КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, 2023, том 61, № 4, с. 311–321

УДК 520.6

ЭКСПЕРИМЕНТ “ЛУННЫЙ ПРИНТЕР” ПО ЛАЗЕРНОМУ СПЛАВЛЕНИЮ ЛУННОГО РЕГОЛИТА В КОСМИЧЕСКОМ ПРОЕКТЕ “ЛУНА-ГРУНТ”

© 2023 г. Т. М. Томилина[1], А. А. Ким[1, *], Д. И. Лисов[2], А. М. Лысенко[1]

[1]*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия*

[2]*Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

******kim@imash.ac.ru*

Поступила в редакцию 30.11.2022 г.
После доработки 05.12.2022 г.
Принята к публикации 06.12.2022 г.

В статье представлены результаты лабораторных исследований по применению новой технологии селективного лазерного сплавления для получения опытных изделий из лунного реголита без специальных добавок. Определены основные свойства природного реголита, которые существенно влияют на процесс сплавления. Получены первые образцы заданной геометрии из порошков лабрадорита и габбро-диабаза, которые являются естественными аналогами лунного реголита, по этой технологии. Результаты исследований планируется использовать при подготовке исходных данных для разработки космического прибора Лунный Принтер в составе комплекса научной аппаратуры перспективного лунного проекта “Луна-Грунт”.

DOI: 10.31857/S0023420622600313, **EDN:** ULNKTA

ВВЕДЕНИЕ

Российский проект “Луна-Грунт” с космическим аппаратом “*Луна-28*” является естественным завершением первого подготовительного этапа Российской лунной программы с реализацией четырех исследовательских автоматических посадочных и орбитальных аппаратов “*Луна-25*” – “*Луна-28*” (ОКР “Луна-Глоб”, “*Луна-Ресурс-1*” орбитальный и посадочный и “Луна-Грунт” [1, 2]). Предусмотренная в проекте доставка на Землю образцов полярного лунного вещества, тестовых образцов, сплавленных из реголита, биологических образцов и образцов электронных компонентов создаст научную основу для реализации следующих этапов Российской лунной программы – создания роботизированного Лунного полярного полигона, проведения первой лунной полярной пилотируемой экспедиции, строительства посещаемой Лунной базы.

Происхождение Луны – ближайшего к Земле космического тела до конца не выяснено, и вопросы ее внутреннего строения и эволюции пока остаются. Советские и американские исследования по программам “Луна” и “Аполлон” не затрагивали приполярные районы Луны, и о природных условиях на лунных полюсах до недавнего времени было практически ничего не известно.

В конце 90-х гг. прошлого века было установлено, что полюса являются уникальными районами, в веществе которых присутствует водяной лед и летучие соединения космического происхождения. Предположение о наличии водяного льда на лунных полюсах возникло на основе результатов наблюдений, выполненных в 1998 г. [3], когда было обнаружено ослабление вторичного излучения нейтронов с поверхности Луны. Нейтронное излучение лунной поверхности возникает под воздействием Галактических космических лучей, и возможной причиной ослабления потока энергичных нейтронов могло быть их замедление в веществе реголита с высоким содержанием водорода в молекулах водяного льда. В 2009 г. было произведено глобальное картографирование лунной поверхности в ИК-диапазоне [4] с борта индийского космического аппарата *Chandrayaan-1*, и была обнаружена спектральная линия в окрестности длины волны 3 мкм, которая соответствует спектральной линии молекулы воды. Эти наблюдения стали прямым доказательством присутствия воды на лунных полюсах.

В 2010 г. с помощью российского нейтронного телескопа LEND, работающего на космическом аппарате *LRO,* был выбран район полярного кратера Кабео, в реголите которого ожидалась максимальная концентрация водяного льда [5]. В район этого кратера был отправлен космический аппарат *LCROSS* с разгонным блоком Centaur. После столкновения Centaur с поверхностью Луны приборы *LCROSS* выполнили прямые из-

мерения состава вылетевшего с поверхности лунного грунта и обнаружили в нем содержание воды, около 5% по массе [6].

Предполагается, что вода в полярных районах Луны накопилась за сотни миллионов лет вследствие столкновений с кометами и астероидами. Многие из небесных малых тел прилетели от других звезд, и могли занести "споры жизни" в Солнечную систему. Можно предположить, что изучение состава лунного полярного вещества позволит выяснить вопрос о возможности внеземного происхождения жизни на нашей планете. Лунная вода также могла образоваться в лунном реголите из протонов солнечного ветра. Изучение изотопного состава лунной воды позволит ответить на вопрос о ее межпланетном или солнечном происхождении. Образцы лунного мерзлого реголита должны пройти детальные исследования в наземных лабораториях для выяснения происхождения лунной воды, ее изотопного состава, наличия в ней химических примесей и сложных высокомолекулярных соединений космического происхождения.

