

dr inż. Piotr Gębarowski¹⁾*dr inż. Katarzyna Łaskawiec¹⁾mgr inż. Piotr Zajac¹⁾

Korelacje pomiędzy właściwościami fizykotechnicznymi a strukturą porowatości ABK

DOI: 10.15199/33.2015.11.67

Podstawowe parametry techniczne autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) zależą m.in. od składu mineralnego i struktury. Ciągły rozwój technologii produkcji ABK powoduje potrzebę ustalenia zależności pomiędzy właściwościami fizykomechanicznymi a strukturą porowatości oraz składem fazowym. Mogłoby to pomóc we wstępnej ocenie właściwości betonu, z którego w Polsce realizowanych jest ok. 40% ścian. W artykule pokazano wykorzystanie metod badań strukturalnych do oceny właściwości technicznych autoklawizowanego betonu komórkowego oraz przedstawiono model matematyczny opisujący zależności między podstawowymi parametrami technicznymi i porowatością.

Określenie korelacji pomiędzy badanymi właściwościami

Analizie poddano wyniki badań 64 próbek autoklawizowanego betonu komórkowego wyprodukowanego wg technologii piaskowej (gęstości 300 ÷ 700 kg/m³), pochodzącego z bieżącej produkcji, z 11 wytwórni w Polsce. Określono parametry użytkowe ABK wg PN-EN 771-4:2012, takie jak: gęstość; wytrzymałość na ściskanie; izolacyjność cieplna; skurcz; absorpcja wody; paroprzepuszczalność; mrozoodporność. Strukturę porowatości oznaczono za pomocą porozymetru rtęciowego. Do analizy makroporowatości wykorzystano skaner z możliwością zapisu zdjęć w formie elektronicznej wraz z programem Motic Images Advanced, który umożliwia zliczanie i kwalifikację porów.

Wyniki badań porowatości autoklawizowanego betonu komórkowego wskazują, że:

- materiał o tej samej gęstości z poszczególnych zakładów jest stosunkowo jednorodny pod względem budowy mikrostruktury porowatości;

- w rozkładzie porów, przy założonym podziale na określone grupy ich wielkości, zaobserwowano występowanie dwóch maksimów: w przypadku grupy 30 – 90 μm oraz 0,011 – 0,12 μm;

¹⁾ Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych

* Autor do korespondencji:

e-mail: p.gebarowski@icimb.pl

- pole powierzchni całkowitej porów, ich średnia średnica, porowatość otwarta, przepuszczalność zależą do gęstości ABK i jest to zależność odwrotnie proporcjonalna;

- współczynnik krętości porów jest wprost proporcjonalny do gęstości ABK.

W celu określenia siły liniowego związku między poszczególnymi właściwościami a strukturą porowatości obliczono współczynnik korelacji (R^2). W literaturze [2, 3] podane są różne kryteria oceny korelacji. W artykule przyjęto, że gdy wartość współczynnika korelacji (R^2) wynosi:

- < 0,2 – nie ma związku liniowego pomiędzy badanymi cechami;

- 0,2 ÷ 0,4 – występuje zależność liniowa wyraźna, lecz niska;

- 0,4 ÷ 0,7 – zależność liniowa jest umiarkowana;

- 0,7 ÷ 0,9 – zależność liniowa jest znacząca;

- powyżej 0,9 – zależność liniowa jest bardzo silna.

W badaniach założono, że istotne są zależności liniowe, gdy bezwzględna wartość współczynnika korelacji (R^2) wyniosła powyżej 0,7. Korelacje właściwości betonu komórkowego przeanalizowano w przypadku:

- całej populacji próbek (tabela 1);

- próbek z dwóch grup najczęściej reprezentowanych gęstości ABK: 400 kg/m³ (tabela 2) i 600 kg/m³ (tabela 3);

- wybranych próbek ABK z dwóch wytwórni (Zakład A – tabela 4 i Zakład B – tabela 5).

