

Wpływ rodzaju środka pianotwórczego na właściwości pianobetonu o bardzo małej gęstości

Effect of the type of foaming agent on the properties of ultra-low-density foam concrete

prof. dr hab. inż. Jacek Gołaszewski^{1*)}

ORCID: 0000-0003-4110-5581

prof. dr hab. inż. Barbara Klemczak¹⁾

ORCID: 0000-0002-8102-894X

dr inż. Aneta Smolana¹⁾

ORCID: 0000-0002-6757-9841

dr inż. Małgorzata Gołaszewska¹⁾

ORCID: 0000-0002-5249-2639

mgr inż. Grzegorz Cygan¹⁾

ORCID: 0000-0002-5534-704X

dr inż. Christoph Mankel²⁾

ORCID: 0000-0001-8376-6156

dr inż. Ignacio Peralta²⁾³⁾

ORCID: 0000-0003-4316-9909

dr inż. Frank Röser⁴⁾

ORCID: 0000-0002-5926-1593

prof. dr inż. Eduardus A. B. Koenders²⁾

ORCID: 0000-0001-8664-2554

DOI: 10.15199/33.2022.07.08

Streszczenie. Pianobeton powstaje przez wprowadzenie piany, wytworzonej przy użyciu środka pianotwórczego, do zaczynu cementowego. W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu środka spieniającego na właściwości termiczno-mechaniczne pianobetonów o bardzo małej gęstości. Badane próbki pianobetonu z proteinowym środkiem spieniającym charakteryzuje bardziej jednolita struktura, większa wytrzymałość na ściskanie oraz mniejszy współczynnik przewodzenia ciepła w porównaniu z pianobetonem z syntetycznym środkiem spieniającym.

Słowa kluczowe: pianobeton; środek pianotwórczy; wytrzymałość na ściskanie; przewodnictwo cieplne.

Abstract. Foam concrete is made by introducing foam, produced with a foaming agent, into the cement slurry. The article presents the results of research on the effect of the type of foaming agent on the thermo-mechanical properties of ultra-light foam concrete. The examined samples of foam concrete with a protein foaming agent are characterized by a more uniform structure, greater compressive strength and a lower heat conductivity compared to foam concrete based on a synthetic foaming agent.

Keywords: foam concrete; foaming agent; compressive strength; thermal conductivity.

Pianobeton, w którym napowietrzenie zaczynu cementowego wykonywane jest mechanicznie z wykorzystaniem środka spieniającego, został pierwszy raz zastosowany w latach dwudziestych XX wieku [1]. Sukcesywnie rozwijany oraz udoskonalany, obecnie znajduje zastosowanie w budownictwie przede wszystkim jako materiał izolacyjny lub wypełniający oraz m.in. jako podbudowa dróg.

W przypadku pianobetonu o małej gęstości, jego właściwości zależą m.in. od rodzaju środka pianotwórczego,

sposobu wytwarzania i dodawania piany oraz składu zaczynu cementowego [2]. Uzyskanie lekkiego pianobetonu o odpowiedniej wytrzymałości na ściskanie i jednocześnie małej przewodności cieplnej jest zatem głównym wyzwaniem podczas projektowania jego składu [3]. Wiadomo, że wytrzymałość na ściskanie oraz współczynnik przewodzenia ciepła pianobetonu zmniejszają się wraz z obniżeniem jego gęstości, ale istotne znaczenie ma również rozmieszczenie i rozmiar pęcherzyków powietrza, a więc rodzaj jego struktury [4 – 6]. Czynnikiem silnie wpływającym na strukturę pianobetonu jest rodzaj zastosowanego środka spieniającego, ponieważ w dużej mierze decyduje on o stabilności piany i świeżego pianobetonu. Obecnie powszechnie stosowane środki spieniające to surfaktanty syntetyczne, roślinne i pochodzenia zwierzęcego (krwiopochodne). Środki syntetyczne składają się zwy-

kle z surfaktantów i stabilizatorów, natomiast surfaktanty organiczne zawierają głównie substancje białkowe, które są ekstrahowane odpowiednio z saponiny triterpenoidowej i gumy z krwi zwierzęcej [7].