В результате изучения лунного грунта, доставленного на Землю советскими миссиями "*Луна*" и американскими – "*Аполлон*", а также из результатов измерений с борта автоматических космических аппаратов стало известно, что в веществе Луны присутствуют алюминий, железо, титан, редкие земли и многие другие элементы таблицы Менделеева. При этом все исследованные образцы лунного вещества были доставлены из районов на низких и умеренных широтах. Изучение элементного состава вещества полярных районов Луны не проводилось. Особый интерес представляет район Южного полюса, так как он расположен на периферии гигантского лунного Бассейна Южного полюса – Эйткен [7]. Вещество на поверхности этого кратера было вынесено из лунных недр, и оно имеет состав ранней Луны, который существенно отличается от состава реголита на современной поверхности лунных морей и высокогорий. Поэтому изучение состава основных породообразующих элементов реголита в окрестности Южного полюса позволит выяснить условия возникновения Луны и характер ее ранней эволюции. Кроме фундаментальных знаний о происхождении и эволюции Луны, изучение состава полярного реголита предоставит практические знания о наличии залежей полезных ископаемых, о степени содержания в них тех или иных редких элементов.

В последние годы стала активно обсуждаться идея создания обитаемых баз на Луне. Ряд стран, в том числе Россия, объявили о планах осуществить несколько крупных лунных проектов, включая и пилотируемые экспедиции, с целью изучения природных условий на лунных полюсах и построения необходимой инфраструктуры. Однако даже для простейшей инфраструктуры требуется доставка на Луну значительных масс с использованием тяжелых ракетоносителей, поэтому появились предложения и даже проекты (например, *ATHLETE*, 2011 г. и *Moonrise*, 2019 г.) по использованию для этих целей природных материалов – реголита, *in situ* и, соответственно, разработка для их применения новых технологий. Основное внимание уделяется аддитивным технологиям, в которых трехмерный объект создается методом послойного наложения исходного материала, в данном случае порошка реголита. Для изготовления крупногабаритных объектов и несущих конструкций в качестве исходного материала предлагается порошок реголита со связующими добавками [8, 9]. Изучаются разные добавки. Другой вид технологии, наиболее перспективный – технология послойного лазерного сплавления, в которой объект формируется на опорной плоскости послойно из порошка под действием лазерного луча. Лазер сканирует и плавит область порошка, заданную в цифровой модели. В настоящее время во многих научных лабораториях проводятся эксперименты с имитаторами лунного реголита с использованием аддитивной технологии 3D-печати для подтверждения возможности получения тестовых образцов и изучения их свойств [10, 11]. В основном все работы посвящены проблеме подбора технологических параметров для сплавления имитаторов лунного реголита на промышленных установках, которые изначально были разработаны для изготовления изделий из металлических порошков с соответствующими техническими требованиями. В отдельных работах на таких установках получены малые образцы заданной геометрии (колечки, кубики) с характерным размером 5 мм [10, 11], на кубических образцах измерялись механические параметры: твердость и пористость и определялась прочность на сжатие.

Однако прежде чем лунный реголит станет природным ресурсом для изготовления деталей лунной инфраструктуры на месте, необходимо создать новые технологии для такого применения. Надо показать, что эти технологии будут работать в лунных условиях и элементы лунной инфраструктуры могут быть получены, чтобы лунный реголит со временем мог стать основным материалом для создания деталей лунных механизмов и лунной инфраструктуры.

1. ПРОЕКТ "ЛУНА-ГРУНТ" И ЭКСПЕРИМЕНТ "ЛУННЫЙ ПРИНТЕР" В ЕГО СОСТАВЕ

Основная цель будущего российского проекта "Луна-Грунт" состоит в доставке на Землю образцов полярного реголита и проведении их детального анализа с целью выяснения состава летучих

соединений и воды, а также состава основных породообразующих элементов с учетом близости Южного полюса к границе Бассейна Южного полюса – Эйткен. В рамках этого проекта будет произведен забор образцов реголита. Эти образцы будут отбираться грунтозаборным устройством с разной глубины из-под поверхности – от нескольких сантиметров до 1–2 м – и без размораживания помещены в криогенную термостатированную капсулу для доставки в возвращаемом модуле на Землю.

Но не только фундаментальные знания о лунном полярном веществе вызывают интерес у исследователей – участников проекта “Луна-Грунт”. Луну рассматривают также и как полигон для разработки и испытаний новых средств и технологий для полетов в дальний космос. На основе опыта эксплуатации лунной космической инфраструктуры будут создаваться космические аппараты для будущих межпланетных экспедиций.

Для вывода в космос космического аппарата с поверхности Луны потребуется ракета гораздо меньшей массы, чем с земного космодрома (сила тяжести на Луне в 6 раз меньше). Можно ожидать, что будущая межпланетная космонавтика будет использовать лунные космодромы, на которых из лунного вещества будут изготавливаться элементы конструкций космических аппаратов, а из летучих компонентов лунного реголита будут вырабатываться компоненты топлива для лунных ракет [12]. Технологические эксперименты по использованию лунного вещества для создания космической инфраструктуры уже становятся важнейшим элементом научно-исследовательских программ освоения Луны.

Отсюда следует еще одна важная цель проекта “Луна-Грунт”: провести отработки новой космической техники на перелете Земля – Луна – Земля, на окололунной орбите, на поверхности Луны, провести технологические опыты по созданию возвращаемых образцов деталей на основе 3D-печати из лунного реголита и по добыче воды, кислорода и водорода из полярного реголита.

