

УДК 536.24

Технологии обработки лунного реголита для последующего использования

К.В. Кочнев, А.В. Ненарокомов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, 125993, Россия
e-mail: kochnevkirillvl@gmail.com; nenarokomovav@mai.ru

DOI: 10.34759/tpt-2020-12-6-242-251

Поступила в редакцию 13.07.2020

После доработки 16.07.2020

Принята к публикации 16.07.2020

Представлен обзор исследований по достаточно узкоспециализированному вопросу – спеканию лунного реголита. В некоторых перспективных проектах спекание реголита рассматривается как возможный способ изготовления конструкционных материалов, которые могут быть использованы при строительстве лунных баз. Акцент сделан на методике, в которой спекание производилось под действием концентрированного солнечного излучения. Рассмотрено влияние различных параметров на свойства спеченных образцов. Показано, что на характеристики таких образцов влияют размер частиц, гранулометрический состав, плотность упаковки частиц и среда, в которой производится спекание.

Ключевые слова: лунный реголит, спекание, аддитивные технологии, солнечный концентратор, лунная база.

Введение

Для перспективных качественно новых программ исследования Луны потребуются базы долговременного пребывания. Речь идет не только об обитаемых объектах, предназначенных для экспедиций с участием космонавтов. Ввиду жестких условий Луны укрытия могут понадобиться и для защиты техники. Также при увеличении числа запусков потребуются взлетно-посадочные площадки и прочие сооружения.

Лунная почва представляет собой смесь твердых раздробленных анортозитовых (материк) и базальтовых (море) пород, покрытых рыхлым слоем пыли, образованным устойчивой бомбардировкой микрометеоритами и космическим выветриванием. Этот последний слой называется реголит [1, 2].

Идея использования реголита в качестве строительного материала для объектов лунной инфраструктуры привлекательна значительным удешевлением программы исследования и освоения Луны. Применение местных материа-

лов для строительства лунных баз приведет к сокращению расходов на транспортировку конструкций с Земли.

В статье приводится обзор работ по использованию лунного реголита в качестве строительного материала для лунных баз. Особый интерес представляют результаты, полученные в процессе термической обработки реголита с целью получения прочных структур.

В настоящее время существует множество технологий обработки реголита, которые могут быть применены для аддитивного производства конструкционных материалов на Луне. Предыдущие исследования показали, что монолитный материал может быть получен смешиванием лунного грунта со связующим веществом, или химически активным соединением [3–10], или с помощью процесса спекания [11–17], процесса образования твердой массы под действием тепла без достижения точки разжижения.

Процесс спекания может быть реализован различными методами. Исследования по спеканию имитатора лунного грунта проводились с

использованием микроволнового излучения [13], лазера [14, 18], классических резистивных радиальных элементов [2, 15] и концентрированного солнечного света [19–21].

В статье рассматривается технология спекания реголита посредством концентрированного солнечного света. Эта технология, единственная из перечисленных, которая, во-первых, не нуждается в расходных материалах, привозимых на Луну с Земли, а во-вторых, в отличие от других технологий спекания использует солнечную энергию напрямую, без преобразований. Прямое использование солнечной энергии повышает КПД установки и упрощает ее конструкцию.

Симуляторы лунного грунта

Одной из проблем, возникающих при разработке технологии и аппаратных средств для трехмерной печати реголитом, является крайне малое его количество, привезенное на Землю. Всего за все полеты, совершенные по программе «Аполлон», на Землю было привезено менее 400 кг лунного грунта. Количество реголита, привезенное по программе «Луна», вообще измеряется сотнями граммов. Понятно, что столь дефицитное вещество не может быть использовано для указанных целей в необходимых объемах. Поэтому были разработаны специальные симуляторы лунного грунта, созданные из земных компонентов. В настоящее время наиболее распространенным является симулятор JSC-1A, созданный НАСА из материалов, добытых в разработанных вулканических отложениях в Аризоне [2]. Симулятор JSC-1A имитирует образцы морского реголита с низким содержанием титана, собранные в ходе полета «Аполлон-14».

JSC-1A недавно был заменен новой партией, названной JSC-2A, из синтетических минералов. Идентичные составы JSC-1A и JSC-2A приведены в табл. 1.

С симулятором JSC-1A проводились эксперименты по спеканию/сплавлению с использованием микроволн [13], концентрированной солнечной энергии [4], лазера [14] и классическими элементами резистивного радиального нагрева [15].

Таблица 1. Состав симулятора лунного грунта

Оксид	Массовое содержание в JSC-1A/JSC-2A, %	Массовое содержание в лунном грунте с «Аполлон-14», %
SiO ₂	46.67	47.3
TiO ₂	1.71	1.6
Al ₂ O ₃	15.79	17.8
Fe ₂ O ₃	3.41	–
FeO	7.57	10.5
MgO	9.39	9.6
CaO	9.90	11.4
Na ₂ O	2.83	0.7
K ₂ O	0.78	0.6
MnO	0.19	0.1
P ₂ O ₅	0.66	–

Эксперименты по спеканию реголита

Авторы статьи [21] провели эксперимент по спеканию имитатора лунного реголита JSC-1A в солнечной печи.

Целью исследования было приближение условий спекания к лунным, поэтому спекание происходило на рыхлом реголите без дополнительного уплотнения.

В первых тестах по спеканию использовался солнечный свет. Для этого использовалась высокопоточная солнечная печь DLR-Köln. Солнечная печь состоит из плоского зеркала площадью 52 м², гелиостата, отслеживающего солнце и отражающего свет на концентратор, состоящий из 147 зеркальных граней, фокусирующих свет внутри лаборатории. Принципиальная схема установки приведена на рис. 1.

