

Perspektywy zastosowania betonu hydraulicznego w budownictwie pozaziemskim ze względu na konsystencję mieszanki

Prospects for the use of hydraulic concrete in extraterrestrial construction due to the consistency of the mixture

dr inż. Magdalena Mrozek (ORCID: 0000-0002-2215-5703), dr inż. Dawid Mrozek (ORCID: 0000-0003-3412-3132), Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska

DOI: 10.5604/01.3001.0053.9368

Streszczenie: Jednym z istotnych problemów przy projektowaniu bazy pozaziemskiej jest dobór odpowiedniego materiału konstrukcyjnego. Autorzy niniejszego artykułu przygotowują się do serii badań materiałów, których podstawą byłby symulant regolitu. Są one jednak kosztowne i wymagają dobrego przygotowania. Pierwszym etapem jest przeprowadzenie badań materiału znanego i łatwo dostępnego, jakim jest beton, w warunkach obniżonego ciśnienia. Artykuł prezentuje wyniki testów odpowiadających na pytanie, w jaki sposób konsystencja mieszanki betonowej dojrzewającej w próżni wpływa na parametry stwardniałego betonu, takie jak gęstość oraz wytrzymałość na ścislenie.

Słowa kluczowe: budownictwo pozaziemskie, beton, próżnia, badania wytrzymałości.

Abstract: One of the significant problems in the design of an extraterrestrial habitat is the selection of a suitable structural material. The authors of this paper are preparing for a series of material tests based on a regolith simulant. However, these are expensive and require good preparation. The first step is to test a material that is known and readily available, such as concrete, under reduced pressure. This article presents the results of experiments answering the question: how does the consistency of a concrete mixture matured in a vacuum affect the parameters of the hardened concrete, such as density and compressive strength.

Keywords: extraterrestrial construction, concrete, vacuum, strength tests.

1. Wprowadzenie

Pomysł budowy ludzkich siedlisk na Księżycu lub Marsie wydaje się być wzięty wprost z literatury fantastycznonaukowej. Tymczasem w 50. rocznicę pierwszego lądowania człowieka na Księżycu NASA oraz ESA ogłosiły plany wznowienia misji eksploracyjnych oraz zapoczątkowanie stałej obecności człowieka w habitatach ulokowanych na Księżycu do roku 2040. Badania oraz projekty przyszłych baz księżycowych już trwają. Analizowanych jest wiele koncepcji, przede wszystkim skupiających się na możliwości stworzenia warunków przyjaznych do życia wewnątrz takiego obiektu. Niemniej ważnym problemem jest dobór materiału konstrukcyjnego. Powinien on zapewnić odpowiednią ochronę przed uderzeniami mikrometeoroidów czy nieprzyjaznego promieniowania. Przy tym kluczową kwestią pozostaje warunek ekonomiczny, aby zasadne było wykonanie go z dala od Ziemi (na miejscu).

2. Krótki przegląd literaturowy

Już w latach 80. ubiegłego wieku Lin [1] rozważał zastosowanie betonu jako materiału konstrukcyjnego bazy ulokowanej na Księżycu. Beton jest jednym z najbardziej rozpowszechnionych materiałów konstrukcyjnych. Jego niewątpliwie zalety, takie jak łatwość przetwarzania, kształtowania i wytwarzania oraz stosowanie go jako materiału w konstrukcjach specjalnych, takich jak elektrownie jądrowe wskazują, że wybór betonu jako materiału, z którego zbudowane byłyby siedliska na Księżycu lub Marsie, jest słuszny. Dodatkowo badania składu chemicznego regolitu występującego na Księżycu i Marsie wykazały, że można z niego uzyskać spoiwo, czyli zamiennik cementu oraz kruszywo i otrzymać beton bez transportu części składników z Ziemi. Tematyka „kosmicznego” betonu jest szeroko opisywana m.in. w pracach [2-8]. W literaturze dostępne są badania różnego rodzaju betonów ze względu na warunki pozaziemskie. Badano m.in. zwykły beton hydrauliczny, który był poddany