При выработке концепции проекта “Луна-Грунт” было принято решение включить в проект исследования по применению лунного реголита для создания элементов лунной инфраструктуры. Возможность возврата с лунной поверхности на Землю полезной нагрузки позволяет провести в рамках этого проекта комплексный научно-технологический эксперимент по созданию на Луне опытных образцов деталей из лунного реголита, первичной отбраковки этих образцов, полученных в разных режимах печати, и доставки наиболее удачных образцов на Землю для детального изучения их физико-механических свойств. Проведение такого исследования с применением реального лунного вещества и в условиях лунной космической среды позволит выяснить наиболее перспективные направления дальнейших исследований для создания наиболее эффективной технологии для применения лунного реголита в качестве исходного материала для 3D-печати.

В данной статье представлены первые результаты исследований и лабораторных испытаний для разработки концепции будущего космического эксперимента Лунный принтер в составе проекта “Луна-Грунт”.

2. КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ “ЛУННЫЙ ПРИНТЕР”

2.1. Цели эксперимента

Основная задача эксперимента “Лунный Принтер” (ЛП) – испытание режимов сплавления опытных образцов в космических условиях с использованием реального лунного вещества для выяснения оптимальных условий его сплавления. Изготовленные образцы должны быть предварительно отобраны по своим физико-механическим параметрам, наиболее удачные из них будут возвращены на Землю для дальнейших исследований в земных лабораториях.

В рамках данного эксперимента будут отработаны технологии подготовки вещества реголита для его дальнейшего использования в качестве исходного материала в процессе сплавления, основанном на лазерной 3D-печати, будут определены рациональные режимы лазерного сплавления в условиях космического пространства на лунной поверхности, и также будут определены механические и тепловые характеристики полученных опытных сплавленных образцов после их возвращения на Землю.

Результаты эксперимента будут использованы в качестве исходных данных для проектирования будущих экспериментальных установок по изготовлению деталей и элементов конструкций из лунного реголита, необходимых для дальнейшей отработки технологий 3D-печати из лунного вещества в рамках последующих проектов.

2.2. Общая концепция эксперимента “Лунный Принтер”

Концепция эксперимента и аппаратуры ЛП основана на объединении в одном комплексе нескольких процессов (рис. 1):

- забор грунта и его измельчение;
- анализ и сортировка лунного грунта;
- процесс сплавления методом лазерной 3D-печати;
- контроль качества сплавления образца и его механической прочности;

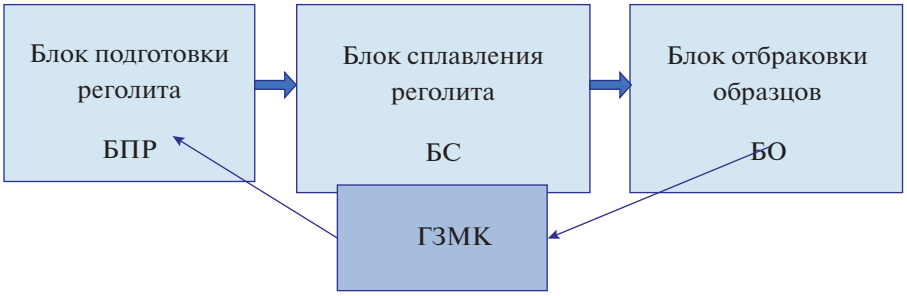

Рис. 1. Блочная структура эксперимента ЛП.

• подготовка и передача отобранных образцов в возвратный модуль.

Лунное вещество для эксперимента ЛП должно доставляться грунтозаборным устройством (комплекс ГЗМК), установленным на борту космического аппарата. В блоке подготовки реголита (БПР) вещество измельчается, просеивается установкой измельчения грунта и ступенчатыми вращающимися ситами и доставляется в емкость накопления материала для сплавления реголита и далее на платформу для построения образца в блоке сплавления (БС).

Блок сплавления (БС) оснащен системой лазерного сплавления и оптическим датчиком для контроля заполнения материалом платформы построения. В БС производится сплавление частиц материала между собой и с нижележащим слоем. Процесс сплавления основан на применении метода селективного (выборочного) лазерного сплавления (СЛС). Данная технология применяется для изготовления изделий из порошков по компьютерным цифровым моделям (CAD). Этот процесс заключается в последовательном послойном сплавлении порошкового материала посредством лазерного излучения.

По завершении сплавления образцы проходят контроль качества и оценку механических свойств в блоке отбраковки (БО): визуальный контроль качества через телевизионную камеру и сброс образца с расчетной высоты. Отобранные образцы, прошедшие контроль, помещаются в возвращаемый контейнер. Бракованные образцы и излишки материала удаляются за борт и/или в емкость для остатков грунта и отбракованных образцов.

Контроль и управление работой всех функциональных блоков аппаратуры ЛП осуществляется блоком электроники (БЭ).

Для проведения эксперимента в составе космического аппарата должно быть спроектировано устройство загрузки контейнера с образцами в возвращаемый модуль (ВМ). Количество возвращаемых образцов должно составить от трех до пяти штук. Необходимые ресурсы для проведения эксперимента ЛП представлены в табл. 1.