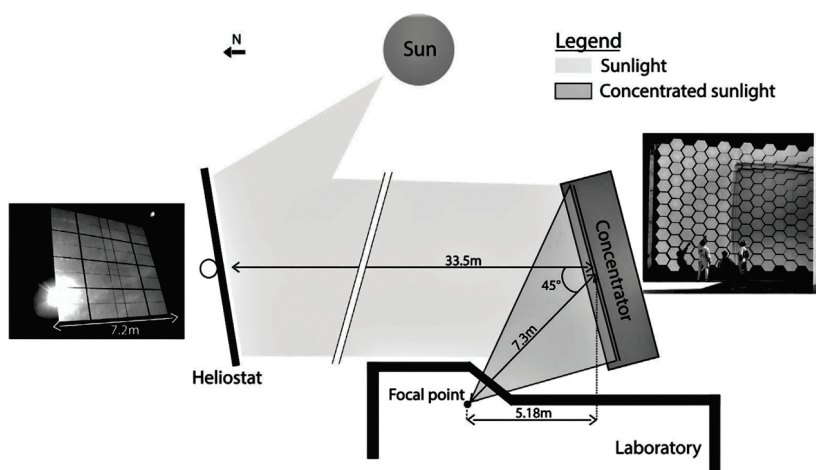


Рис. 1. Принципиальная схема солнечной печи [21]

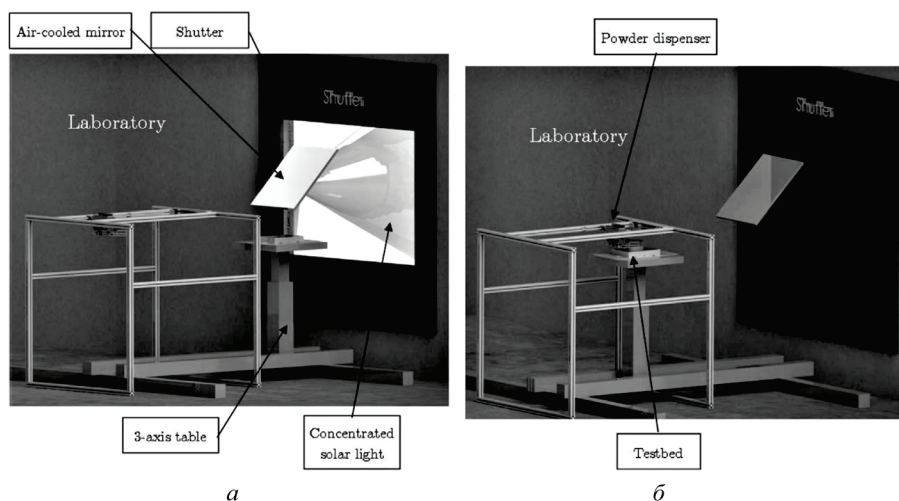


Рис. 2. Принципиальная схема печатного стола: *a* – во время процесса спекания; *b* – во время нанесения нового слоя симулятора реголита [21]

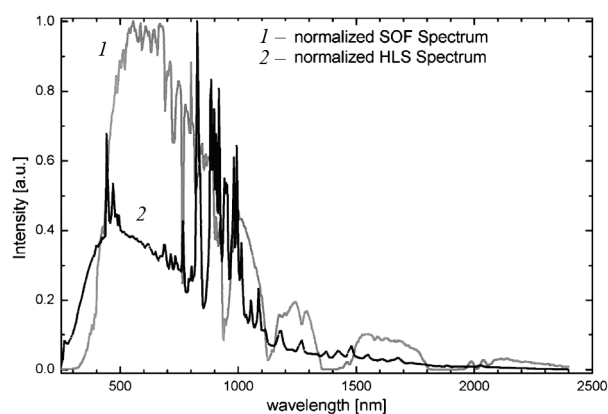


Рис. 3. Спектр солнечного света (SOF) и спектр ксенонового света (HLS), измеренные в Солнечном научно-исследовательском институте DLR, Köln [21]

Пиргелиометр измеряет прямое нормальное излучение (DNI) – важную часть данных для оценки солнечной энергии, которая может быть сконцентрирована перед началом эксперимента. В солнечный день при DNI более 800 Вт/м^2 общая собираемая мощность может достигать 20 кВт при пиковой плотности потока 4 МВт/м^2 .

Само спекание происходило в тиглях, установленных на специальном столе, имеющем подвижность в трех направлениях. После спекания слоя из диспенсера насыпался новый слой имитатора реголита и процесс продолжался. Схема установки приведена на рис. 2.

Авторы эксперимента старались достичь сплошной спеченной поверхности, достаточно плоской для того, чтобы поверх нее можно было

спекать следующий слой. Параметры корректировались на месте по результатам визуального наблюдения за спекаемой поверхностью. Спеченные участки были толщиной 1 мм , хрупкие, но при этом не изменившие плоскостность.

Переменчивость освещения из-за облачности, а также рассеивание света в верхних слоях атмосферы не позволили провести достаточно воспроизводимые эксперименты. Спекание слоя происходило неравномерно, и результат оказывался недостаточно удовлетворительным.

Имитаторы солнечного излучения

В дальнейших экспериментах в качестве источника света были использованы ксеноновые дуговые газоразрядные лампы. Ксеноновые дуговые газоразрядные лампы традиционно используются для испытаний в помещениях фотоэлектрических преобразователей. Они позволяют моделировать постоянную плотность потока излучения, благодаря чему становится возможным проведение длительных экспериментов с заданными управляемыми параметрами. Сравнение спектров солнечного света и света ксеноновых ламп приведено на рис. 3.