działaniu próżni, dopiero po stwardnieniu [9, 10] zauważono, że próżnia znacząco nie wpłynęła na spadek gęstości i wytrzymałości. Sprawdzano również czy mieszanka betonowa może dojrzewać w próżni, [13] niestety uzyskano negatywne wyniki, ale zauważono, że dojrzewanie próbki betonowej przez 24 godziny w ciśnieniu atmosferycznym, a dopiero potem umieszczenie jej w próżni spowodowało, że beton zachował ok. 90% swojej wytrzymałości na ściskanie. Poza zwykłym betonem hydraulicznym badano również próbki betonowe, które stworzone były z symulantów ziemi księżycowej [14, 15]. Okazało się, że próbki zawierające symulant regolitu osiągały lepsze parametry niż zwykły beton. Musimy mieć jednak na uwadze to, że symulant nie jest regolitem pochodzącym z Księżyca czy Marsa. Jest jedynie odpowiednikiem stworzonym z ziemskich składników na podstawie znanego składu chemicznego próbek księżycowych przywiezionych z misji Apollo oraz pobranych przez łaziki na Marsie, przez co do takich wyników należy podchodzić z dystansem.

Rozpoczynając własne prace nad badaniem betonu dojrzewającego w obniżonym ciśnieniu, autorzy niniejszego artykułu, wraz z grupą studentów w ramach studenckiego koła naukowego „Budownictwo Pozaziemskie”, zdecydowali się na najprostsze eksperymenty, podobne do tych, których wyniki można odnaleźć w literaturze. Rezultaty tych badań [16, 17], nie odbiegały zasadniczo od już wcześniej prezentowanych. W trakcie tych początkowych eksperymentów pojawiło się pytanie, co się stanie, gdy zamiast standardowego składu mieszanki betonowej użyje się mniej lub więcej wody, która jest składnikiem znacząco wpływającym na parametry stwardniałego betonu, takie jak gęstość oraz wytrzymałość na ściskanie. Ze względu na to, że nie odnaleziono odpowiedzi w literaturze, przygotowano kolejne serie badań – próbek o różnej konsystencji mieszanki.

3. Przygotowanie próbek i przebieg badania

Próbki zostały przygotowane z gotowych paczkowanych betonowych mieszanek posadzkowych. Próbki początkowo przygotowano przy użyciu zalecanej przez producenta ilości wody: 1,8 l na 25 kg suchej mieszanki. Wykonano również wariantowe próbki o rzadszej i gęstszej konsystencji. W sumie powstało 21 próbek, po 3 dla każdej konsystencji. Konsystencje zbadano na stoliku rozplýwowym przeznaczonym dla zapraw. Poszczególne typy próbek oznaczono kolejnymi numerami od K1 do K7 kierując się zasadą od najgęstszej do najrzadszej konsystencji: K1 – konsystencja sypka, K2 – rozplýw o średnicy 10,5 cm, K3 – rozplýw 18 cm – zalecana przez producenta ilość wody, K4 – rozplýw 18,5 cm, K5 – rozplýw 20 cm, K6 – rozplýw 21,5 cm, K7 – rozplýw 24 cm. Mieszanki zostały ułożone w cylindrycznych formach o wysokości 200 mm i średnicy 100 mm. Próbki betonowe o różnej konsystencji, ułożone w formach przedstawia rysunek 1. Po dwie próbki z każdej konsystencji dojrzewały w komorach próżniowych, a pozostałe, po wstępnej dekompresji, zostały



Rys. 1. Próbki o różnych konsystencjach (od K1 – skrajnie na lewo po K7 – skrajnie na prawo)

przeznaczone do dojrzewania w warunkach ciśnienia atmosferycznego. Zabieg ten miał na celu wyrównanie stanu początkowego we wszystkich analizowanych próbkach. Fizycznie nie jest możliwe uzyskanie pełnej próżni, natomiast wewnątrz komór zdołano obniżyć ciśnienie do ok. 7 hPa, co jest wartością zbliżoną do ciśnienia panującego na Marsie. W dalszej części artykułu autorzy posługują się określeniem „próżnia” (głównie na rysunkach), co ma na celu wprowadzenie skrótowego do pojęcia „obniżonego ciśnienia”.