Исходя из концепции эксперимента ЛП, можно определить задачи первого этапа лабораторных исследований, которые необходимо провести заранее для создания научной основы его опытно-конструкторской разработки.

Первой задачей является исследование аналогов-имитаторов лунного реголита, которые в наибольшей степени подходят для лабораторных исследований и отработок процесса 3D-печати.

Таблица 1. Необходимые ресурсы для проведения космического эксперимента ЛП

Параметр прибора	Оценка величины
Суммарная масса, кг	Не более 25
Потребляемая мощность (Вт)	
• в дежурном режиме	До 100
• в режиме печати	До 300–500
Оценка информативности в процессе печати, бит/с	Не меньше 500–3200
Оценка времени подготовки к печати и печати 1 образца, с	
• подготовка к печати	1800
• печать	3600
Общее время работы прибора на Луне	Минимальное время 20 ч, максимальное время 40 ч
Общий объем передаваемой информации, бит	$1.7 \cdot 10^7$

Таблица 2. Химический состав. Концентрация, вес. %

	SiO_2	Al_2O_3	TiO	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	MnO
Материковый реголит (“*Аполлон-16*”)	45.2	27.4	0.53	4.16	4.27	16.6	0.47	0.11	0.057
Морской реголит (“*Луна-16*”)	41.7	15.33	3.39	16.64	8.78	12.49	0.34	0.10	0.21

Вторая задача состоит в изучении процесса лазерного сплавления для выбора параметров сплавляемого вещества, оптимальных типов лазеров и режимов их работы. Опыт решения указанных задач и получения первых пробных образцов определяет направления дальнейших лабораторных исследований.

3. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РЕГОЛИТА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЛУННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

3.1. Особенности лунной природной среды, которые влияют на создание лунной инфраструктуры, применение реголита

При создании лунной инфраструктуры надо учитывать особенности природной среды на Луне: известно, что на Луне сила тяжести в шесть раз меньше, чем на Земле. Луна лишена атмосферы и дипольного магнитного поля, постоянно бомбардируется микрометеоритами, Галактическими и солнечными космическими лучами, подвергается воздействию прямого солнечного излучения (термические циклы –176, +127°С). Все это в значительной степени влияет не только на объекты инфраструктуры, но и на технологические процессы при создании ее элементов из лунного реголита на месте.

3.2. Основные свойства реголита

Реголит – это поверхностный грунт Луны, который в разных областях достигает глубины от 4 до 15 м. Природные свойства реголита были изучены в период 1970–1980 гг. как на образцах, доставленных на Землю, так и на основе анализа экспериментальных данных, полученных в лунных условиях во время работы комических аппаратов “*Луноход-1*” и “*Луноход-2*” [13, 14]. Было установлено, что прямых аналогов реголита на Земле нет, поэтому для лабораторных исследований были созданы имитаторы, близкие по составу к природным образцам. При этом было обнаружено, что состав грунта зависит от того, в каком месте и с какой глубины от поверхности конкретный образец взят – это проявляется в различии его физико-механических и тепловых свойств. Например, морские районы обогащены титаном и железом, в то время как горные районы богаты кальцием и алюминием.

Рассматривая реголит как исходный материал для создания объектов на Луне с помощью современных аддитивных технологий, необходимо выделить те характеристики, которые определяют его теплофизические свойства: морфологический, гранулометрический, минеральный и химический составы.

По морфологическим и гранулометрическим характеристикам лунный реголит не имеет прямых аналогов среди природных земных образований. Частицы лунного грунта имеют неправильную, угловатую и вытянутую форму с острыми концами, что обуславливает пространственную анизотропию теплофизических свойств. Средний размер частиц меняется в пределах 40–130 мкм со средним значением 70 мкм. Кумулятивные кривые распределения частиц реголита по размерам показывают, что гранулометрический состав реголита практически не зависит от его регионального происхождения (море или материк), но зависит от степени зрелости реголита, которая определяется местным геологическим происхождением и возрастом породы. Следует отметить, что изменение гранулометрического состава лунного грунта с глубиной на данный момент плохо изучено.

Главными минералами в составе реголита являются силикаты. Важно, что эти минералы являются минералами переменного состава, так что реголит морских и материковых областей имеют разный химический состав. Типичный химический состав реголита в морских и материковых областях по результатам исследований образцов грунта, доставленных автоматическими станциями “*Луна-16*” и “*Аполлон-16*”, приведен в табл. 2.

В связи с задачей создания лунной инфраструктуры исследования свойств реголита в настоящее время возобновились. Одновременно появились публикации о разработке имитаторов реголита с различными характеристиками под конкретные задачи [15, 16].