Имитатор солнца состоит из десяти эллиптических отражателей с ксеноновыми лампами с короткой дугой (рис. 4, *a*), которые обеспечивают мощность 21 кВт при плотности потока 4.3 МВт/м^2 . Лампы откалиброваны вручную для получения острого луча с наименьшей достижимой фокусной точкой. Как следствие, только две ксеноновые лампы можно было использовать, чтобы сохранить зеркало от расплавления и разрушения в местах, где свет был сфокусирован. Эти две ксеноновые лампы обеспечивали мощность 4.1 кВт и плотность потока 1.2 МВт/м^2 , сфокусированные на пятне диаметром 20 мм . На рис. 4, *b* показано гауссово распределение концентрированного света с плотностью потока, почти достигающей 1.2 МВт/м^2 на пике.

Параметры спекания подбирались опытным путем. В качестве источника излучения были использованы две ксеноновые лампы. Толщина напыляемого слоя при скорости сканирования 48 мм/с была равна ~ 0.1 мм с некоторыми изменениями из-за ограниченной точности дозатора и широкого распределения по размеру зерен симулятора лунного реголита. Расстояние между линиями сканирования было 14 мм. В эксперименте использовался симулятор лунного реголита JSC-2A. На рис. 5 представлен спеченный образец, на создание которого было затрачено 3 ч 45 мин.

Как видно из рис. 5, при длительных процессах спекания массивных деталей в них появляются тепловые напряжения, приводящие к изгибным деформациям. Тепловые напряжения возникают из-за неравномерности остывания образца: границы спеченной детали омываются воздухом и активно теряют тепло за счет конвекции, в то время как центр детали остается нагретым ввиду плохой теплопроводности материала.

С целью уменьшения тепловых напряжений были испытаны различные стратегии сканирования. Наиболее удачной оказалась стратегия, в которой сначала спекался контур, а затем происходило заполнение слоя. При переходе на следующий слой направление сканирования при заполнении поворачивалось на 90°. Изменение направления сканирования при заполнении гомогенизировало спекание детали, а дополнительное тепло, выделяемое на контуре, уравнивало более быстрое охлаждение по краям.

Также были проведены эксперименты по спеканию реголита на пористой керамической

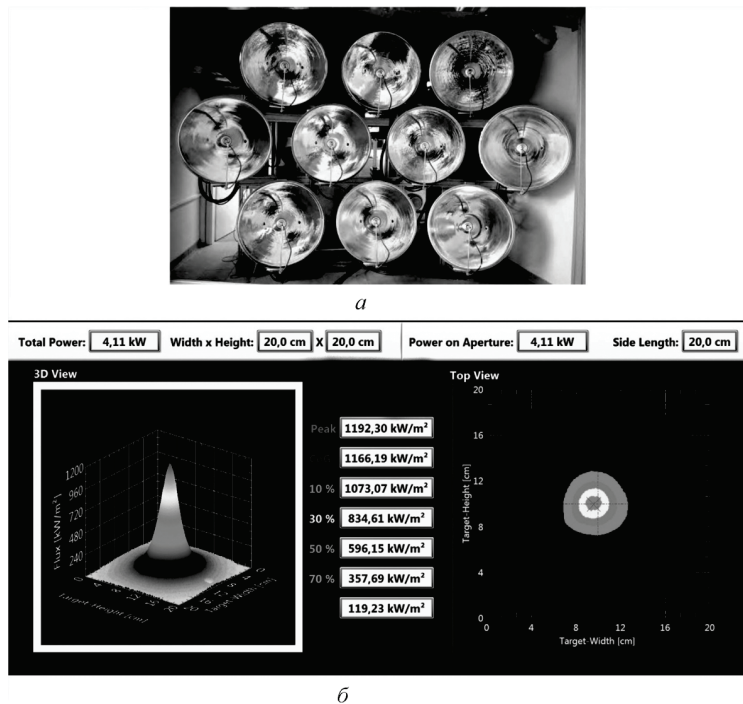


Рис. 4. Симулятор солнца из ксеноновых ламп в DLR Köln (а) и плотность потока двух калиброванных ксеноновых ламп (б), использованных в работе [21]

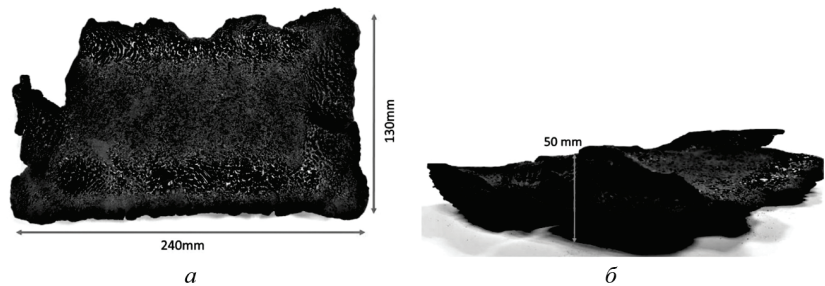


Рис. 5. Образец, спеченный из симулятора JSC-2A, вид сверху (а) и сбоку (б) [21]

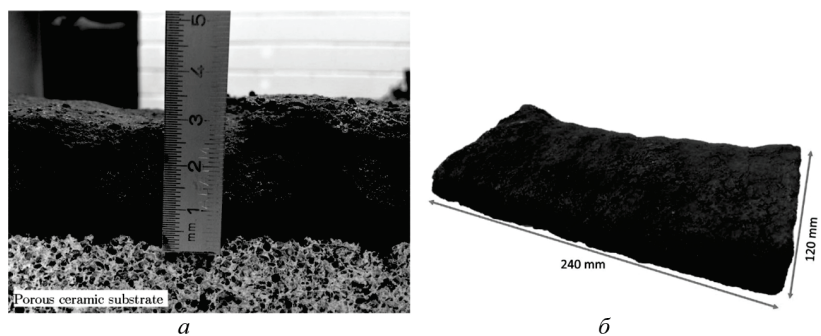


Рис. 6. Образец из JSC-2A, спеченный на пористой керамической подложке (а). Образец после удаления подложки (б) [21]

подложке, с которой первые слои реголита образуют прочную связь. При использовании пористой керамической подложки и оптимальной стратегии сканирования деформация образца может быть сведена к минимуму.

