

dr inż. Marcin Kaczmarzyk^{1*)}

ORCID: 0000-0001-5605-5279

dr Agata Kołodziejczyk²⁾

ORCID: 0000-0002-7030-3555

Julia Baścik²⁾

inż. Monika Wojtowicz¹⁾

inż. Alicja Wójcik¹⁾

inż. Damian Ziobro¹⁾

inż. Justyna Sudoł¹⁾

inż. Sebastian Rusnak¹⁾

inż. Michał Sowiński¹⁾

Preliminary feasibility analysis of microwave sintering of lunar regolith simulant at glass softening temperature

Wstępna analiza możliwości mikrofalowego spiekania symulantu księżycowego regolitu w temperaturze mięknięcia szkła

DOI: 10.15199/33.2025.06.14

Abstract: This paper presents the course of an experiment aimed at verifying the possibility of consolidating a lunar regolith simulant by microwave sintering at the softening temperature of glass. A properly prepared mixture of glass and pumice placed in steel molds inside a hot pot microwave crucible was used as the simulant. The obtained specimens were subjected to macroscopic visual inspection both before and after compressive strength testing. Satisfactory results were obtained, confirming the formulated thesis. At the same time, the need to refine the sintering process in order to obtain samples with the desired reproducible parameters was pointed out.

Keywords: lunar regolith; microwave sintering; glass softening; compressive strength.

Streszczenie: W artykule przedstawiono przebieg eksperymentu, którego celem była weryfikacja możliwości konsolidowania symulantu księżycowego regolitu przez mikrofalowe spiekanie w temperaturze mięknięcia szkła. Jako symulant wykorzystano odpowiednio przygotowaną mieszkankę szkła i pumeksu umieszczoną w stalowych formach wewnątrz tygla mikrofalowego typu Hot Pot. Uzyskane próbki poddano makroskopowym oględzinom zarówno przed, jak i po przeprowadzeniu badania wytrzymałości na ściskanie. Uzyskano satysfakcjonujące rezultaty potwierdzające sformułowaną tezę. Wskazano jednocześnie na konieczność dopracowania procesu spiekania w celu uzyskiwania próbek o żądanych, powtarzalnych parametrach.

Słowa kluczowe: księżycowy regolit; spiekanie mikrofalowe; mięknięcie szkła; wytrzymałość na ściskanie

The second and third decades of the 21st century have seen increased exploration of the Moon and intensive development of space transportation means. The goal of the national space programs of both the United States and the People's Republic of China is manned exploration of the Moon and the establishment of long-term human habitation on the surface of the Silver Globe [1]. The special conditions on the lunar surface, such as the absence of an atmosphere, extreme temperature and direct exposure to primary cosmic rays, make it necessary to provide a correspondingly high level of thermal and radiation protection of the interiors of future lunar habitats [2÷4]. On the other hand, the extremely high cost of space transportation will dictate the maximum use of local resources when carrying out any structural and construction work on the lunar surface [5].

Regolith as a building material

Virtually the entire surface of the Silver Globe is covered by at least several meters thick layer of highly fragmented rocks,

¹⁾ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury,

²⁾ Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Technologii Kosmicznych

^{*)} Correspondence address: kaczmar@prz.edu.pl

Druga i trzecia dekada XXI wieku, to okres wzmoczonych badań Księżyca oraz intensywnego rozwoju środków transportu kosmicznego. Celem narodowych programów kosmicznych, zarówno Stanów Zjednoczonych, jak i Chińskiej Republiki Ludowej, jest załogowa eksploracja Księżyca oraz ustanowienie długoterminowego pobytu człowieka na powierzchni Srebrnego Globu [1]. Szczególne warunki panujące na powierzchni Księżyca, takie jak brak atmosfery, ekstremalna temperatura oraz bezpośrednia ekspozycja na pierwotne promieniowanie kosmiczne, stanowią o konieczności zapewnienia odpowiednio wysokiego poziomu ochrony cieplnej oraz radiologicznej we wnętrzach przyszłej księżycowej infrastruktury mieszkalnej [2÷4]. Z drugiej strony, ekstremalnie wysokie koszty transportu kosmicznego będą narzucały maksymalne wykorzystanie miejscowych zasobów podczas prowadzenia wszelkich prac konstrukcyjno-budowlanych na powierzchni Księżyca [5].