3.3. Варианты технологий применения реголита in situ

Среди технологий, которые предлагаются для использования реголита как исходного материала для создания элементов инфраструктуры *in situ* можно выделить две основные группы: 1) технологии, в которых в качестве исходного мате-

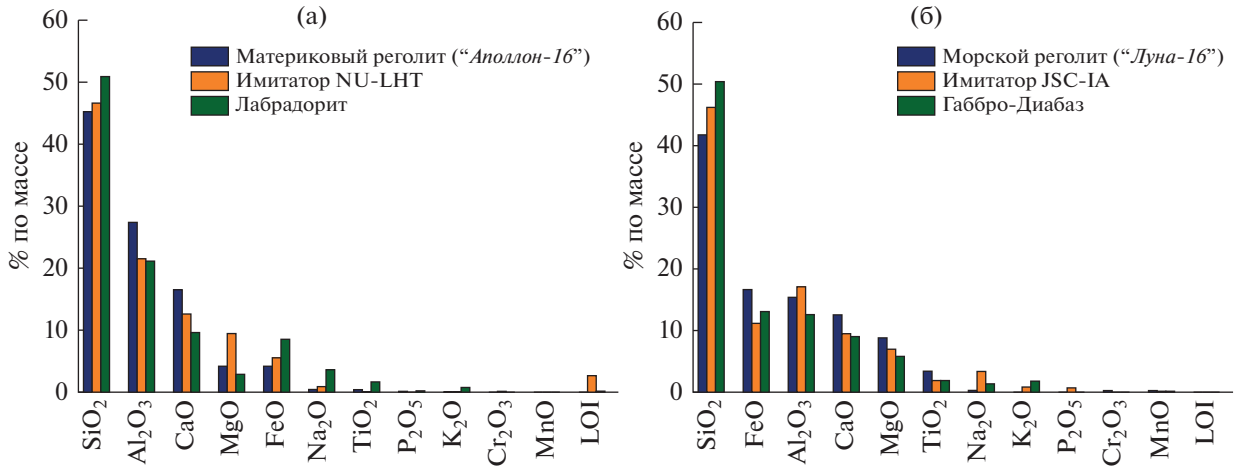

Рис. 2. Химический состав лабрадорита и габбро-диабаза в сравнении с природным лунным грунтом.

риала используется реголит с различными связующими добавками (*D-shape*, микро-фермы, “лунный бетон” [8, 9, 17]), при этом добавки составляют до 35% по массе; и 2) технологии, в которых в качестве исходного материала используется только лунный грунт, который подвергается сплавлению.

Первый вариант имеет очевидный недостаток – необходимость доставки на Луну дополнительных материалов, например, полимеров, или добычи местных компонентов, например, серы [17]. Следует отметить, что, как показали эксперименты с имитаторами реголита с добавками, полученные образцы имеют хорошие механические характеристики. Технологии первой группы предлагается использовать для строительства больших объектов, при этом подразумевается, что необходимое для строительства оборудование надо будет доставить.

Второй вариант, без добавления дополнительных материалов, представляется более перспективным, особенно при использовании лазера в качестве источника энергии для сплавления лунного реголита [18–23]. В таком варианте изделия получаются небольших геометрических размеров и имеют твердую хрупкую структуру со значением прочности на сжатие до 50 МПа. При этом, как показывают эксперименты [10, 18], достигается достаточная точность воспроизводимой геометрии, что позволяет говорить о широкой применимости данной технологии для изготовления элементов конструкций.

Разработки технологий применения реголита активно развиваются по обоим вариантам. Для лабораторного макетирования эксперимента “Лунный принтер” было решено применить второй вариант технологий, основанный на селективном лазерном сплавлении.

4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ЛУННЫМ ПРИНТЕРОМ

4.1. Выбор имитаторов-аналогов реголита для лабораторных исследований

Выбор имитаторов реголита для эксперимента осуществлялся по двум критериям – это его теплофизические свойства и доступность. В настоящее время известен только один отечественный вариант, VI-75, который разрабатывался для механических испытаний, поэтому для лабораторных исследований по сплавлению реголита были изготовлены аналоги, имитирующие в первую очередь его теплофизические свойства. Использовались две горные породы, лабрадорит и габбро-диабаз, наиболее близкие по минеральному и химическому составам к лунному реголиту, которые измельчались в порошок в соответствии с гранулометрическим составом реголита.

Химический состав имитаторов в сравнении с природным лунным грунтом представлен на рис. 2. Можно видеть, что по химическому составу лабрадорит хорошо имитирует материковый тип реголита, в то время как габбро-диабаз хорошо имитирует морской тип реголита. Также лабрадорит и габбро-диабаз хорошо согласуются по составу с американскими имитаторами NU-LHT и JSC-1A, соответственно.

Гранулометрический состав имитаторов в сравнении с составом лунного реголита, доставленного миссией “*Аполлон-16*” на Землю, представлен на рис. 3 (слева). Кривые Apollo-16 min и Apollo-16 max ограничивают область, в которой лежат кумулятивные кривые, полученные для всех исследованных проб; кривые для порошка лабрадорита и габбро-диабаза совпадают. Морфология частиц показана на рис. 3 (справа).