Tabela 1. Korelacje między właściwościami fizykotechnicznymi i cechami struktury porowatości ABK w przypadku wszystkich próbek (64 próbki) [4]

Table 1. Correlations between the physical and mechanical properties and the pore structure of all AAC specimens (64 specimens) [4]

Właściwość/cecha struktury	Gęstość	Wytrzymałość na ściskanie	Absorpcja wody	Skurcz całkowity	Współczynnik przewodzenia ciepła
Wytrzymałość na ściskanie	b. silna	x	umiar.	brak	b. silna
Absorpcja wody	umiar.	umiar.	x	brak	niska
Skurcz całkowity	brak	brak	brak	x	brak
Współ. przewodzenia ciepła	b. silna	b. silna	niska	brak	x
Gęstość pozorna	b. silna	b. silna	niska	brak	b. silna
Porowatość otwarta	b. silna	b. silna	niska	brak	b. silna
Liczba porów 30 – 90 μm	znacząca	znacząca	umiar.	brak	znacząca
Liczba porów 0,01 – 0,1 μm	znacząca	znacząca	umiar.	niska	znacząca
Całkowite pole powierzchni porów	umiar.	niska	brak	niska	umiar.

Analiza korelacji właściwości i struktury porowatości betonu wszystkich próbek (tabela 1) wskazuje, że jest duża liczba zależności liniowych bardzo silnych i znaczących w przypadku gęstości ABK, jego wytrzymałości na ściskanie i współczynnika przewodzenia ciepła. Natomiast nie stwierdzono zależności znaczącej i bardzo silnej w przypadku absorpcji wody po 90 min, a w przypadku skurczu, paroprzepuszczalności, mrozoodporności betonu brak było nawet zależności umiarkowanej.

W tabelach 2 i 3 przedstawiono korelacje właściwości i struktury porowatości w przypadku próbek ABK gęstości 600 i 400 kg/m³. W przypadku gęstości, wytrzymałości na ściskanie i współczynnika przewodzenia ciepła są one znacznie słabsze w porównaniu z korelacją przedstawioną w tabeli 1. Natomiast w przypadku próbek gęstości 400 kg/m³ pojawiła się bardzo silna korelacja pomiędzy absorpcją wody a skurczem całkowitym oraz znacząca pomiędzy skurczem całkowitym a wytrzymałością na ściskanie. Analiza wykazała, że nie ma zależności lub jest ona bardzo mała między mrozoodpornością, paroprzepuszczalnością a innymi badanymi cechami ABK.

Analizując współczynniki korelacji wyznaczone w przypadku próbek ABK pochodzących z wytwórni A i B (tabela 4 i 5) oraz porównując je z korelacjami przedstawionymi w tabelach 1 – 3 stwierdzono, że występuje więcej znaczących i bardzo silnych korelacji. Dotyczy to zależności między

Tabela 2. Korelacje między właściwościami fizykotechnicznymi i cechami struktury porowatości w przypadku próbek ABK gęstości 600 kg/m³ [4]

Table 2. Correlations between the physical and mechanical properties and the pore structure of AAC specimens of 600 kg/m³ density grade [4]

Właściwości/cecha struktury	Gęstość	Wytrzymałość na ściskanie	Absorpcja wody	Skurcz całkowity	Współczynnik przewodzenia ciepła
Wytrzymałość na ściskanie	niska	x	umiar.	umiar.	brak
Absorpcja wody	umiar.	umiar.	x	brak	znacząca
Skurcz całkowity	niska	umiar.	brak	x	niska
Współ. przewodzenia ciepła	brak	umiar.	znacząca	niska	x
Gęstość pozorna	brak	brak	umiar.	niska	umiar.
Porowatość otwarta	brak	brak	niska	umiar.	umiar.
Liczba porów 30 – 90 μm	niska	brak	umiar.	brak	niska
Liczba porów 0,01 – 0,1 μm	niska	brak	niska	niska	umiar.
Całkowite pole powierzchni porów	brak.	znacząca	umiar.	brak	umiar.

Tabela 3. Korelacje między właściwościami fizykotechnicznymi i cechami struktury porowatości w przypadku próbek ABK gęstości 400 kg/m³ [4]

Table 3. Correlations between the physical and mechanical properties and the pore structure of AAC specimens of 400 kg/m³ density grade [4]

Właściwości/cecha struktury	Gęstość	Wytrzymałość na ściskanie	Absorpcja wody	Skurcz całkowity	Współczynnik przewodzenia ciepła
Wytrzymałość na ściskanie	umiar.	x	umiar.	znacząca	b. silna
Absorpcja wody	brak	umiar.	x	b. silna	umiar.
Skurcz całkowity	brak	znacząca	b. silna	x	umiar.
Współ. przewodzenia ciepła	znacząca	b. silna	umiar.	umiar.	x
Gęstość pozorna	umiar.	znacząca	niska	umiar.	znacząca
Porowatość otwarta	umiar.	znacząca	niska	umiar.	umiar.
Liczba porów 30 – 90 μm	umiar.	umiar.	niska	brak	umiar.
Liczba porów 0,01 – 0,1 μm	brak	znacząca	znacząca	znacząca	umiar.
Całkowite pole powierzchni porów	umiar.	umiar.	brak	brak	umiar.