Regolit jako materiał budowlany

Praktycznie całą powierzchnię Srebrnego Globu pokrywa co najmniej kilkumetrowej grubości warstwa silnie rozdrobnionych skał, zwana regolitem. Pomimo względnie dużej gęstości objętościowej, księżycowy regolit cechuje się niezwykle małą przewodnością cieplną [2, 5, 6]. Najczęściej postulowanym rozwią-

called regolith. Despite its relatively high volumetric density, lunar regolith has extremely low thermal conductivity [2, 5÷6]. The most commonly postulated solution to the problem of thermal and radiation protection in future lunar buildings is to form an appropriate thickness of regolith shielding around the building. Part of the concept is to use unconsolidated regolith as back-fill material for pneumatic, pressurized sections of future lunar bases [7÷11]. An alternative solution is to consolidate the regolith to make different types of building components [4, 10–14].

One of the most promising methods for bonding regolith involves melting or welding it using microwave radiation. For the vast majority of such studies, the presence of metallic, nano-phase iron (nano-Fe) in lunar regolith [10, 13, 15] that absorbs microwaves is crucial. Due to the limited availability of samples provided from the Moon, material studies of this type use substitutes for lunar regolith, called analogs or simulants [16, 17].

Purpose and scope of the study

Previously published articles have not addressed the possibility of sintering regolith at the relatively low temperature of 600–800°C, at which the minerals contained in the regolith are not yet sintered (1100–1200°C), but rather the significant softening of the glass occurs, which accounts for 40–70% of the regolith volume [13, 17]. The purpose of the research presented in this article was to see if it is practical to consolidate lunar regolith simulant by microwave method. The scope of the study included an attempt to consolidate the regolith simulant using the microwave method, performing macroscopic visual inspection of the samples obtained, subjecting them to compressive strength testing, and performing a visual re-examination after destruction.

Research method

Due to the preliminary nature of the planned experiment, the author's mixture of appropriately crushed volcanic pumice and pulverized soda-lime glass, in a volume ratio of 1:1, was used as a lunar regolith simulant. Using a granite mortar, ball mill and sieve shaker, a material with a grain size not exceeding 250 µm and a granulometric distribution similar to lunar regolith was obtained. A microwave oven with a microwave power of 1000 W was used as a source of microwave radiation at 2.4 GHz. The material was placed in openable steel cylindrical molds. The specimens were covered from the top with steel plates, which stabilized their top surfaces while the sintered material reduced its volume. The components described are shown in Photo 1, where letter symbols denote, respectively: cut pieces of ceramic paper (A); steel mold (B); clamp (C); and steel lid (D).

An important component of the test stand was a ceramic crucible, known as a Hot Pot, designed for creating fine art crafts from glass. Thanks to the use of an inner layer that absorbs microwaves,

zaniem problemu ochrony cieplnej i radiologicznej w przyszłych budynkach księżycowych jest uformowanie odpowiedniej grubości regolitu osłony wokół budynku. Część koncepcji zakłada wykorzystanie nieskonsolidowanego regolitu jako materiału zasypowego w przypadku pneumatycznych, ciśnieniowych sekcji przyszłych baz księżycowych [7÷11]. Alternatywne rozwiązanie, to spajanie regolitu w celu uzyskania różnego typu komponentów budowlanych [4, 10÷14].

Jedną z najbardziej obiecujących metod spajania regolitu zakłada jego topienie lub zgrzewanie z wykorzystaniem promieniowania mikrofalowego. W przypadku znacznej większości takich badań kluczowa jest obecność metalicznego, nanofazowego żelaza (nano-Fe), w księżycowym regolicie [10, 13, 15] absorbującego mikrofałę. Ze względu na ograniczoną dostępność próbek dostarczonych z Księżyca, w badaniach materiałowych tego typu wykorzystuje się zamienniki księżycowego regolitu, zwane analogami lub symulantami [16, 17].