Dekompresja komory próżniowej powoduje wznios (pęcznienie) mieszanki betonowej, związane jest to z szybkim tempem odgazowania wilgoci i pęcherzyków powietrza. W przypadku próbek o najgęstszych konsystencjach nie zaobserwowano zjawiska pęcznienia. Z kolei w najrzadszych mieszankach (rys. 2) dochodziło do gwałtownego wrzenia wody, co powodowało, poza wcześniej zauważonym pęcznieniem, również wyrzuty mieszanki poza formę.



Rys. 2. Efekt dekompresji na próbkach o najrzadszych konsystencjach K5-K7

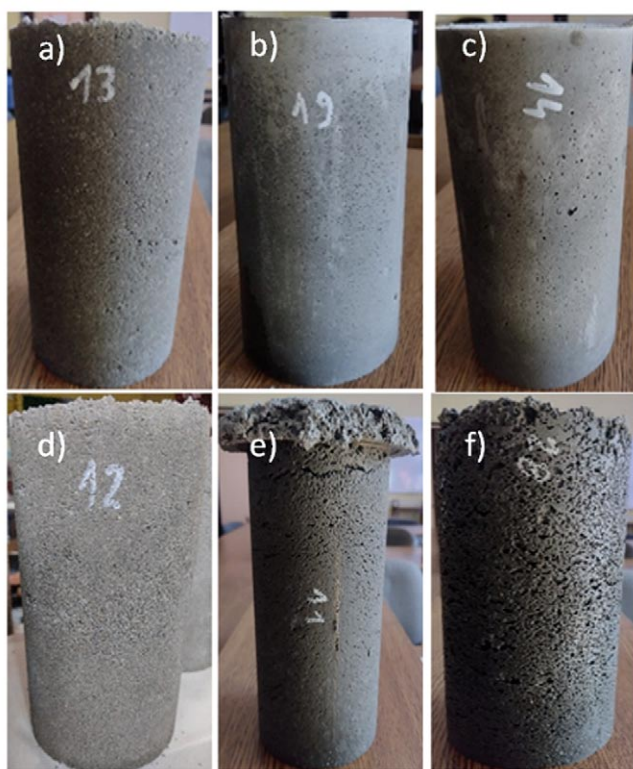
4. Wyniki przeprowadzonych badań

Badania próbek betonowych dojrzewających w obniżonym ciśnieniu zrealizowane zostały na ograniczonej liczbie, która wynikała z ilości miejsca w komorach próżniowych. Należy także pamiętać, że celem tych badań jest zrozumienie wpływu dekompresji na mieszankę betonową i odpowiednie zarządzanie przebiegiem badań. Nie wyklucza to jednak

możliwości przeprowadzenia analizy mającej na celu określenie wpływu dojrzewania mieszanki betonowej w obniżonym ciśnieniu na parametry stwardniałego betonu po 28 dniach po zarobieniu.

4.1. Wygląd zewnętrzny

Po rozformowaniu zaobserwowano duże różnice w wyglądzie poszczególnych próbek. Wybrane próbki, na górnych zdjęciach (a–c) widoczne są produkty mieszanek betonowych dojrzewających na zewnątrz, w ciśnieniu atmosferycznym przedstawia rysunek 3. Te próbki nie różnią się znacząco od siebie, na zdjęciu a) widać próbkę o konsystencji K1 (najgęstsza), natomiast zdjęcie c) przedstawia konsystencję najrzadszą – K7 i właśnie te dwie próbki najbardziej się różniły ze wszystkich dojrzewających na zewnątrz, przy czym łatwiej było to wyczuć dotykem niż wzrokiem, gdyż pierwsza próbka była bardziej chropowata, a ta ostatnia miała bardzo gładką strukturę. Dużo większe różnice widoczne były dla próbek dojrzewających w komorach próżniowych. Próbki o konsystencji najgęstszej (zdjęcie d, rysunek 3) miały najmniej porów, do tego nie pęczniały podczas dekompresji. Próbki o pośredniej konsystencji (zdjęcie e) miały więcej porów, w efekcie czego wytworzyła się na wierzchu struktura w kształcie „grzyba”. Najrzadsza konsystencja (zdjęcie f) spowodowała, że stwardniały beton posiadał najwięcej porów, natomiast podczas dekompresji wrzenie wody wyrzuciło poza formę część mieszczanki. W tym przypadku nie

