

УДК 629.78

Экспериментальное определение теплофизических характеристик и микроструктуры спеченного имитатора лунного грунта

Хоменко Виктория Владимировна^(*)

homenkovv@bmstu.ru

Худорожко Михаил Викторович

khudorozhko@bmstu.ru

Буланаева-Климова Наталия Юрьевна

astriditsme@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Изготовлены цилиндрические образцы диаметром 45 мм и высотой 6 мм из имитатора лунного грунта путем спекания лучистым нагревом. Образцы подвергались спеканию при температуре 1600 К на протяжении 15 минут. При это измерялась температура на тыльной поверхности с помощью термопары и велась съемка тепловизором фронтальной поверхности. Выяснено, что основное влияние на динамику спекания оказывают силы поверхностного натяжения. Данные образцы были использованы для определения теплопроводности методом стационарного теплового потока. Установлено, что коэффициент теплопроводности спеченного материала составляет 0,51 Вт/(м·К), что превышает теплопроводность исходной сыпучей фазы на два порядка.

Ключевые слова: теплопроводность, имитатор лунного грунта, космическое строительство, лучистый нагрев

Введение. Освоение Луны и создание на ней долговременной инфраструктуры требует использования местных ресурсов, а именно реголита. Реголит рассматривается в качестве основного сырья для производства строительных материалов. В настоящее время к подобным материалам предъявляются требования не только к достаточной прочности, но и к теплопроводности. Так, в результате прямых измерений прибора ChaSTE миссии Chandrayaan-3 было зафиксировано значение теплопроводности около 0,012 Вт/(м·К) [1] для рыхлого поверхностного слоя, в то время как анализ отдельных частиц реголита с «Аполлона-17» показывает значение на два порядка выше — около 0,74 Вт/(м·К) [2]. В работе [3] авторы из института физики материалов указывают значение 0,55 Вт/(м·К) для реголита, спеченного концентрированным солнечным излучением. Полученные результаты свидетельствуют о том, что высокая пористость является определяющим фактором, снижающим теплопроводность.

Для обеспечения достаточной прочности реголит подвергают спеканию. Наиболее перспективным с энергетической точки зрения представляется метод лучистого нагрева, основанный на использовании концентрированного солнечного излучения. Для имитации условий солнечного нагрева в МГТУ им. Н.Э. Баумана была разработана лабораторная установка [3], способная осуществлять нагрев области диаметром 50 мм до температуры в 1600 К, что является достаточным для образования жидкой фазы в процессе спекания реголита.

Методы и материалы; результаты. В работе использовался имитатор лунного реголита VI-LH1, предоставленный лабораторией геохимии Луны и планет ГЕОХИ РАН [4]. Перед спеканием исходный порошок подвергался ручному уплотнению. Процесс спекания проводился при температуре 1600 К в течение 15 минут в корундовом тигле диаметром 50 мм и высотой 8 мм установленном в теплоизоляцию из композиции Al_2O_3 и SiO_2 [5]. Для контроля температуры на дно тигля была установлена термопара ТХА. Распределение температуры по поверхности образца отслеживалось с помощью тепловизора SATIR D300. В результате был получен образец диаметром 42 мм и высотой 6 мм. Было выявлено, что температура на поверхности и на дне сравнялись через 7 минут после начала нагрева. Оставшееся время происходил процесс растекания жидкой фазы и выход пузырьков воздуха. Уменьшение размеров образца закономерно, поскольку имеющиеся пустоты в порошке заполняются жидкой фазой из оксида кремния. В результате объем уменьшился на 27 %. Однако наибольшее уменьшение размеров произошло перпендикулярно нагреваемой поверхности, в то время как вдоль направления нагрева размеры практически не изменились. Это говорит о доминировании сил поверхностного натяжения в процессе спекания. На это также указывает округлая форма поверхности образцов. Расчетная плотность составила приблизительно $2,10 \text{ г/см}^3$.

Определение коэффициента теплопроводности проводилось на жидкостном криотермостате LOIP FT-211-25. Методика основана на создании стационарного теплового потока через плоскопараллельный образец и измерении установившейся разности температур на его поверхностях. Выбор данного метода обусловлен возможностью достижения высокой точности измерений для материалов с низкой теплопроводностью. Значение теплопроводности составило $0,51 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ при комнатной температуре.

Заключение. Были изготовлены цилиндрические образцы диаметром 45 мм и высотой 6 мм из имитатора лунного грунта путем спекания на установке концентрированного нагрева. Спеченные образцы имеют плотность $2,10 \text{ г/см}^3$ с теплопроводностью $0,51 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, что хорошо согласуется с результатом $0,55 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, полученным для реголита спеченного солнечным излучением в лаборатории института физики материалов из немецкого центра авиации и космонавтики (Кёльн, Германия).

Список источников

- [1] Mathew N. et al. Thermal conductivity of high latitude lunar regolith measured by Chandra's Surface Thermophysical Experiment (ChaSTE) onboard Chandrayaan 3 lander. *Scientific Reports*, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91866-4>
- [2] Cheng F. et al. Thermal Diffusivity, Thermal Conductivity and Thermal Inertia of Individual Lunar Regolith Grains: Case Study of Sample 70161 from Apollo 17. *International Journal of Thermophysics*, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10765-025-03563-z>

-
- [3] Худорожко М.В., Просунцов П.В. Разработка установки концентрированного радиационного нагрева для испытаний образцов высокотемпературных композиционных материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 8 (785), с. 144–154.
 - [4] Mironov D.D., Uvarova A.V., Slyuta E.N. VI-LH1 — Lunar Highlands Simulant for Large Scale Experiments. *The Fourteenth Moscow Solar System Symposium 14M-S3*, 2023, pp. 110–112.
 - [5] Fateri M. et al. Thermal properties of processed lunar regolith simulant. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2019. <https://doi.org/10.1111/ijac.13267>