Cel i zakres badań

W dotychczas publikowanych artykułach nie odnoszono się do możliwości spiekania regolitu we względnie niskiej temperaturze 600–800°C, przy której nie dochodzi jeszcze do spiekania minerałów zawartych w regolicie (1100–1200°C), lecz do znacznego zmięknienia szkliwa, stanowiącego 40–70% objętości regolitu [13, 17]. Celem badań przedstawionych w artykule było sprawdzenie, czy istnieje praktyczna możliwość konsolidacji symulantu księżycowego regolitu metodą mikrofalową. Zakres badań obejmował próbę konsolidacji symulantu regolitu metodą mikrofalową, dokonanie makroskopowych oględzin otrzymanych próbek, poddanie ich badaniu wytrzymałości na ściskanie oraz dokonanie ponownych oględzin po zniszczeniu.

Metoda badań

Ze względu na wstępny charakter planowanego eksperymentu, jako symulant księżycowego regolitu zastosowano autorską mieszaninę odpowiednio rozdrobnionego pumeksu wulkanicznego oraz sproszkowanego szkła sodowo-wapniowego, w proporcjach objętościowych 1:1.

Wykorzystując młódkę granitową, młyn kulowy oraz wstrząsarkę sitową uzyskano materiał o wymiarze ziaren nieprzekraczającym 250 µm i rozkładzie granulometrycznym zbliżonym do księżycowego regolitu. Jako źródło promieniowania mikrofalowego o częstotliwości 2,4 GHz zastosowano kuchenkę mikrofalową o mocy mikrofał wynoszącej 1000 W. Materiał umieszczano w otwieranych, stalowych cylindrycznych formach. Próbkę przykrywano od góry stalowymi płytkami, które stabilizowały ich górne powierzchnie, podczas gdy spiekany materiał zmniejszał swoją objętość. Opisane elementy przedstawiono na fotografii 1, na której symbole litrowe oznaczają odpowiednio: wycięte



Photo 1. Microwave sintering mold components (description in article)

Fot. 1. Komponenty formy do spiekania mikrofalowego (opis w tekście)

the interior of the Hot Pot heats up to a high temperature. At the same time, the porous material of the container provides very good thermal insulation, which prevents damage to the microwave oven. Both the base of the Hot Pot and the interior of the steel mold were lined with 0.5 mm thick ceramic paper.

The thermal treatment lasted about 30 min. The temperature was controlled indicatively by visually observing the incandescence of the steel molds. Heating was stopped when all the steel parts reached a uniform bright red color, visually corresponding to approximately 800–850°C. A view of the interior of the heated Hot Pot is shown in Photo 2.

The described research began in September 2024, during the simulated Colony-1 lunar mission, at the Analog Astronaut Training Center (AATC) habitat located in Rzepiennik Suchy near Tarnów. The research continued until April 2025 as part of the activities of the “da Vinci” Scientific Circle functioning at the Department of Building Engineering (DBE) of Rzeszów University of Technology. The research initially used the laboratory infrastructure of the AATC, and at a later stage the equipment of the DBE Building Materials Laboratory. Much of the aforementioned period was taken up with refining the test stand and the sintering process itself. As a result of the experiments so far, three samples were produced and became the subject of compressive strength testing. Fourteen days after the specimens were made, a destructive test was conducted using a dedicated COMETECH TESTING MACHINES QC-05B1 hydraulic press (Photo 3). The rate of load increment was set to the minimum value, i.e. 50 N/s.



Photo 2. Heated molds inside a Hot Pot

Fot. 2. Rozgrzane formy we wnętrzu Hot Pota

Test results

Visual inspection before destruction. After the samples cooled to room temperature, they were removed from the molds for visual inspection. The use of ceramic paper ensured that the samples did not stick to the base of the Hot Pot or to the mold walls, and the extraction of the samples went smoothly. All the samples were a uniform dark beige color, and their surfaces were smooth and slightly dull. Using calipers, four different measurements were taken each of the height of the samples and the diameter of both their bases. The samples were weighed and their volume determined by immersing them in a menzotube of water. The accuracy of the length, weight and volume measurements were, respectively: 0.1 mm, 0.1 g and 0.5 cm³. The maximum uncertainty in the determination of area and volumetric density was calculated by the method of the complete differential. The results of these measurements are summarized in Table 1 and Table 2.