Анализ полученных образцов

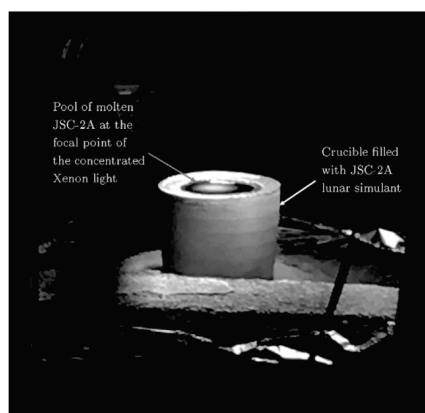
Чтобы оценить прочность полученного материала, отпечатанные образцы были разрезаны на кубики размером 20×20×20 мм. Поверхности кубиков, на которые воздействовала испытательная машина, были покрыты бетоном для сглаживания неровностей поверхности и равномерности распределения нагрузки (рис. 7). Бетон имеет более высокую прочность, чем полученные образцы, и поэтому не вносит искажений в результаты измерений. Результаты измерений приведены в табл. 2.



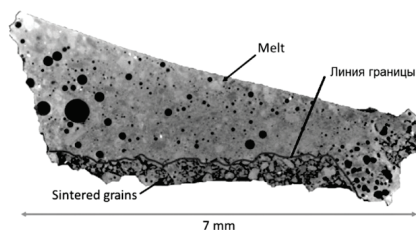
Рис. 7. Образец, подготовленный к тесту на сжатие [21]

Таблица 2. Результаты тестов на сжатие. Среднее из 12 образцов

Образец	Прочность на сжатие, МПа	Модуль Юнга, ГПа
Реголит, отпечатанный на солнечном 3D принтере	2.31±0.30	0.14±0.06



a



б

Рис. 8. Тигель с симулятором JSC-2A, нагреваемый концентрированным светом ксеноновых ламп (*a*). Томография куска этого расплава (*б*). Линией показана граница раздела между затвердевшим расплавом и спеченными зернами под ним [21]

Также был проведен неразрушающий структурный анализ образцов. В поперечном сечении образца видна слоистая структура материала (см. рис. 7). Несмотря на то, что порошок наносился слоями толщиной 0.1 мм, видимые слои имеют толщину в диапазоне от 0.20 до 0.60 мм. В составе образца наблюдаются открытые поры размером до 0.60 мм и закрытые поры размером до 0.45 мм. Наличие больших закрытых пор свидетельствует о высокой объемной доле расплава в спеченном материале: ожидается, что закрытые поры будут образовываться из-за значительного выделения газов из минералов при температуре плавления. Открытые поры большего размера свидетельствуют о плохой связи между слоями.

По результатам проведенных тестов было выдвинуто предположение, что плохая связь расплава с окружающими зернами препятствует соединению последовательно накладываемых слоев. Для проверки этого предположения был проведен дополнительный эксперимент. В ходе эксперимента круглый тигель был заполнен имитатором лунного реголита JSC-2A и в течение 5 мин подвергся нагреву светом двух ксеноновых ламп для обеспечения достаточного объема ванны расплава (рис. 8, *a*). После выключения ламп и остывания полученного образца он был проанализирован с помощью компьютерной томографии. На полученном снимке видно, что на границе ванны расплава снизу сплавленный материал плохо связан с некоторыми спеченными зернами под ним (рис. 8, *б*). Расплав не проник в промежутки между подстилающими зернами, как это было бы, например, с кварцевым песком.

В указанной исследовательской работе были найдены пути улучшения межслойного соединения. Для одного и того же набора параметров (интенсивности света, скорости сканирования, интервала сканирования и толщины накладываемых слоев) меньшие спеченные детали оказались более прочными, чем более крупные детали. Кажущаяся более высокая прочность детали была связана с более коротким временем охлаждения между осаждением двух после-

довательных слоев, что привело к более высоким и более равномерным температурам на осажденных поверхностях и, следовательно, к лучшим связям между слоями и меньшим тепловым напряжениям. Более высокая температура предыдущего слоя при нанесении следующего приводит к лучшей связи между слоями благодаря более высокой межслойной диффузии. Также уменьшение размеров детали привело к уменьшению градиента температур между центром детали и ее границами.

Томография меньшего образца показала структуру, аналогичную структуре большего образца. Поскольку параметры спекания не были изменены, можно сделать вывод, что для получения более прочного образца необходимо более прочное межслойное соединение. Плотность крупных и мелких образцов оказалась в одном диапазоне и варьировалась от 1.5 до 1.7 г/см³.

Совершенствование методики обработки лунного грунта

В работе [21] приведены результаты спекания несжатого симулятора реголита JSC-1A в атмосфере. Интересно оценить влияние этих особенностей на получаемые образцы.

Для того чтобы получить адекватные результаты, необходимо максимально приблизить условия проведения эксперимента к лунным условиям. Как было сказано ранее, имитатор лунного реголита JSC-1A создан на основе образцов реголита, привезенных астронавтами «Аполлон-14». Эти образцы представляют собой морской реголит с низким содержанием титана. Маловероятно, что лунная база будет построена в том же месте, где астронавты брали пробы, поэтому необходимо рассмотреть различные составы реголита, включая материковый реголит и морские симуляторы с более высоким содержанием ильменита, который является основным источником титана на Луне.