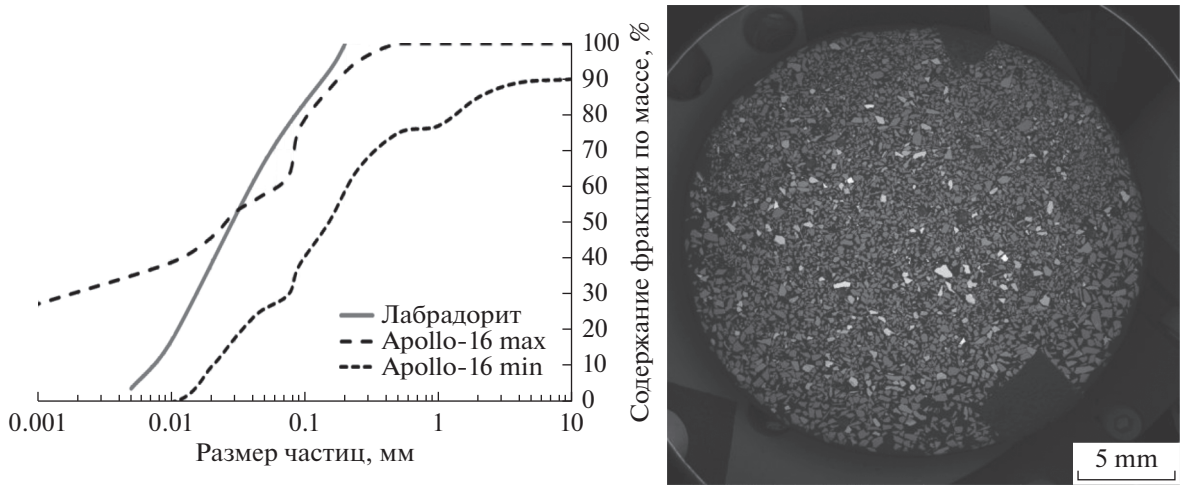

Рис. 3. Кумулятивные кривые распределения фракций имитаторов и лунного грунта с миссии “*Аполлон-16*” (слева) и морфология частиц имитаторов (справа).

С точки зрения использования имитаторов реголита для лазерного сплавления в промышленных установках СЛС, где в качестве исходного материала используются специально приготовленные металлические порошки, надо иметь ввиду, что тепловые свойства реголита существенно отличаются от свойств металлов – они являются анизотропными по теплопроводности и неоднородными по температуре плавления для разных минералов, входящих в его состав.

4.2. Выбор лазера для лабораторных исследований

Анализ публикаций по сплавлению имитаторов реголита показал, что в основном использовался волоконный непрерывный лазер Yb:YAG с длиной волны 1.06 мкм. Лазеры такого типа используются в промышленных СЛС-установках для металла и известно, как они работают. Также было установлено [18, 22, 23], что на длине волны порядка 1 мкм реголит поглощает около 90% падающего излучения, в то время как, на длинах волн порядка 10 мкм это значение не превышает 18%, например, для газового CO_2-лазера.

Для лабораторного эксперимента использовалась небольшая промышленная установка 3D-печати Concept Laser MLab с непрерывным волоконным лазером Yb:YAG. Его параметры соответствовали максимальной мощности 100 Вт, длине волны 1.06 мкм и диаметру пучка 50 мкм. Выбор установки определялся параметрами лазера. Процесс сплавления порошка проходил в инертной среде (азот) по технологическим требованиям к установке, на платформе построения 90 × 90 × 80 мм.

4.3. Основные требования к методике сплавления

План эксперимента состоял из пяти этапов:

1. Прожиг порошка одиночными треками на разных режимах лазера. Определение наилучших режимов с отсутствием значимых дефектов: несплавление порошка с подложкой, образование шариков на всей длине трека, неровность трека.

2. Прожиг одиночных слоев порошка на тех же режимах. Определение наилучших режимов с отсутствием значимых дефектов: несплавление порошка с подложкой, сильная шероховатость, образование шариков.

3. Многослойное сплавление на выбранных на этапе 2 режимах. Определение оптимального режима сплавления, соответствующего минимальной пористости и возможности сплавления образов высотой более 5 мм.

4. Сплавление образца простой геометрии на оптимальном режиме, выбранном на этапе 3.

5. Сплавление образца сложной геометрии.

В рамках предварительной подготовки эксперимента порошки просеивались ситом до 100 мкм для более равномерного поглощения лазерного излучения при сплавлении. Кроме того, проводилось тестирование материала для изготовления опорной площадки, на которую насыпается порошок, так называемой подложки. В опубликованных работах по сплавлению имитатора лунного реголита в основном используют три типа материалов: металл, стекло и керамика [23, 10, 11]. Критерием является качество сплавления первого слоя порошка с подложкой. В данном эксперименте материал подложки был определен по результатам предварительных экспериментальных исследований, выполненных на простой установке HTS 300Mobile с импульсным лазером. Было установлено, что стекло и металл не обеспечива-

	W, Вт	*V*, мм/с
1	50	125
2	50	150
3	50	175
4	50	200
5	80	175
6	80	200
7	80	250
8	80	275
9	80	300

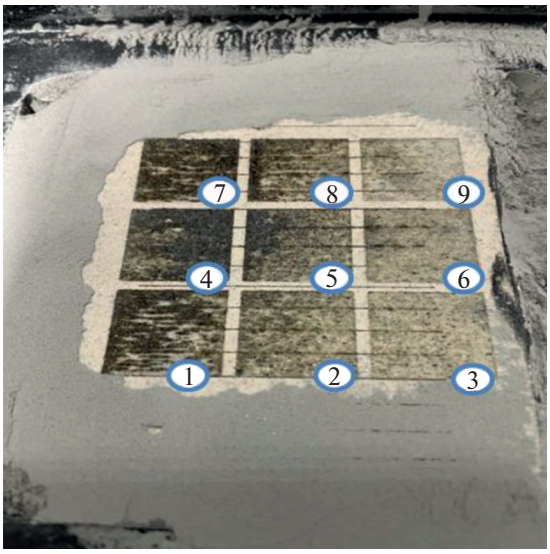

Рис. 4. Режимы сплавления одиночных слоев (слева) и сплавленные образцы (справа).