As can be seen from Table 1, samples B and C showed noticeable relative height differences along their perimeters. In

kawałki papieru ceramicznego (A); stalową formę (B); zacisk (C) oraz stalową pokrywkę (D).

Istotnym elementem stanowiska badawczego był ceramiczny tygiel, tzw. Hot Pot, przeznaczony do tworzenia drobnego rękodzieła artystycznego ze szkła. Dzięki zastosowaniu wewnętrznej warstwy absorbującej mikrofałę, wewnątrz Hot Pota nagrzewa się do wysokiej temperatury. Jednocześnie porowaty materiał, z którego wykonany jest pojemnik, zapewnia bardzo dobrą izolacyjność termiczną, co zapobiega uszkodzeniom kuchenki mikrofalowej. Zarówno podstawę Hot Pota, jak i wewnątrz stalowej formy wykładano papierem ceramicznym o grubości 0,5 mm.

Obróbka termiczna trwała ok. 30 min. Temperaturę kontrolowano orientacyjnie przez wzrokową obserwację inkandescencji stalowych form. Ogrzewania zaprzestawano wówczas, gdy wszystkie stalowe elementy osiągały jednolity, jasnoczerwony kolor, wizualnie odpowiadający w przybliżeniu temperaturze 800–850°C. Widok na wewnątrz rozgrzanego Hot Pota przedstawiono na fotografii 2.

Opisane badania rozpoczęto we wrześniu 2024 r., podczas symulowanej misji księżycowej Colony-1, w habitacie Analog Astronaut Training Center (AATC) zlokalizowanym w Rzepienniku Suchym k. Tarnowa. Badania kontynuowano do kwietnia 2025 r. w ramach działalności Koła Naukowego „da Vinci” funkcjonującego przy Katedrze Budownictwa Ogólnego (KBO) Politechniki Rzeszowskiej. W badaniach początkowo wykorzystywano infrastrukturę laboratoryjną AATC, a na dalszym etapie wyposażenie Laboratorium Materiałów Budowlanych KBO. Znaczną część wymienionego okresu



Photo 3. One of the samples placed in the hydraulic press

Fot. 3. Jedna z próbek umieszczona w prasie hydraulicznej

zajęło dopracowanie stanowiska badawczego i samego przebiegu procesu spiekania. Jako efekt dotychczasowych doświadczeń wytworzono trzy próbki, które stały się przedmiotem badania wytrzymałości na ściskanie. Po czternastu dniach od wykonania próbek przeprowadzono badanie niszczące przy użyciu dedykowanej prasy hydraulicznej COMETECH TESTING MACHINES QC-05B1 (fotografia 3). Tempo przyrostu obciążenia ustawiono na minimalną wartość, tj. 50 N/s.

Wyniki badań

Oględziny przed zniszczeniem. Po ostygnięciu próbek do temperatury pokojowej wyjęto je z form w celu dokonania oględzin. Zastosowanie papieru ceramicznego sprawiło, że próbki nie przywarły do podstawy Hot Pota ani do ścianek formy i wydobywanie próbek przebiegło bezproblemowo. Wszystkie próbki miały jednolity, ciemnobezowy kolor, a ich powierzchnie były gładkie i lekko matowe. Za pomocą suw-

Table 1. Geometry of the samples

Tabela 1. Geometria próbek

Sample/ Oznaczenie próbki	Mean height/ Średnia wysokość [mm]	Max. Height difference/ Maksymalna różnica wysokości [mm]	Mean diameter of a bottom base/ Średnia średnica dolnej podstawy [mm]	Mean diameter of an upper base/ Średnia średnica górnej podstawy [mm]
A	26,5	0,4	26,5	26,3
B	24,9	3,3	28,2	25,0
C	26,1	1,7	25,3	23,9