Известно, что на традиционное порошковое спекание влияют многие параметры: форма и размер частиц, гранулометрический состав смеси, среда спекания и химический состав материала. Поэтому при моделировании спекания лунного реголита нельзя останавливаться только на внешних параметрах, таких как подводимая мощность излучения, скорость сканирования, толщина слоя и др.

Спекание – это уплотнение и склеивание частиц при температуре ниже их температуры плавления. Тип спекания, который наиболее вероятно происходит с JSC-1A, обусловлен размягчением стеклянных частиц. JSC-1A состоит примерно из 49% стекла по массе. Стекло делает его хорошим симулятором для лунной почвы, которая также имеет в своем составе большую долю стекла [11].

Как было показано [21], высокое поверхностное натяжение расплавленного реголита предотвращает смачивание и захват частиц, окружающих расплав. Добавляет трудностей и низкая плотность упаковки частиц. Даже при уплотнении, заключающемся в комбинации сжатия и встряхивания, пористость составляет примерно 40–50%. Низкая уплотняемость является следствием двух основных причин. Во-первых, лунный реголит плохо отсортирован в геологическом отношении: размеры частиц находятся в широком диапазоне значений. Реголит, как правило, мелкозернистый с содержанием по массе более 95% частиц размером менее 1 мм. Из них 50% имеют размер менее 50 мкм и 10–20% – менее 20 мкм [22]. Во-вторых, из-за неправильной формы частиц удельная площадь их поверхности высока ($\approx 0.5 \text{ м}^2/\text{г}$). Фактически частицы лунного грунта имеют примерно в восемь раз большую площадь поверхности, чем совокупность сфер с эквивалентным распределением частиц по размеру. Как следствие, частицы реголита не упаковываются вместе так же эффективно, как сферы [13].

Как показывают эксперименты, сжатие положительно влияет на прочность спеченных образцов, значительно ее увеличивая [11]. Авторы работ [23, 24] нагрели сжатые образцы JSC-1 (химически аналогичного предшественника JSC-1A) до 1100°C для получения высокопрочных спеченных кирпичей. Спекание началось в считанные минуты [23]. Другие эксперименты при 1050°C, проводимые в течение трех часов каждый на несжатых образцах, давали слегка спеченный материал, который можно дезагрегировать при слабом давлении [25].

Итак, прессование реголита уменьшает время спекания и увеличивает прочность спеченного образца. В спрессованном реголите возможны два типа спекания: твердотельное и жидкофазное. При спекании в твердом состоянии к образованию шейки между двумя контак-

тирующими зернами приводит только диффузия. Такой процесс, применяемый к реголиту, занимал бы много времени из-за сильных ковалентных связей между минеральными соединениями [12]. Другим вариантом является жидкофазное спекание, при котором используется расплав одного из минералов или стекло, чтобы связать зерна вместе. Это может занять более 24 часов [12] или только 20 минут [15] в зависимости от выбранной температуры, которая зависит от количества компонентов, плавящихся во время процесса.

Было обнаружено [2], что вакуумная среда оказывает положительное влияние на спекание JSC-1A: зерна связываются при более низкой температуре, чем на воздухе, что предотвращает образование дополнительной пористости и увеличивает прочность на сжатие до 152 МПа по сравнению только с 98 МПа для спекания JSC-1A в воздухе.

Лунный симулятор JSC-1A просеивали для соответствия его гранулометрического состава образцам настоящего лунного реголита. Разница между распределением размеров частиц в эксперименте и в реальном реголите была в основном связана с ограничениями сухого просеивания, которое препятствовало сбору всех частиц менее 25 мкм. После просеивания симулятор JSC-1A прессовали ручным гидравлическим прессом при давлении 255 МПа в матрице диаметром 20 мм. Часть спрессованных образцов спекали в воздушной среде, другую часть – в вакууме. Спекание проводилось в высокотемпературных печах.

Спекание JSC-1A проводили при 1100°C в вакууме и 1125°C на воздухе. Испытуемые об-

разцы (рис. 9), спеченные в вакууме, такие же черные, как и исходный порошок, тогда как спеченный на воздухе JSC-1A имеет красноватый цвет.

Повышение температуры для образца, спекаемого в воздушной среде, необходимо для увеличения сцепления между зернами. Дело в том, что кислород, вступая в реакцию с минеральными составляющими, образует на границе зерен новые фазы толщиной до 1 мкм, что снижает сцепление между зернами. С повышением температуры возрастает количество жидкой фазы, что улучшает сцепление. Вместе с тем повышение температуры приводит к обильному выделению газа, что увеличивает пористость спеченного образца. Сравнение плотностей приведено в табл. 3.

Как было сказано выше, симулятор JSC-1A имитирует морской реголит с низким содержанием титана. Для оценки влияния количества титана в реголите на механические свойства спеченного образца был создан симулятор на основе JSC-1A. Для этого в симуляторе JSC-1A было увеличено содержание ильменита до 20% от массы симулятора. Размеры зерен находились в диапазоне от 125 до 300 мкм. Спекание проводилось только на воздухе.