Badania właściwości pianobetonów o gęstości 600 – 1200 kg/m³, na bazie proteinowego oraz syntetycznego środka pianotwórczego, wykazały wyraźną poprawę właściwości mechanicznych pianobetonu zawierającego środek proteinowy [8]. Obserwacje te są zbieżne z wynikami badań [5] pianobetonów o gęstości 400 – 800 kg/m³, w których wzrost zawartości proteinowego środka pianotwórczego z 3 do 5% spowodował zwiększenie wytrzymałości na ściskanie o ok. 60%. Należy jednak podkreślić, że istnieją badania wskazujące na zależność odwrotną [9]. Na podstawie [10] wartości współczynnika przewodzenia ciepła pianobetonu o gęstości w stanie suchym

¹⁾ Politechnika Śląska; Wydział Budownictwa

²⁾ Institute of Construction and Building Materials; Technical University of Darmstadt, Germany

³⁾ Laboratorio de Flujiometría (FLOW); Facultad Regional Santa Fe (FRSF); Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Argentina

⁴⁾ Wilhelm Roser Sohne GMBH CO. KG (RIB); Germany

^{*} Adres do korespondencji: jacek.golaszewski@polsl.pl

600 – 1600 kg/m³ wynoszą najczęściej 0,1 – 0,7 Wm⁻¹K⁻¹, co stanowi 5 – 30% wartości uzyskiwanych w przypadku betonów zwykłych. Pianobetony o mniejszej gęstości mają zazwyczaj mniejszy współczynnik przewodzenia ciepła ze względu na większą objętość pustek powietrznych w strukturze. W badaniach przewodności cieplnej [11] pianobetonu o gęstości 160,42 kg/m³ na bazie proteinowego środka pianotwórczego uzyskano współczynnik przewodzenia ciepła 0,0505 Wm⁻¹K⁻¹, natomiast pianobetonu o gęstości 191,55 kg/m³, jego wartość wynosiła 0,0568 Wm⁻¹K⁻¹. Wpływ na wartość współczynnika przewodzenia ciepła może mieć rodzaj środka pianotwórczego, na co wskazują wyniki badań przedstawione w [4].

Publikowane wyniki badań pianobetonu prezentowane są zwykle w odniesieniu do jego gęstości, jako istotnego czynnika determinującego wspomniane właściwości termiczno-mechaniczne. Zwykle przedmiotem badań jest pianobeton o gęstości 400 – 1600 kg/m³ [4], w tym pianobeton o bardzo małej gęstości ok. 400 kg/m³ [5 – 6]. Warto zaznaczyć, że pianobetony o gęstości mniejszej niż 400 kg/m³ są dosyć rzadko przedmiotem badań.

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu zastosowanego środka spieniającego na wytrzymałość na ściskanie oraz współczynnik przewodzenia ciepła pianobetonów o gęstości 200, 300 i 380 kg/m³. Celem badań było porównanie wpływu syntetycznego i proteinowego środka spieniającego na właściwości pianobetonu.

Przygotowanie pianobetonu

W zaczynie cementowym zastosowano cement portlandzki CEM I 52,5 R oraz metakaolin. Stosunek wody do spoiwa w zaczynie przyjęto jako 0,4 [12]. W celu uzyskania wymaganej konsystencji, do zaczynu dodano superplastyfikator, natomiast do uzyskania odpowiedniej jednorodności i stabilności mieszanki – stabilizator. Ponadto, zastosowanie domieszki przyspieszającej wiązanie spowodowało zwiększenie szybkości utworzenia porowatej struktury oraz poprawę stabilności pustek powietrznych. Skład zaczynu cementowe-

go przedstawiono w tabeli. Pianę o gęstości 70 kg/m³ wytworzono przy użyciu generatora piany firmy Gertec, stosując dwa środki spieniające: syntetyczny i proteinowy, dozowane w trakcie wytwarzania piany, w stanie płynnym, w ilości 2% w stosunku do objętości wody użytej do sporządzenia piany, co daje proporcję środka pianotwórczego do cementu na poziomie 1 – 2 kg/100 kg. Dodając pianę do porcji zaczynu w ilości 89, 85 i 81% objętości pianobetonu, otrzymano pianobetony o gęstości odpowiednio 200, 300 i 380 kg/m³.