Table 2. Bulk density of the samples

Tabela 2. Gęstość objętościowa próbek

Sample/ Oznaczenie próbki	Mass/ Masa [g]	Volume/ Objętość [cm ³]	Bulk density/ Gęstość objętościowa [g/cm ³]	Maximum error of bulk density/ Maksymalny błąd gęstości objętościowej [g/cm ³]
A	28,4	14	2,0	0,3
B	29,9	15	2,0	0,3
C	31,9	14	2,3	0,3

addition, the upper surfaces of all three samples were slightly concave (in the form of menisci). The reason for this phenomenon is the high viscosity of the softened glass, which tends to stick slightly even to ceramic paper in this state, and as it cools, it hardens and retains its shape. This effect was greatly reduced by the use of steel leads, adapted to the shape of the mold. As it can be seen, however, this phenomenon has not been completely eliminated and can still have a noticeable effect on the shape of the top surface of the samples obtained.

The imperfections in the shape of the samples also become apparent when comparing the average length of the diameters of their lower and upper bases. This is particularly evident in the case of sample B, where the difference between the two dimensions was as much as 3.2 mm, giving this sample a slightly conical shape. The irregular shape of some samples was the result of shrinkage experienced by the simulant during sintering, when the softened glass partially filled the inter-grain spaces in the bulk material. This is demonstrated by the results of measurements of the bulk density of the samples given in Table 2. The interior of each mold had a volume of about 21 cm³, and the molds were completely filled with the regolith simulant each time. The data in Table 2 show that the sintered samples decreased in volume by about 30%. In order to obtain samples with reproducible, regular shapes, it is necessary to limit the effects of shrinkage only to changes in the height of the samples.

Destructive testing. Compressive strength testing of samples A and B was carried out without any additional mechanical treatment. It was assumed that the strength of the resulting sinter was relatively low. It was expected that under load the irregularities of the upper surfaces of the specimens would be quickly crushed and, as a result, the load would be distributed uniformly over the entire surface of the specimen. However, this supposition turned out to be wrong. Specimens A and B failed due to the splintering of relatively small fragments, leaving the majority of the specimen visually intact. For this reason, in the case of specimen C,

miarki wykonano po cztery różne pomiary wysokości próbek oraz średnicy obu ich podstaw. Próbki zważono i określono ich objętość przez zanurzenie w menzurce z wodą. Dokładność pomiarów długości, masy i objętości wynosiła odpowiednio: 0,1 mm, 0,1 g i 0,5 cm³. Maksymalną niepewność wyznaczania pól powierzchni i gęstości objętościowej określono metodą różniczki zupełnej. Wyniki tych pomiarów zestawiono w tabeli 1 oraz w tabeli 2.

Jak wynika z tabeli 1, próbki B oraz C wykazały zauważalne względne różnice wysokości wzdłuż swoich obwodów. Dodatkowo, górne powierzchnie wszystkich trzech próbek były lekko wklęsłe (w formie menisków). Przyczyną tego zjawiska jest duża lepkość rozmiękczonego szkła, które ma w tym stanie tendencję do lekkiego przywierania nawet do papieru ceramicznego, a stygnąc, twardnieje i zachowuje swój kształt. Efekt ten udało się

znacznie zredukować dzięki zastosowaniu stalowych przykryć, dopasowanych do kształtu formy. Jak widać, zjawisko to nie zostało jednak całkowicie wyeliminowane i wciąż może wywierać zauważalny wpływ na kształt górnej powierzchni otrzymywanych próbek. Imperfekcje kształtu próbek uwiadamiają się również przy porównaniu średniej długości średnicy ich dolnych i górnych podstaw. Szczególnie widoczne jest to w przypadku próbki B, gdzie różnica obu wymiarów wyniosła aż 3,2 mm, nadając tej próbce lekko stożkowaty kształt. Nieregularny kształt niektórych próbek był wynikiem skurczu doznawanego przez symulant w trakcie spiekania, kiedy zmiękzone szkło częściowo wypełniało przestrzenie międzyziarnowe w sypkim materiale. Dowodzą tego wyniki pomiarów gęstości objętościowej próbek podane w tabeli 2.