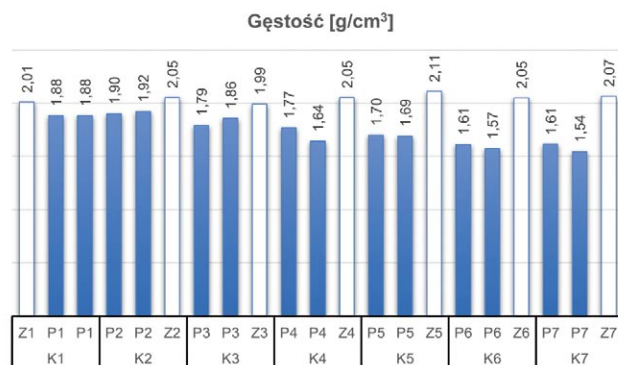


Rys. 3. Próbki po rozformowaniu o konsystencji i lokalizacji: a) K1 na zewnątrz, b) K5 na zewnątrz, c) K7 na zewnątrz, d) K1 w próżni, e) K5 w próżni, f) K7 w próżni

powstał charakterystyczny „grzyb”, jak to miało miejsce przy pośrednich konsystencjach. Jeżeli porównamy próbki o tej samej konsystencji dojrzewające w komorach i na zewnątrz, można zauważyć, że próbki K1 nie różnią się w wyglądzie zewnętrznym. Największą różnicę widać w próbkach K7 – o ile próbki dojrzewające w warunkach ciśnienia atmosferycznego mają gładką powierzchnię z niewielkimi porami, odpowiadające im próbki dojrzewające w obniżonym ciśnieniu mają mocno widoczne, gęsto rozmieszczone pory.

4.2. Gęstość objętościowa

Po rozformowaniu nierówności zostały ścięte, próbki zostały wyrównane, zmierzone oraz zważone, a następnie na tej podstawie obliczono ich gęstość objętościową. Wykres słupkowy zawierający wartości gęstości wyrażone w $[g/cm^3]$ wszystkich badanych próbek przedstawia rysunek 4. Słupki bez wypełnienia prezentują wartości gęstości próbek dojrzewających na zewnątrz, pomimo lekkich wahań można stwierdzić, że gęstość w tych przypadkach była stała i średnio wynosiła $2,05 g/cm^3$. Natomiast próbki, które dojrzewały w próżni, wykazały się niższą wartością gęstości przy wzroście współczynnika w/c. Największy spadek wartości gęstości tych próbek wyniósł 20%. Dwie najrzadsze konsystencje, o pełnym rozplywie, doznawały najbardziej gwałtownego wrzenia i mocnego powiększania się porów, a co za tym idzie zmniejszenia gęstości objętościowej.