Tabela 4. Korelacje między właściwościami fizykotechnicznymi i cechami struktury porowatości w przypadku próbek ABK z Zakładu A [4].

Table 4. Correlations between the physical and mechanical properties and the pore structure of AAC specimens from plant [4]

Właściwości/cecha struktury	Gęstość	Wytrzymałość na ściskanie	Absorpcja wody	Skurcz całkowity	Współczynnik przewodzenia ciepła
Wytrzymałość na ściskanie	b. silna	x	b. silna	znacząca	b. silna
Absorpcja wody	b. silna	b. silna	x	znacząca	b. silna
Skurcz całkowity	umiar.	znacząca	znacząca	x	umiar.
Współ. przewodzenia ciepła	b. silna	b. silna	b. silna	umiar.	x
Gęstość pozorna	b. silna	b. silna	b. silna	umiar.	b. silna
Porowatość otwarta	b. silna	b. silna	b. silna	umiar.	b. silna
Liczba porów 30 – 90 μm	umiar.	niska	umiar.	umiar.	b. silna
Liczba porów 0,01 – 0,1 μm	b. silna	b. silna	b. silna	umiar.	b. silna
Całkowite pole powierzchni porów	b. silna	b. silna	znacząca	umiar.	b. silna

dzy gęstością, wytrzymałością na ściskanie, współczynnikiem przenikania ciepła, absorpcją wody a innymi właściwościami i strukturą porowatości. Natomiast w przypadku skurczu całkowitego próbek z Zakładu B korelacja jest znacząca, zaś w Zakładzie A – umiarkowana. Nastąpił także wzrost zależności paroprzepuszczalności od innych cech ABK – określano ją jako umiarkowaną (0,4 – 0,7). Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można wysnuć wniosek, że nie ma zależności mrozoodporności od innych cech ABK lub jest ona bardzo mała.

Obserwowany wzrost korelacji między strukturą porowatości i właściwościami fi-

zykotechnicznymi jest spowodowany różnicami w produkcji betonu komórkowego w poszczególnych wytwórniach (także w przypadku takiej samej gęstości) oraz podobieństwem wytwarzania materiału niezależnie od gęstości w tym samym zakładzie.

Modele matematyczne

Biorąc pod uwagę wyniki wszystkich badanych próbek ABK i ich zależności, podjęto się opracowania modelu matematycznego [4] w przypadku:

- wytrzymałości na ściskanie;
- współczynnika przewodzenia ciepła;
- skurczu całkowitego;

- absorpcji wody po 90 min.

Modele matematyczne dotyczą grup próbek, których zależności między właściwościami i strukturą porowatości były bardzo silne lub znaczące. Zastosowano metodę nośników informacji Hellwiga. Do konstrukcji modeli matematycznych posłużyły te zmienne objaśniające, dla których otrzymano najwyższą wartość integralnej pojemności informacyjnej.

Wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów, na podstawie wybranych zmiennych objaśniających, obliczono równanie opisujące wytypowane właściwości fizykotechniczne w przypadku populacji wszystkich badanych próbek oraz próbek z zakładu A i B (tabele 1, 4 i 5). Zależności te wyrażają się równaniami:

■ **wytrzymałość na ściskanie: całej populacji:** $\hat{y} = -1,822 + 0,00117 x_1 + 45,1036 x_2 - 0,00653 x_3$ (gdzie: x_1 – gęstość, x_2 – współczynnik przenikania ciepła, x_3 – porowatość otwarta); **zakładu A:** $\hat{y} = 1,7923 - 0,0044 x_1 + 55,9963 x_2 - 0,040 x_3$; **zakładu B:** $\hat{y} = 2,1637 - 0,0051 x_1 + 68,3326 x_2 - 0,0525 x_3$;

■ **skurcz całkowity: całej populacji** – nie wyliczono, ze względu na zbyt małe wartości współczynników korelacji; **zakładu A:** $\hat{y} = 0,3120 - 0,0163 x_2$ (x_2 – wytrzymałość na ściskanie); **zakładu B:** $\hat{y} = 0,3245 + 0,00012 x_1 - 0,0012 x_3$;