Wnętrze każdej z form miało objętość ok. 21 cm³ i formy te były każdorazowo całkowicie wypełniane symulantem regolitu. Z danych przedstawionych w tabeli 2 wynika, że spiekane próbki zmniejszyły swoją objętość o ok. 30%. W celu uzyskania próbek o powtarzalnych, regularnych kształtach należy ograniczyć skutki skurczu jedynie do zmiany wysokości próbek.

Badanie niszczące. Badanie wytrzymałości na ściskanie próbek A oraz B przeprowadzono bez żadnej dodatkowej ich obróbki mechanicznej. Zakładano, że wytrzymałość otrzymanego spieku jest względnie mała. Spodziewano się, że pod obciążeniem szybko zostaną skruszone nieregularności górnych powierzchni próbek i wskutek tego obciążenie rozłoży się równomiernie na całej powierzchni próbki. Przypuszczenia te okazały się jednak błędne. Próbki A i B uległy zniszczeniu wskutek odłupania się względnie niewielkich fragmentów, pozostawiając większość próbki w stanie wizualnie nienaruszonym. Z tego względu, w przypadku próbki C zdecydowano się na zeszlifowanie jej górnej powierzchni, aby zapewnić równomierne obciążenie próbki od samego początku badania. We wszystkich trzech przypadkach dokładność pomiaru obciążenia wynosiła 0,05 kN. Maksymalną niepewność wyznaczania wytrzymałości

it was decided to grind the top surface of the specimen to ensure that the specimen was uniformly loaded from the very beginning of the test. In all three cases, the accuracy of the load measurement was 0.05 kN. The maximum uncertainty in the determination of compressive strength was calculated by the method of the complete differential. The results of the tests carried out are presented in Table 3. They show significant differences in the compressive strength of individual specimens. It seems that the results obtained for specimens A and B should not be considered representative due to the aforementioned lack of surface preparation before the test, which resulted in the uneven distribution of stresses in these specimens. The highest compressive strength was obtained for specimen C, which we believe is mainly due to the correct preparation of its upper surface. The result of 41 MPa obtained for specimen C is close to the average compressive strength obtained in experiments of this type conducted by other authors, i.e. 12–120 MPa [10].

Visual inspection after destruction showed that samples A and C were characterized by a relatively uniform internal structure. The surfaces of the fractures were slightly rough while exhibiting a distinctly glassy sheen. There were occasional small (1–2 mm) inhomogeneities in the form of clusters of vitreous phase on some fragments. Photos 4–6 show fragments of damaged samples A, B, C. Sample B was clearly distinguishable from samples A and C, destroyed by the splintering of a fragment running along its entire height. The exposed interior of sample B showed that much of the vitreous phase had accumulated in the upper part of the sample, while the mineral phase (pumice) dominated in the lower part. It seems that, for unknown reasons, sample B suffered a greater influence of heat, which led to a partial separation of the initially mixed phases.

na ściskanie określono metodą różniczki zupełnej. Wyniki przeprowadzonych badań zaprezentowano w tabeli 3. Pokazują one znaczne różnice wytrzymałości na ściskanie poszczególnych próbek. Wydaje się, że wyników otrzymanych w przypadku próbek A i B nie należy traktować jako reprezentatywnych ze względu na wspomniany brak przygotowania powierzchni przed wykonaniem badania, co wpłynęło na nierównomierny rozkład naprężeń w tych próbkach. Największą wytrzymałość na ściskanie uzyskała próbka C, co naszym zdaniem wynika przede wszystkim z poprawnego przygotowania jej górnej powierzchni. Wynik 41 MPa otrzymany w przypadku próbki C jest bliski średniej wartości wytrzymałości na ściskanie, uzyskanej w eksperymentach tego typu prowadzonych przez innych autorów, tj. 12–120 MPa [10].