Skład zaczynu cementowego (objętościowy)
Cement paste composition (by volume)

Składnik	Zawartość [% obj.]
Cement CEM I 52,5 R	34,27
Metakaolin	11,42
Superplastyfikator	0,58
Stabilizator	2,73
Domieszka przyspieszająca	2,00
Woda	49,00

Metody badań

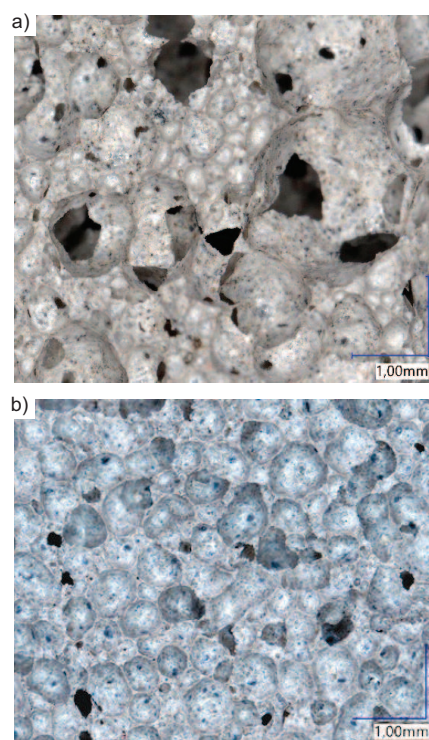
Wytrzymałość na ściskanie badano na próbkach sześciennych 100 x 100 x 100 mm zgodnie z PN-EN 12390-3:2019-07. Poza próbkami formowanymi w typowych formach, część próbek była wycinana z większych prostopadłościaków (300 x 300 x 100 mm) w celu ograniczenia rozrzutu gęstości badanych serii pianobetonu. Wszystkie próbki były przechowywane w formach przez 24 h, a następnie, po rozformowaniu, w temperaturze 20°C i wilgotności względnej 60%. Probki nie były poddawane dodatkowej obróbce termicznej. Zbadano po 6 próbek pianobetonu w przypadku każdej gęstości po 28 dniach dojrzewania, z których 3 próbki były wycięte z większego prostopadłościaka, a 3 próbki były próbkami z form 100 x 100 x 100 mm. Nie było różnicy pomiędzy wynikami badań tych dwóch grup próbek.

Pomiar współczynnika przewodzenia ciepła wykonano aparatem Isomet 2114 [13], metodą niestacjonarną, polegającą na analizie odpowiedzi temperatury badanego materiału na impulsy przepływu ciepła. W przeprowadzonych badaniach zastosowano sondę powierzchniową o zakresie pomiarowym 0,04 – 0,3 Wm⁻¹K⁻¹. Wykonano badania sześciu próbek sze-

ściennych 100 x 100 x 100 mm. W przypadku każdej z nich przeprowadzono 9 pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła.

Wyniki badań

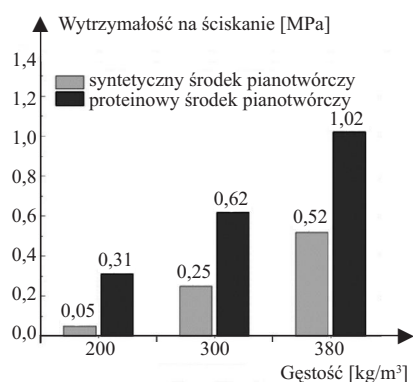
Obrazy mikroskopowe pianobetonu o gęstości 300 kg/m³, wyprodukowanego z użyciem syntetycznego i proteinowego środka pianotwórczego, przedstawiono na fotografii. Pianobeton na bazie proteinowego środka spieniającego charakteryzuje się bardziej jednolitą strukturą i mniejszą liczbą porów o większych wymiarach w porównaniu z pianobetonem, w którym zastosowano syntetyczny środek spieniający.