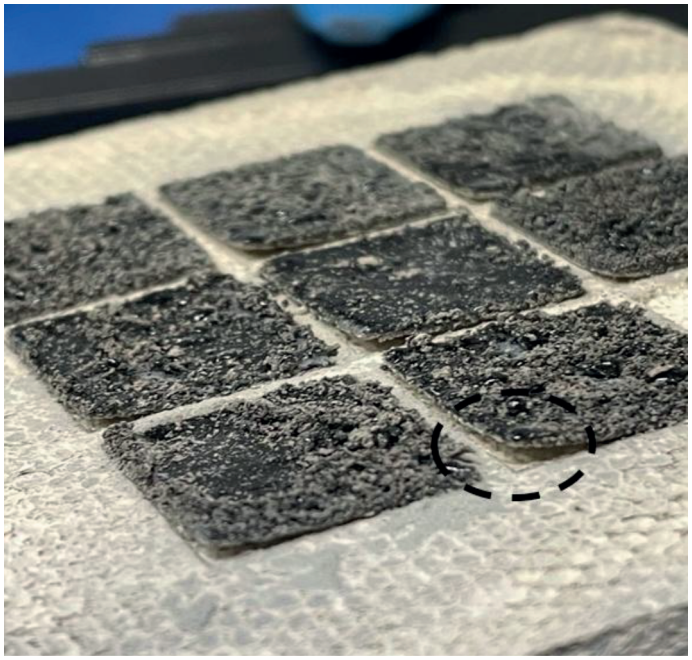

Рис. 5. Результат многослойного сплавления образцов (пунктирном отмечено место отрыва образца от подложки).

ли нужного сплавления порошков лабрадорита и габбро-диабаза с подложкой, и для эксперимента была выбрана керамическая подложка из огнеупорной глины.

4.4. Эксперимент с порошками лабрадорита и габбро-диабаза

На первом этапе эксперимента не удалось получить качественные одиночные треки, по которым можно было бы выбрать наилучшие режимы сплавления. Проявилось свойство “нетекучести” порошка – неровное нанесение слоя. Эта проблема нанесения качественного слоя проявлялась на протяжении всего эксперимента. Интересно, что эта проблема не обсуждается в публикациях.

Результаты второго этапа сплавления одиночного слоя толщиной 0.1 мм на подложке на девяти режимах лазера можно видеть на рис. 4. Слева приведена таблица параметров сплавления: мощность лазера *W*, Вт и скорость сканирования

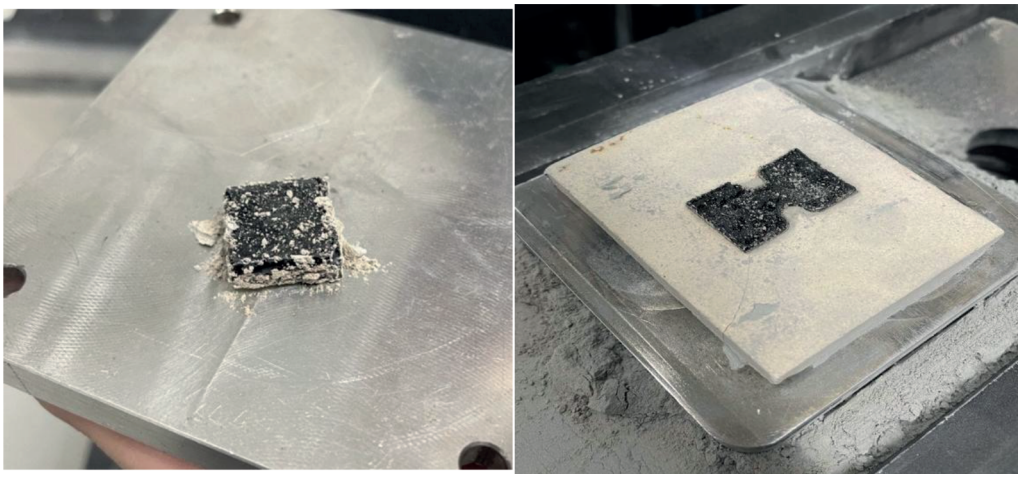

Рис. 6. Образец простой геометрии, снятый с подложки (слева) и сложной геометрии на керамической подложке (справа) из порошка лабрадорита.



Рис. 7. Образец простой геометрии из порошка габбро-диабаза на керамической подложке.

V, мм/с, справа – 9 образцов одиночного слоя размером 15 × 15 мм.