Ogłędziny po zniszczeniu wykazały, że próbki A oraz C cechowały się względnie jednolitą strukturą wewnętrzną. Powierzchnie przełamów były lekko chropowate, a jednocześnie odznaczały się wyraźnie szklistym połyskiem. Na niektórych fragmentach sporadycznie występowały niewielkie (1–2 mm) niejednorodności w postaci skupień fazy szklistej. Fotografie 4–6 pokazują fragmenty zniszczonych próbek A, B, C.

Od próbek A i C wyraźnie odróżniała się próbka B, zniszczona wskutek odłupania się fragmentu biegnącego wzdłuż całej jej wysokości. Odsłonięte wnętrze próbki B ukazało, że znaczna część fazy szklistej zgromadziła się w górnej części próbki, podczas gdy faza mineralna (pumeks) dominowała w części dolnej. Wydaje się, że z nieznanых przyczyn próbka B doznała większego wpływu ciepła, co doprowadziło do częściowego rozdzielenia początkowo zmieszanych faz.

Od próbek A i C wyraźnie odróżniała się próbka B, zniszczona wskutek odłupania się fragmentu biegnącego wzdłuż całej jej wysokości. Odsłonięte wnętrze próbki B ukazało, że znaczna część fazy szklistej zgromadziła się w górnej części próbki, podczas gdy faza mineralna (pumeks) dominowała w części dolnej. Wydaje się, że z nieznanых przyczyn próbka B doznała większego wpływu ciepła, co doprowadziło do częściowego rozdzielenia początkowo zmieszanych faz.

Table 3. Destructive test results

Tabela 3. Wyniki badania niszczącego

Sample/ Oznaczenie próbki	Maximum load/ Maksymalne obciążenie [kN]	Compressive strength/ Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Maximum error of compressive strength/ Maksymalny błąd wytrzymałości na ściskanie [MPa]
A	6,109	11,10	0,56
B	1,804	2,88	0,14
C	20,658	41,03	2,05



Photo 4. Fragments of sample A after its destruction
Fot. 4. Fragmenty próbki A po zniszczeniu



Photo 5. Fragments of sample B after its destruction
Fot. 5. Fragmenty próbki B po zniszczeniu



Photo 6. Fragments of sample C after its destruction
Fot. 6. Fragmenty próbki C po zniszczeniu

Conclusions

The conducted experiment showed that microwave sintering of the lunar regolith simulant is possible already at the relatively low softening temperature of the glass. In the environment of the lunar surface, devoid of atmospheric loads and characterized by a gravity six times lower than on the Earth's surface, the material's compressive strength of 40 MPa appears to be a fully satisfactory result for the purposes of lunar construction. Differences in the shape and internal structure of the various samples indicate that the sintering process needs to be refined.

It is planned to continue the research described in the article, with a special focus on determining the effect of varying glass content and the upper limit of the material's grain size on the compressive strength of the obtained sinters. It is also planned to develop a new simulant that will more faithfully reflect the lunar regolith in terms of mineralogical composition.

Received: 03.01.2025
Revised: 26.02.2025
Published: 24.06.2025

Wnioski

Przeprowadzony eksperyment wykazał, że mikrofalowe spiekanie symulantu księżycowego regolitu możliwe jest już przy względnie niskiej temperaturze mięknięcia szkła. W środowisku powierzchni Księżyca, pozbawionym obciążeń atmosferycznych i cechującym się ciążeniem sześciokrotnie mniejszym niż na powierzchni Ziemi, wytrzymałość materiału na ściskanie na poziomie 40 MPa wydaje się być rezultatem w pełni satysfakcjonującym na potrzeby budownictwa księżycowego. Różnice dotyczące kształtu i budowy wewnętrznej poszczególnych próbek wskazują na konieczność dopracowania procesu spiekania.

Planuje się kontynuowanie opisanych w artykule badań, ze szczególnym uwzględnieniem określenia wpływu zmiennej zawartości szklawa oraz górnej granicy wielkości ziaren materiału na wytrzymałość na ściskanie otrzymanych spieków. Przewiduje się też opracowanie nowego symulantu, który będzie wierniej odzwierciedlał księżycowy regolit pod względem składu mineralogicznego.

Artykuł wpłynął do redakcji: 03.01.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 26.02.2025 r.
Opublikowano: 24.06.2025 r.