Porównanie struktury pianobetonu na bazie środka spieniającego: a) syntetycznego; b) proteinowego

Comparison of the structure of the foam concrete based on: a) synthetic; b) protein foaming agent

Struktura pianobetonu ma istotny wpływ na jego właściwości mechaniczne i termiczne [5, 14], co potwierdziły przeprowadzone badania. Wyniki przedstawione na rysunku 1 charakteryzowały się małym odchyleniem standardowym: w przypadku pianobetonów o gęstości 200, 300 i 380 ze środkiem syntetycznym wynosiły odpowiednio 1,5, 2 i 2,94%, natomiast ze środkiem proteinowym – odpowiednio 2,42, 2,49

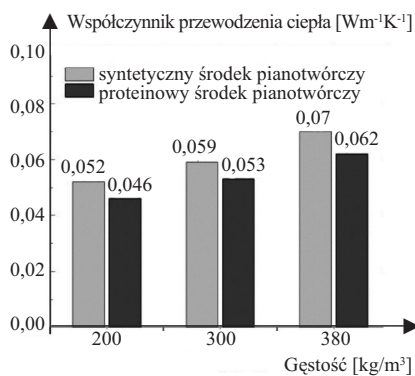


Rys. 1. Wytrzymałość na ściskanie pianobetonu

Fig. 1. Compressive strength of the foam concrete

i 2,45%. Wyniki wskazują na znacznie większą wytrzymałość na ściskanie pianobetonu z proteinowym środkiem spieniającym, co jest zgodne z wynikami badań [2, 5]. Wyraźnie wyższą wytrzymałość, w porównaniu ze środkiem syntetycznym, uzyskano w przypadku małej gęstości pianobetonu, np. pianobeton z proteinowym środkiem pianotwórczym o gęstości 200 kg/m³ ma wytrzymałość na ściskanie o ok. 520% większą, natomiast o gęstości 380 kg/m³ o ok. 96% większą w porównaniu z pianobetonem z syntetycznym środkiem spieniającym. Wyniki te są zgodne z wynikami innych badań [2, 6, 18], np. w przedstawionych w [6] zastosowanie proteinowego środka spieniającego spowodowało zwiększenie wytrzymałości na ściskanie pianobetonu o gęstości 400 kg/m³ o ok. 1070% w porównaniu z pianobetonem na bazie syntetycznego środka spieniającego.

Wyniki badania przewodzenia ciepła przedstawione na rysunku 2 także cha-



Rys. 2. Współczynnik przewodzenia ciepła pianobetonu

Fig. 2. Thermal conductivity coefficient of the foam concrete

rakteryzowały się małym odchyleniem standardowym: w przypadku pianobetonów o gęstości 200, 300 i 380 ze środkiem syntetycznym wynosiły odpowiednio 0,22, 0,16 i 0,12%, natomiast ze środkiem proteinowym – odpowiednio 0,08, 0,14 i 0,03%. Wyniki wskazują na znacznie lepsze właściwości termiczne pianobetonu wykonanego na bazie proteinowego środka spieniającego, np. w przypadku pianobetonu o gęstości 200 kg/m³ z proteinowym środkiem spieniającym uzyskano przewodność cieplną na poziomie 0,046 Wm⁻¹K⁻¹, a z syntetycznym 0,052 Wm⁻¹K⁻¹, co jest spójne z przytoczonymi badaniami [11], w których współczynnik przewodzenia ciepła pianobetonu o gęstości 191,55 kg/m³ wynosił 0,0568 Wm⁻¹K⁻¹. Współczynnik przewodzenia ciepła pianobetonu z proteinowym środkiem pianotwórczym jest o ok. 13% mniejszy niż pianobetonu ze środkiem syntetycznym.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badania właściwości ultralekkiego pianobetonu, mających istotny wpływ na jego zastosowanie jako materiału termoizolacyjnego. Otrzymane wyniki potwierdziły, że nie tylko gęstość pianobetonu określa jego właściwości termiczno-mechaniczne, ale również struktura, która w istotny sposób zależy od zastosowanego środka pianotwórczego. Przeprowadzone badania wykazały, że pianobeton z proteinowym środkiem spieniającym charakteryzuje się bardzo małymi, regularnymi pustkami, które tworzą jednolitą strukturę materiału. W rezultacie, pianobeton o gęstości 200 kg/m³ z proteinowym środkiem spieniającym uzyskał o ok. 520% większą wytrzymałość na ściskanie oraz o ok. 13% mniejszy współczynnik przewodzenia ciepła w porównaniu z pianobetonem na bazie syntetycznego środka spieniającego, czyli charakteryzuje się korzystniejszymi właściwościami pod kątem jego zastosowania jako materiału izolacyjnego.