Таблица 3. Плотность и пористость симулятора реголита JSC-1A в виде порошка и в виде спеченного образца в зависимости от среды спекания

Среда спекания	Плотность порошка, г/см ³	Плотность спеченного образца, г/см ³	Расчетная пористость, %
Воздух	2.915	2.253	22.7
Вакуум	2.915	2.542	12.8

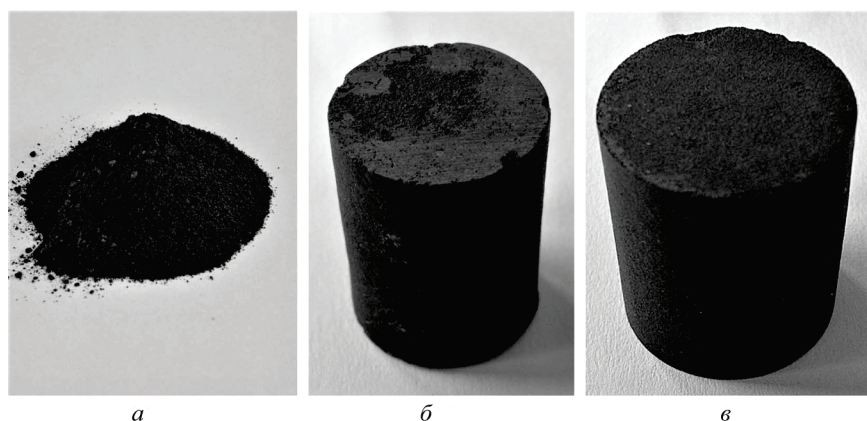


Рис. 9. Симулятор реголита JSC-1A (а); образец, спеченный в вакууме (б), и образец, спеченный на воздухе (в) [2]

Увеличение массового содержания ильменита указанной фракции в симуляторе практически не повлияло на свойства образца. Температура спекания не изменилась, спеченные образцы имеют сходный внешний вид и цвет при любом содержании ильменита до 20% всей массы симулятора. На рис. 10 видно, что ильменит оказывает лишь незначительное влияние на механические свойства спеченного

JSC-1A. Имитаторы с 0, 5, 10 и 20% ильменита по массе имеют сходные механические свойства в отношении прочности на сжатие и модуля Юнга.

Однако на механические свойства спеченного образца повлияло введение в состав симулятора фракции ильменита размером < 50 мкм. Для сравнения при введении дополнительно 10% по массе ильменита с размером зерен < 300 мкм спеченные образцы демонстрируют прочность на сжатие 69 МПа и модуль Юнга 13 ГПа, тогда как при введении такого же количества более мелкого ильменита образцы достигают прочности на сжатие 143 МПа и модуля Юнга 29 ГПа. Эти изменения приписываются не свойствам самого ильменита, а его влиянию на увеличение плотности упаковки симулятора.

Выводы

Как показывают опыты, проведенные различными учеными, термическая обработка реголита позволяет получить достаточно прочные конструкционные материалы. При этом процесс обработки достаточно прост, однако остается множество нерешенных вопросов по его автоматизации.

Для получения наилучших механических характеристик реголит необходимо сильно уплотнять и спекать в безвоздушной среде. Потребность в уплотнении может стать краеугольным камнем в разработке автоматической системы производства конструкционных материалов из реголита на Луне. Уплотнение предполагает прессование, а значит необходимы специальные формы, в которых реголит будет спекаться под давлением. Необходимость форм означает, во-первых, стандартизацию конструкционных элементов, что ограничивает потенциал свободного проектирования; во-вторых, усложняет процесс строительства и в целом усложняет систему: использование неких стандартизованных блоков требует их транспортирования и соединения между собой, следовательно потребуются специальные устройства для выполнения указанных операций.

Было показано, что повысить прочность образцов помогает введение в состав симулятора

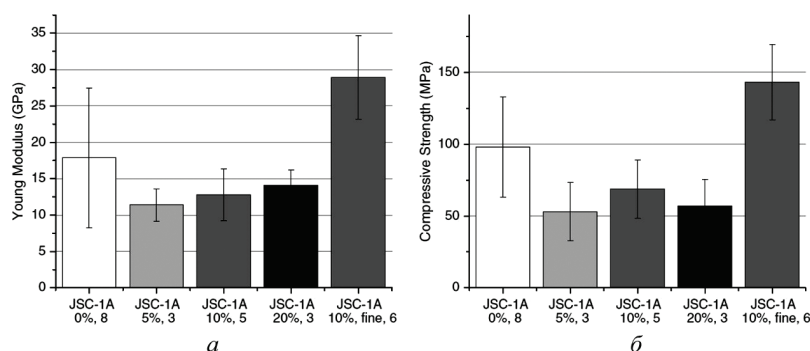


Рис. 10. Зависимость механических характеристик спеченных образцов от массового содержания в них ильменита: а – модуль Юнга; б – прочность на сжатие [2]

большого количества ильменита мелкой фракции. При этом решающим фактором является размер вводимой фракции, а не ее химический состав. Введение реголита мелкой фракции (< 50 мкм) увеличивает количество точек контакта у более крупных зерен. Возможно, удастся найти компромиссное решение, когда можно будет отойти от форм для прессования и при этом получать материал требуемой прочности. Очевидным решением видится предварительное измельчение реголита перед спеканием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Heiken G., Vaniman D., French B.M. Lunar source book: A user's guide to the moon. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1991. 778 p.
2. Meurisse A., Beltzung J.C., Kolbe M., Cowley A., Sperl M. Influence of mineral composition on sintering lunar regolith // J. Aero. Eng. 2017. V. 30. N 4. 04017014. DOI: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000721
3. Delgado A., Shafirovich E. Towards better combustion of lunar regolith with magnesium // Combust. Flame. 2013. V. 160. N 9. P. 1876–1882. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.03.021>
4. Hintze P.E., Curran J., Back T. Lunar surface stabilization via sintering or the use of heat cured polymers // 47th AIAA Aerospace Science Meeting. 2009. P. 1009–1015. DOI: 10.2514/6.2009-1015
5. Lee T.S., Lee J., Ann K.Y. Manufacture of polymeric concrete on the moon // Acta Astronaut. 2015. V. 114. P. 60–64. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.04.004>
6. Montes C., Broussard K., Gongre M., Simicevic N., Mejia J., Tham J., Allouche E., Davis G. Evaluation of lunar regolith geopolymer binder as a radioactive shielding material for space exploration applications // Adv. Space Res. 2015. V. 56. N 6. P. 1212–1221. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.05.044>
7. Grugel R.N. Integrity of sulfur concrete subjected to simulated lunar temperature cycles // Adv. Space Res. 2012. V. 50. N 9. P. 1294–1299. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.06.027>
8. Wilhelm S., Curbach M. Manufacturing of lunar concrete by steam // Conference: Earth and Space 2014: Engineering for Extreme Environments. 2014. P. 274–282. DOI: 10.1061/9780784479179.031

