*: 193 – 218.

[15] Zapotoczna-Sytek Genowefa. 2013. *Autoklawizowany beton komórkowy. Technologia Właściwości Zastosowanie*. Warszawa. Wydawnictwo PWN/Stowarzyszenie Producentów Betonów.

Przyjęto do druku: 13.12.2017 r.

Partner działu: **Stowarzyszenie Producentów Betonów**