■ **współczynnik przenikania ciepła: całej populacji:** $\hat{y} = 0,2264 + 0,00017 x_1 - 0,00236 x_2$ (gdzie: x_2 – porowatość otwarta); **zakładu A:** $\hat{y} = 0,14677 + 0,00021 x_1 - 0,00156 x_2$; **zakładu B:** $\hat{y} = -0,04789 + 0,00027 x_1 + 0,00061 x_2$;

■ **absorpcja wody po 90 min: całej populacji:** $\hat{y} = 121,0142 - 0,4715 x_1 - 1,22847 x_2$ (gdzie: x_1 – mediana objętościowa średnicy porów; x_2 – liczba porów 90 – 30 μm); **zakładu A:** $\hat{y} = -6,101 + 16,0049 x_2$ (gdzie: x_2 – wytrzymałość na ściskanie); **zakładu B:** $\hat{y} = 36,1513 + 0,0268 x_1 - 1,1172 x_2 + 0,1146 x_3$ (gdzie: x_1 – gęstość, x_2 – wytrzymałość na ściskanie, x_3 – porowatość otwarta).

W tabeli 6 zestawiono zmienne objaśniające wybrane do obliczenia zależności na podstawie zastosowanej metody nośników informacji Hellwiga, parametry analizy wariancji oraz wartości obliczone dla testu Fischera-Snedecora i wartość krytyczną F odczytaną z tablicy statystycznej rozkładu F Snedecora z v_1, v_2 stopniami swobody dla P ($F \geq F_{0,05}$). Na podstawie analizy danych z tabeli 6 stwierdzono, że w przypadku modelu dotyczącego wytrzymałości na ściskanie wszystkich anali-

zowanych grup, wytypowano te same zmienne objaśniające. Wartość obserwowana F-stat wszystkich grup jest większa niż F-kryt. Można zatem uznać, że uzyskane zależności są użyteczne do prognozowania wartości wytrzymałości na ściskanie.

Tabela 5. Korelacje między właściwościami fizykotechnicznymi i cechami struktury porowatości w przypadku próbek ABK z Zakładu B [4]

Table 5. Correlations between the physical and mechanical properties and the pore structure of AAC specimens from plant B [4]

Właściwość/cecha struktury	Gęstość	Wytrzymałość na ściskanie	Absorpcja wody	Skurcz całkowity	Współczynnik przewodzenia ciepła
Wytrzymałość na ściskanie	b. silna	x	b. silna	znacząca	b. silna
Absorpcja wody	b. silna	b. silna	x	znacząca	b. silna
Skurcz całkowity	znacząca	znacząca	znacząca	x	umiar.
Współ. przewodzenia ciepła	b. silna	b. silna	b. silna	znacząca	x
Gęstość pozorną	b. silna	b. silna	b. silna	znacząca	b. silna
Porowatość otwarta	b. silna	b. silna	b. silna	znacząca	b. silna
Liczba porów 30 – 90 μm	b. silna	b. silna	b. silna	znacząca	b. silna
Liczba porów 0,01 – 0,1 μm	b. silna	b. silna	b. silna	znacząca	b. silna
Całkowite pole powierzchni porów	znacząca	znacząca	znacząca	umiar.	znacząca

Tabela 6. Zmienne objaśniające zastosowane w Metodzie Hellwiga parametry analizy wariancji dla modeli matematycznych i wartości dla Testu Fischera-Snedecora [4]

Table 6. Explanatory variables used with the Hellwig method, covariance analysis parameters for mathematical models, and values used in the Fischer-Snedecor test [4]