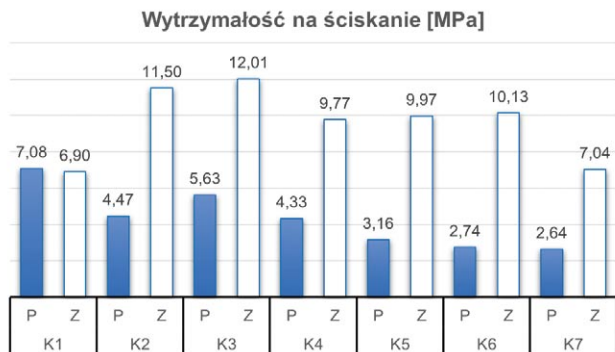


Rys. 4. Gęstość próbek betonowych obliczona po rozformowaniu, w g/cm^3

4.3. Wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach

Wcześniej przygotowane próbki umieszczono w maszynie wytrzymałościowej. Przyrost siły ściskającej wynosił 5 kN/s. Wyniki badań w postaci wykresu słupkowego wytrzymałości na ściskanie poszczególnych próbek prezentuje rysunek 5. Słupki bez wypełnienia odpowiadają wynikom próbek dojrzewających w ciśnieniu atmosferycznym (zewnętrznym). Najwyższą wytrzymałość na ściskanie osiągnęły próbki z zalecaną przez producenta ilością wody. Próbka o najgęstszej konsystencji mieszanki betonowej, praktycznie sypkiej, osiągnęła wytrzymałość o 42% niższą w porównaniu do maksymalnej wartości próbki dojrzewającej na zewnątrz. Była to (K1) jednocześnie najniższa wartość próbek dojrzewających

na zewnątrz. Zastosowanie konsystencji mieszank betonowych K4, K5 i K6, skutkowało uzyskaniem podobnych wartości wytrzymałości, która była o ok. 17% mniejsza od wartości maksymalnej. Ostatnia próbka o największej wartości w/c, charakteryzowała się podobnie niską wartością wytrzymałości na ściskanie jak K1.



Rys. 5. Wytrzymałość na ściskanie w MPa próbek o różnych konsystencjach mieszanki

Wyniki badań wytrzymałościowych próbek dojrzewających w obniżonym ciśnieniu widoczne są w postaci słupków o zaciemnionym polu. W celu zwiększenia przejrzystości wyników rezultaty z próbek każdej konsystencji zostały arytmetycznie uśrednione. W przeciwieństwie do próbek dojrzewających na zewnątrz, w tym przypadku najmocniejsze okazały się próbki o najgęstszej konsystencji mieszanki betonowej, ich średnia wytrzymałość na ściskanie przewyższyła nawet odpowiadającą im próbkę dojrzewającą na zewnątrz, jednak wciąż jej wartość była znacznie mniejsza od tej maksymalnej (K3 na zewnątrz). Oznacza to, że w przypadku zbyt małej ilości wody w mieszance betonowej, nie ma znaczenia, czy dojrzewa ona w obniżonym ciśnieniu. W przypadku próbek, w których ilość wody dostosowana była do zaleceń producenta, to tak jak we wcześniejszych badaniach autorów [11, 12], dojrzewanie w komorze spowodowało uzyskanie wartości wytrzymałości na ściskanie o ok. połowę mniejszą niż przy dojrzewaniu w ciśnieniu atmosferycznym. Kolejne próbki, o wyższej wartości w/c, osiągały coraz mniejsze wartości wytrzymałości na ściskanie. Jednocześnie różnica pomiędzy wytrzymałościami z próbek dojrzewających na zewnątrz i w komorach próżniowych powiększała się.

5. Podsumowanie

Ilość wody w mieszance betonowej dojrzewającej w obniżonym ciśnieniu ma ogromne znaczenie. Przeprowadzone badania wykazały, że im mniej wody tym wyższe wartości wytrzymałości na ściskanie. Niestety ograniczenia wody w betonie hydraulicznym łączy się z gorszym wiązaniem mieszanki, a co za tym idzie brakiem uzyskania oczekiwanych parametrów wytrzymałościowych. W perspektywie budownictwa pozaziemskiego beton hydrauliczny można byłoby stosować jedynie w przypadku możliwości