9. **Jakus A.E., Koube K.D., Geisendorfer N.R., Shah R.N.** Robust and elastic lunar and martian structures from 3D-printed regolith inks // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. P. 44931. DOI: 10.1038/srep44931
10. **Buchner C., Pawelke R.H., Schlauf T., Reissner A., Makaya A.** A new planetary structure fabrication process using phosphoric acid // *Acta Astronaut.* 2018. V. 143. P. 272–284. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.11.045>
11. **Cooper B.L.** Sintering of lunar and simulant glass // *AIP Conference Proceedings.* 2008. P. 186–194. DOI: 10.1063/1.2844966
12. **Pletka B.J.** Processing of Lunar Basalt Materials, Resources of Near Earth Space. University of Arizona Press, 1993. P. 325–350.
13. **Taylor L.A., Meek T.T.** Microwave sintering of lunar soil: properties, theory, and practice // *J. Aero. Eng.* 2005. V. 18. N 3. P. 188–196. DOI: 10.1061/(ASCE)0893-1321(2005)18:3(188)
14. **Fateri M., Gebhardt A.** Process parameters development of selective laser melting of lunar regolith for on-site manufacturing applications // *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* 2015. V. 12. N 1. P. 46–52. DOI: 10.1111/ijac.12326
15. **Gualtieri T., Bandyopadhyay A.** Compressive deformation of porous lunar regolith // *Mater. Lett.* 2015. V. 143. P. 276–278. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.11.153>
16. **Hintze P.E., Quintana S.** Building a lunar or martian launch pad with in situ materials: recent laboratory and field studies // *J. Aero. Eng.* 2012. V. 26. N 1. P. 134–142. DOI:10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000205
17. **Hintze P.E.** Building a vertical take off and landing pad using in situ materials // *Proc. Space Manuf. 14: Critical Technologies for Space Settlement.* 2010. 13 p.
18. **Krishna Balla V., Roberson L.B., O'Connor G.W., Trigwell S., Bose S., Bandyopadhyay A.** First demonstration on direct laser fabrication of lunar regolith parts // *Rapid Prototyp. J.* 2012. V. 18. N 6. P. 451–457. <https://doi.org/10.1108/13552541211271992>
19. **Nakamura T., Smith B.** Solar thermal system for lunar ISRU applications: development and field operation at Mauna Kea, Hi // 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2011. P. 433.
20. **Cardiff E., Hall B.** A dust mitigation vehicle utilizing direct solar heating // *Joint Annual Meeting of Lunar Exploration Analysis Group-International Conf. on Exploration and Utilization of the Moon-Space Resources Roundtable.* 2008. P. 4100.
21. **Meurisse A., Makaya A., Willsch C., Sperl M.** Solar 3D printing of lunar regolith // *Acta Astronaut.* 2018. V. 152. P. 800–810. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.06.063>
22. **Carrier W. D. III.** Particle size distribution of lunar soil // *ASME J. Eng. Mater. Technol.* 2003. V. 129. N 10. P. 956–959. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:10\(956\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:10(956))
23. **Allen C.C., Hines J.A., McKay D.S., Morris R.V.** Sintering of lunar glass and basalt // *In Engineering, Construction, and Operations in Space III, American Society of Civil Engineers.* 1992. P. 1209–1218.
24. **Allen C.C., Graf J.C., McKay D.S.** Sintering bricks on the moon // *In Engineering, Construction, and Operations in Space IV, American Society of Civil Engineers.* 1994. P. 1220–1229.
25. **Allen C.C., Morris R.V., McKay D.S.** Oxygen extraction from lunar soils & pyroclastic glass // *Journal of Geophysical Research.* 1996. V. 101. Iss. E11. P. 26085–26095. <https://doi.org/10.1029/96JE02726>

Lunar regolith processing technologies for subsequent using

K.V. Kochnev, A.V. Nenarokomov

*Moscow Aviation Institute (Aerospace University), Moscow, 125993, Russia
e-mail: kochnevkirillvl@gmail.com; nenarokomovav@mai.ru*

This work is a review of studies on the sintering of lunar regolith. The aim of the work was to collect information on proven methods of processing regolith for use as a building material of lunar bases. Among the possible methods for processing regolith into structural materials, the technique of layer-by-layer deposition using concentrated sunlight is highlighted. Due to the small amount of real lunar regolith brought to Earth, its simulators were used in the described experiments. A comparison of the characteristics of this regolith and simulators is given. The article considers the influence of various factors on sintered samples. Factors can be conditionally divided into two groups: regolith properties and sintering parameters. The properties of regolith include chemical and particle size distribution. Among the sintering parameters, it is worth highlighting the scanning speed and pattern, the energy flux density in the scanning beam, the pressure exerted on the sintered sample and the environment in which sintering takes place. It should be noted that some parameters in the monitored works were not combined, since other goals were pursued. The best strength characteristics were obtained in samples sintered in a vacuum in a resistive furnace during preliminary pressing with an increase in the amount of fine fraction in the regolith. Pressing and introducing an additional fine fraction increase the number of contact points between the particles. Evacuation reduces the required sintering temperature and porosity. However, sintering under the press in this form does not allow to work out the scanning technology. In this regard, in the future it is necessary to develop a technique

in which particles will be compacted and sintered by scanning with a beam of concentrated energy.

Keywords: lunar regolith, sintering, additive technologies, solar concentrator, lunar base.