Liczba próbek	Analizowane próbki		
	wszystkie 64	wytwórnia A 12	wytwórnia B 18
Wytrzymałość na ściskanie			
Zmienne objaśniające ¹⁾	gęstość; porowatość otwarta, całkowite pole powierzchni porów		
Współczynnik korelacji wielokrotnej	0,9549	0,9921	0,9902
R ²	0,9119	0,9842	0,9804
Błąd standardowy	0,4714	0,1689	0,3135
Rozkład F Snedecora ²⁾	F-stat	206,9364	165,9805
	F-kryt	2,7498	3,4900
Skurcz całkowity			
Zmienne objaśniające	Równanie niewyliczone ze względu na brak korelacji znaczących i bardzo silnych	wytrzymałość na ściskanie	gęstość; porowatość otwarta
Współczynnik korelacji wielokrotnej		0,7436	0,5880
R ²		0,5530	0,3457
Błąd standardowy		0,0176	0,0342
Rozkład F Snedecora	F-stat	12,3695	3,9631
	F-kryt	4,7470	3,5550
Współczynnik przenikania ciepła			
Zmienne objaśniające	porowatość otwarta; gęstość,		
Współczynnik korelacji wielokrotnej	0,9752	0,9975	0,9955
R ²	0,9511	0,9950	0,9911
Błąd standardowy	0,0065	0,0028	0,0027
Rozkład F Snedecora	F-stat	592,76	1503,75
	F-kryt	3,1412	3,8850
Absorpcja wody po 90 minutach			
Zmienne objaśniające	– mediana objętościowa średnicy porów, – liczba porów 90 – 30 μm	– wytrzymałość na ściskanie	– gęstość; wytrzymałość na ściskanie; porowatość otwarta
Współczynnik korelacji wielokrotnej	0,7097	0,9659	0,9323
R ²	0,5037	0,9329	0,8692
Błąd standardowy	17,5606	5,4353	6,0357
Rozkład F Snedecora	F-stat	30,9539	62,5601
	F-kryt	3,1412	4,7470

¹⁾ Zmienne objaśniające wybrane do obliczenia zależności na podstawie zastosowanej metody nośników informacji Hellwiga

²⁾ Gdy F-stat > F-kryt – obliczona zależność jest użyteczna do prognozowania wartości obliczeniowej

nie. Wartość R² (która mówi, ile procent obliczonej wartości można wyjaśnić za pomocą zmian zmiennych objaśniających wybranych do równania), we wszystkich analizowanych przypadkach, jest również duża i wynosi w przypadku wszystkich

próbek – 0,91, a wytwórni A i B – powyżej 0,98.

Do oceny skurczu całkowitego próbek z wytwórni A i B wytypowano różne zmienne objaśniające. Wartości obserwowane F-stat są większe niż krytyczne. Wartość R² dla wytwórni A i B nie jest duża i wynosi odpowiednio 0,55 i 0,34, ale obliczone zależności są użyteczne do prognozowania wartości skurczu całkowitego.

W przypadku współczynnika przenikania ciepła wytypowano te same zmienne objaśniające do wszystkich badanych próbek oraz wytwórni A i B. Wartość obserwowana F-stat dla wszystkich grup jest większa niż krytyczna F, a wartości R² są bardzo duże (97,5% dla całej populacji i ponad 99% dla próbek z Zakładów A oraz B). Obliczenia uzyskane z modelu matematycznego są użyteczne do prognozowania wartości współczynnika przenikania ciepła, przy wykorzystaniu wartości gęstości i porowatości otwartej betonu komórkowego.

W przypadku absorpcji wody po 90 min wytypowano dla każdej grupy różne zmienne objaśniające. Wartość R² grup próbek analizowanych z podziałem na wytwórnię jest duża (93% i 87%), natomiast w przypadku wszystkich badanych wynosi tylko 50%. Jednak wartość obserwowana F-stat jest większa niż wartość krytyczna F dla wszystkich analizowanych grup próbek, co sprawia, że modele matematyczne umożliwiały prognozowanie wartości absorpcji.

Zależności uzyskane w przypadku poszczególnych wytwórni mogą być użyteczne z większym prawdopodobieństwem do prognozowania wartości obliczeniowej właściwości fizykotechnicznych niż w przypadku całej populacji próbek. Uważamy, że celowa jest kontynuacja badań właściwości fizykotechnicznych i mikrostruktury z uwzględnieniem pochodzenia materiału. Modele matematyczne otrzymane na podstawie wyników takich badań mogą być pomocne w prognozowaniu wartości właściwości użytkowych betonu komórkowego.

Literatura

- [1] Balkovic S., Zapotoczna-Sytek G., Autoklawizowany beton komórkowy. Technologia. Właściwości. Zastosowanie, Wydawnictwo PWN, Warszawa 2013.
- [2] Steczkowski J., Zeliaś A., Statystyczne metody analizy cech jakościowych, Wydawnictwo PWE, Warszawa 1981.
- [3] Sobczyk M., Statystyka, Wydawnictwo PWN, Warszawa 2007.
- [4] Określenie zależności wybranych właściwości fizykotechnicznych autoklawizowanego betonu komórkowego od mikrostruktury i struktury porowatości oraz od składu fazowego. Sprawozdanie ICiMB 2014.

Przyjęto do druku: 17.09.2015 r.