przygotowania mieszanki i dojrzewania jej w zamkniętych szczelnych pomieszczeniach, w których zapewniono by ciśnienie jak najbardziej zbliżone do tego panującego na Ziemi. Taka sytuacja jest możliwa przy zastosowaniu kopuł monolitycznych, których technologia w pierwszej kolejności wymaga nadmuchania powłoki (deskowanie tracone), a całą konstrukcję wykonuje się od wewnątrz. Jeżeli chcielibyśmy uzyskać bardziej uniwersalny materiał, który można stosować również w warunkach obniżonego ciśnienia, to należałoby unikać stosowania zwiększonej ilości wody. Kolejnym wyzwaniem jest taki dobór składników przyszłego „betonu kosmicznego”, by z jak najmniejszą ilością wody (lub jej zamiennika) uzyskać jak największą wytrzymałość oraz szczelność samej konstrukcji.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Lin T., Concrete for lunar base construction, Concrete international Design & construction 1987, str. 48–53
- [2] Naser M. Z., Extraterrestrial construction materials, Progress in Materials Science, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100577>
- [3] Khatib A., Anwar W., Mehmood I., i in., Lunar concrete: Prospects and challenges. Astronomy Reports. 60, 2016, str. 306–312, doi:10.1134/S1063772916020050
- [4] Boles W., Kirby K., Baird S., Concrete for lunar and Mars soils in situ resource utilization, SP 2002 Robot 2002, str. 143–147
- [5] Koh S.W., Yoo J., Bernold L. E., Lee T. S., Experimental study of waterless concrete for lunar construction, Earth and Space (12th) 2010:7, doi:10.1061/41096(366)102
- [6] Ishikawa N., Kanamori H., Okada T., The possibility of concrete production on the Moon, Lunar Bases SP Act 21st Century, 1992, str. 489
- [7] Zarzycki P. K., Kutzer J., A proposition for a lunar aggregate and its simulant. Advances in Space Research 65, 2020 2894–2901, doi:10.1016/j.asr.2020.03.032
- [8] McKay D. S., Allen C. C., Concrete – A Practical Construction Material for Mars, Engineering, Construction, and Operations in Space V, 1996, str. 566–570
- [9] Cullingford H. S., Keller M. D., Lunar concrete for construction, The Second Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century, 1992, str. 497–499
- [10] Kanamori H., Matsumoto S., Ishikawa N., Long-term properties of mortar exposed to a vacuum, ACI Special Publication 125, 1991, str. 57–69
- [11] Powers-Couche L., Lin T., Behavior of fresh mortar in a vacuum and microstructure of mortar harden. Engineering, Construction, and Operations in Space V, doi:10.1061/40177(207)84
- [12] Swint D., Schmidt S., Swint D., Schmidt S., Optimizing lunar concrete ACI Special Publication 125, 1991, str. 41–56
- [13] Namba H., Ishikawa N., Kanamori H., Concrete production method for construction of lunar bases. Engineering, Construction, and Operations in Space 1988, str. 169–177
- [14] Horiguchi T., Saeki N., Yoneda T., Hoshi T., Lin T. D., Behavior of simulated lunar cement mortar in vacuum environment, Space 98, 1998, str. 571–576, doi:10.1061/40339(206)65
- [15] Seitl S., Rozsypalová I., Pokorná K., Keršner Z., Kutzer J., Zarzycki P. K., Mechanical fracture properties of concrete with lunar aggregate simulant, MATEC Web of Conferences, 323, 2020, str. 1014, doi:10.1051/mateconf/202032301014
- [16] Mrozek M., Kula J., Błażon B., Co się dzieje z mieszanką betonową w próżni? II Studencka Konferencja Kosmiczna, publikacje konferencyjne/Cholewiński Maciej [i in.] (red.), 2022, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, str. 45–46, <https://www.dbc.wroc.pl/dlibra/publication/156913/edition/118545/content>
- [17] Mrozek D., Gryczyńska Z., Matłoz M., Jak próżnia wpływa na wytrzymałość stwardniałego betonu? II Studencka Konferencja Kosmiczna, publikacje konferencyjne/Cholewiński Maciej [i in.] (red.), 2022, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, str. 43–44, <https://www.dbc.wroc.pl/dlibra/publication/156913/edition/118545/content>