REFERENCES

1. **Heiken G., Vaniman D., French B.M.** *Lunar source book: A user's guide to the moon*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1991. 778 p.
2. **Meurisse A., Beltzung J.C., Kolbe M., Cowley A., Sperl M.** Influence of mineral composition on sintering lunar regolith. *J. Aero. Eng.*, 2017, vol. 30, no. 4, art. 04017014. DOI: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000721
3. **Delgado A., Shafirovich E.** Towards better combustion of lunar regolith with magnesium. *Combust. Flame*, 2013, vol. 160, no. 9, pp. 1876–1882. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.03.021>
4. **Hintze P.E., Curran J., Back T.** Lunar surface stabilization via sintering or the use of heat cured polymers. *47th AIAA Aerospace Science Meeting*, 2009, pp. 1009–1015. DOI: 10.2514/6.2009-1015
5. **Lee T.S., Lee J., Ann K.Y.** Manufacture of polymeric concrete on the moon. *Acta Astronaut.*, 2015, vol. 114, pp. 60–64. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.04.004>
6. **Montes C., Broussard K., Gongre M., Simicevic N., Mejia J., Tham J., Allouche E., Davis G.** Evaluation of lunar regolith geopolymer binder as a radioactive shielding material for space exploration applications. *Adv. Space Res.*, 2015, vol. 56, no. 6, pp. 1212–1221. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.05.044>
7. **Grugel R.N.** Integrity of sulfur concrete subjected to simulated lunar temperature cycles. *Adv. Space Res.*, 2012, vol. 50, no. 9, pp. 1294–1299. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.06.027>
8. **Wilhelm S., Curbach M.** Manufacturing of lunar concrete by steam. *Conference: Earth and Space 2014: Engineering for Extreme Environments*, 2014, pp. 274–282. DOI: 10.1061/9780784479179.031
9. **Jakus A.E., Koube K.D., Geisendorfer N.R., Shah R.N.** Robust and elastic lunar and martian structures from 3D-printed regolith inks. *Sci. Rep.*, 2017, vol. 7. P. 44931. DOI: 10.1038/srep44931
10. **Buchner C., Pawelke R.H., Schlauf T., Reissner A., Makaya A.** A new planetary structure fabrication process using phosphoric acid. *Acta Astronaut.*, 2018, vol. 143, pp. 272–284. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.11.045>
11. **Cooper B.L.** Sintering of lunar and simulant glass. *AIP Conference Proceedings*, 2008, pp. 186–194. DOI: 10.1063/1.2844966
12. **Pletka B.J.** Processing of Lunar Basalt Materials. In *Resources of Near Earth Space*, University of Arizona Press, 1993, pp. 325–350.
13. **Taylor L.A., Meek T.T.** Microwave sintering of lunar soil: properties, theory, and practice. *J. Aero. Eng.*, 2005, vol. 18, no. 3, pp. 188–196. DOI: 10.1061/(ASCE)0893-1321(2005)18:3(188)
14. **Fateri M., Gebhardt A.** Process parameters development of selective laser melting of lunar regolith for on-site manufacturing applications. *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2015, vol. 12, no. 1, pp. 46–52. DOI: 10.1111/ijac.12326
15. **Gualtieri T., Bandyopadhyay A.** Compressive deformation of porous lunar regolith. *Mater. Lett.*, 2015, vol. 143, pp. 276–278. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.11.153>
16. **Hintze P.E., Quintana S.** Building a lunar or martian launch pad with in situ materials: recent laboratory and field studies. *J. Aero. Eng.*, 2012, vol. 26, no. 1, pp. 134–142. DOI:10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000205
17. **Hintze P.E.** Building a vertical take off and landing pad using in situ materials. *Proc. Space Manuf. 14: Critical Technologies for Space Settlement*. 2010. 13 p.
18. **Krishna Balla V., Roberson L.B., O'Connor G.W., Trigwell S., Bose S., Bandyopadhyay A.** First demonstration on direct laser fabrication of lunar regolith parts. *Rapid Prototyp. J.*, 2012, vol. 18, no. 6, pp. 451–457. <https://doi.org/10.1108/13552541211271992>
19. **Nakamura T., Smith B.** Solar thermal system for lunar ISRU applications: Development and field operation at Mauna Kea, HI. *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2011, pp. 433.
20. **Cardiff E., Hall B.** A dust mitigation vehicle utilizing direct solar heating. *Joint Annual Meeting of Lunar Exploration Analysis Group-International Conf. on Exploration and Utilization of the Moon-Space Resources Roundtable*, 2008. P. 4100.
21. **Meurisse A., Makaya A., Willsch C., Sperl M.** Solar 3D printing of lunar regolith, *Acta Astronaut.*, 2018, vol. 152, pp. 800–810. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.06.063>
22. **Carrier W.D., III.** Particle size distribution of lunar soil. *ASME J. Eng. Mater. Technol.*, 2003, vol. 129, no. 10, pp. 956–959. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:10\(956\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:10(956))
23. **Allen C.C., Hines J.A., McKay D.S., Morris R.V.** Sintering of lunar glass and basalt. In *Engineering, Construction, and Operations in Space III: Space '92 Proceedings of the Third International Conference American Society of Civil Engineers*, 1992, pp. 1209–1218.
24. **Allen C.C., Graf J.C., McKay D.S.** Sintering bricks on the Moon. In *Engineering, Construction, and Operations in Space IV, Space '94 Proceedings of the Fourth International Conference American Society of Civil Engineers*, 1994, pp. 1220–1229.
25. **Allen C.C., Morris R.V., McKay D.S.** Oxygen extraction from lunar soils & pyroclastic glass. *Journal of Geophysical Research*, 1996, vol. 101, iss. E11, pp. 26085–26095. <https://doi.org/10.1029/96JE02726>