Literature

- [1] Kaczmarzyk M. *Modelowanie energetyczne mieszkalnych obiektów budowlanych lokalizowanych na powierzchni Księżyca*. Rzeszów: Politechnika Rzeszowska; 2023.
- [2] Vasavada AR, Bandfield JL, Greenhagen BT. *Lunar equatorial surface temperatures and regolith properties from the Diviner Lunar Radiometer Experiment*. J Geophys Res. 2012;117 (12). <https://doi.org/10.1029/2011JE003987>
- [3] Jia Y, Lin ZW. *The Radiation Environment on the Moon from Galactic Cosmic Rays in a Lunar Habitat*. Radiat Res. 2010;173 (2): 238–244. <https://doi.org/10.1667/RR1994.1>
- [4] Jablonski A, Ogden K. *Technical Requirements for Lunar Structures*. J Aerosp Eng. 2008;21 (2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\) 0893-1321 \(2008\)21:2 \(77\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE) 0893-1321 (2008)21:2 (77))
- [5] Science Definition Team for Artemis 2020. *Evaluation of Lunar Regolith Potential as Construction Materials Source for Future Artemis Base Camp*. <https://www.lpi.usra.edu/announcements/artemis/whitepapers/2121.pdf> [dostęp: 24.04.2025].
- [6] Kaczmarzyk M. *Zjawiska impaktowe jako nadrzędny proces kształtujący powierzchnię Księżyca*. Acta Soc Meteorit Pol. 2024;15:56–70.
- [7] Roberts M. *Inflatable habitation for the lunar base*. NASA Conf. Publ. 1988;3166. Washington, DC: NASA.
- [8] Ganapathi GB, Ferrall J, Seshan PK. *Lunar Base Habitat Designs: Characterizing the Environment, and Selecting Habitat Designs for Future Trade-offs*. NASA Contractor's Report CR-195687. <http://spacearchitect.org/pubs/NASA-CR-195687.pdf> [dostęp: 18.04.2025].
- [9] Okumura M, Ueno T, Ohashi Y. *Regolith Covering Method for Habitation Module in an Early Phase of Lunar Base Construction*. [https://doi.org/10.1061/40339 \(206\)71](https://doi.org/10.1061/40339 (206)71)
- [10] Zhang D. et al. *Lunar In Situ Large-Scale Construction: Quantitative Evaluation of Regolith Solidification Techniques*. Engineering. 2024;39:204–221. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.11.012>
- [11] Benaroya H. *Lunar habitats: A brief overview of issues and concepts*. Reach. 2017;7–8:14–33. <https://doi.org/10.1016/j.reach.2017.07.001>
- [12] Allen CC, Graf JC, McKay DS. *Sintering Bricks on the Moon*. In: Proc. 4th Int. Conf. Eng., Constr. and Oper. in Space, Albuquerque, NM, Feb. 26 — Mar. 3, 1994. New York: ASCE; 1994. ss. 1220–1229.
- [13] Taylor LA, Meek TT. *Microwave Sintering of Lunar Soil: Properties, Theory, and Practice*. J Aerosp Eng. 2005;18 (3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\) 0893-1321 \(2005\)18:3 \(188\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE) 0893-1321 (2005)18:3 (188))
- [14] Fateri M. et al. *Solar Sintering For Lunar Additive Manufacturing*. J Aerosp Eng. 2019;32 (6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\) AS.1943-5525.0001093](https://doi.org/10.1061/(ASCE) AS.1943-5525.0001093)
- [15] Kato K, Shirai T. *Multi-step thermal design of microwave vacuum heating to basaltic regolith simulant towards lunar base construction*. Sci Rep. 2024;14:28231. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79504-x>
- [16] Lunar and Planetary Institute. *JSC-1: A New Lunar Soil Simulant*. https://www.lpi.usra.edu/lunar/strategies/jsc_lunar_simulant.pdf? q=jsc [dostęp: 25.04.2025].
- [17] Sen S. *Production of high fidelity lunar agglutinate simulant*. Adv Space Res. 2011;47 (11): 1912–1921. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.02.005>