Literatura

- [1] Brady KC, Watts GRA, Jones MR. PROJECT REPORT PR/IS/40/01 Specification for foamed concrete. United Kingdom; 2001.
- [2] Fu Y, Wang X, Wang L, Li Y. Foam Concrete: A State-of-the-Art and State-of-the-Practice

Review. Adv. Mater. Sci. Eng. 2020; <https://doi.org/10.1155/2020/6153602>.

[3] Ghorbani S, Ghorbani S, Tao Z, de Brito J, Tavakkolizadeh M. Effect of magnetized water on foam stability and compressive strength of foam concrete. Constr. Build. Mater. 2019; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.16>.

[4] Vinith Kumar N, Arunkumar C, Srinivasa Senthil S. Experimental Study on Mechanical and Thermal Behavior of Foamed Concrete. Materials Today: Proceedings. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.302>.

[5] Falliano D, Restuccia L, Gugliandolo E. A simple optimized foam generator and a study on peculiar aspects concerning foams and foamed concrete. Constr. Build. Mater. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121101>.

[6] Narayanan N, Ramamurthy K. Structure and properties of aerated concrete: a review. Cem. Concr. Compos. 2000; [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00016-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00016-0).

[7] Sun C, Zhu Y, Guo J, Zhang Y, Sun G. Effects of foaming agent type on the workability, drying shrinkage, frost resistance and pore distribution of foamed concrete. Constr. Build. Mater. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.019>.

[8] Hashim M, Tantray M. Comparative study on the performance of protein and synthetic-based foaming agents used in foamed concrete, Case Studies in Construction Materials. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00524>.

[9] Hamada RF, Hameed AM. Effect the addition of foam agent on some properties of cement mortar. In: AIP Conf. Proc. AIP Publishing LLC AIP Publishing. 2020; <https://doi.org/10.1063/5.0000261>.

[10] Jones M, McCarthy A. Behaviour and Assessment of Foamed Concrete for Construction Applications. In: Dhir R., Newlands M., McCarthy A. editors. Use of Foamed Concrete in Construction. Thomas Telford; 2005. pp. 61–88.

[11] Gilka-Bötzow A, Folino P, Maier A, Koenders EAB, Caggiano A. Triaxial Failure Behavior of Highly Porous Cementitious Foams Used as Heat Insulation. Processes. 2021; <https://doi.org/10.3390/pr9081373>.

[12] Raj A, Sathyan D, Mini KM. Physical and functional characteristics of foam concrete: A review. Constr. Build. Mater. 2019; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.052>.

[13] Applied Precision Ltd. ISOMET 2114 Thermal properties analyzer User's Guide, Bratislava, SLOVAKIA, 2011; https://www.appliedp.com/download/manual/isomet2114_ug_en.pdf.

[14] Falliano D, De Domenico D, Ricciardi G, Gugliandolo E. Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density. Constr. Build. Mater. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.241>.

Przedstawione w artykule wyniki są częścią badań prowadzonych w ramach projektu europejskiego EU Horyzont 2020, nr GA 870114, pt. Integrated Porous Cementitious Nanocomposites In Non-Residential Building Envelopes For Green Active/Passive Energy Storage (NRG-STORAGE).

Przyjęto do druku: 19.05.2022 r.