Полученные образцы имеют правильную форму, но слой очень неравномерный. По качеству образцов одиночного слоя не удалось определить оптимальные параметры режима сплавления, поэтому было проведено многослойное сплавление образцов на тех же девяти режимах. По результатам сплавления девяти образцов размерами 15 × × 15 мм и высотой 3 мм был выбран оптимальный режим, который соответствовал сплавленному образцу, имеющему заданную форму и минимальную пористость (образец на рис. 5 в центре).

По результатам многослойного сплавления был сделан вывод, что оптимальным является режим сплавления с параметрами: мощность лазера и скорость сканирования 80 Вт и 175 мм/с соответственно (режим 5 в таблице на рис. 4), толщина слоя составляла 0.1 мм. На этом оптимальном режиме из порошков имитаторов были сплавлены образцы простой геометрии с размерами 15 × × 15 мм и высотой 8 мм (рис. 6 (слева) и рис. 7), и образец более сложной геометрии (рис. 6, справа).

Исследование микроструктуры полученных образцов показало, что наряду с ровными однородными участками имеются неровные и неоднородные, соответственно при измерении твердости значения по Виккерсу имели диапазон от 100 до 720 HV. Хрупкость сплавленных образцов демонстрирует рис. 7, где показан образец из порошка габбро-диабаза, который раскололся после падения с высоты 20 см.

В ходе эксперимента было замечено, что края образцов отрывались от подложки из-за остаточных напряжений (рис. 5). Стоит отметить, что отрыв проходил не по границе лабрадорит–подложка, а в материале подложки. Судя по всему, данная проблема решается более тщательным

подбором режимов сплавления. Этот вопрос будет изучаться на следующих этапах лабораторных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования по сплавлению имитаторов лунного реголита, изготовленных из горных пород, лабрадорита и габбро-диабаза, методом аддитивной технологии селективного лазерного сплавления в рамках лабораторных экспериментов, подтвердили принципиальную возможность ее использования для получения конструктивных элементов из лунного реголита без применения специальных добавок. Были определены основные свойства природного реголита, которые влияют на процесс сплавления, и получены первые опытные образцы заданной геометрии. Образцы имели хрупкую структуру и высокую твердость.

Выявленные трудности в реализации поставленной задачи показали необходимость дополнительных детальных исследований свойств лунного реголита применительно к технологии СЛС, а также адаптации промышленной технологии селективного лазерного сплавления, для которой исходным материалом является специально приготовленный металлический порошок. Результаты будущих исследований в этих направлениях позволят выявить основные закономерности применения технологий СЛС при работе с лунным реголитом, разработать теоретические модели процесса сплавления и научиться прогнозировать свойства конечного изделия из реголита, созданного в лунных условиях. Эти результаты создадут научную основу для разработки бортового научного прибора Лунный принтер и проведения эксперимента по изготовлению опытных образцов из лунного реголита в рамках проекта “*Луна-Грунт*”.

Авторы выражают благодарность Институту двигателей и энергетических установок Самарского университета и ЦКП АТОС Университета “ВОЕНМЕХ” за техническую помощь в проведении эксперимента по сплавлению имитаторов лунного реголита на лазерных установках, а также сотрудникам института ГЕОХИ РАН за оказанные консультации по свойствам реголита.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00840.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Митрофанов И.Г.* Об освоении Луны. Русский космизм, лунная гонка и открытие “новой Луны” // Земля и Вселенная. 2019. № 1. С. 5–17. https://doi.org/10.7868/S0044394819010018
2. *Митрофанов И.Г., Зеленый Л.М.* Об освоении Луны. Планы и ближайшие перспективы // Земля и Вселенная. 2019. № 4. С. 16–37. https://doi.org/10.7868/S0044394819040029
3. *Feldman W.C., Maurice S., Binder A.B. et al.* Fluxes of fast and epithermal neutrons from Lunar Prospector: Evidence for water ice at the lunar poles // Science. 1998. V. 281. Iss. 5382. P. 1496–1500. https://doi.org/10.1126/science.281.5382.149
4. *Pieters C.M., Goswami J.N., Clark R.N. et al.* Character and spatial distribution of OH/H_2O on the surface of the Moon seen by M3 on Chandrayaan-1 // Science. 2009. V. 326 Iss. 5952. P. 568–572. https://doi.org/10.1126/science.1178658
5. *Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Boynton W.V. et al.* Hydrogen Mapping of the Lunar South Pole Using the LRO Neutron Detector Experiment LEND // Science. 2010. V. 330. Iss. 6003. P. 483–486. https://doi.org/10.1126/science.1185696
6. *Colaprete A., Schultz P., Heldmann J. et al.* Detection of water in the LCROSS ejecta plume // Science. 2010. V. 330. Iss. 6003. P. 463–468. https://doi.org/10.1126/science.1186986
7. *Petro N.E., Pieters C.M.* Surviving the heavy bombardment: Ancient material at the surface of South Pole–Aitken Basin // J. Geophys. Res. Atmos. 2004. V. 109. Art. ID. E06004. https://doi.org/10.1029/2003JE002182
8. *Cesaretti G., Dini E., Kestelier X.D. et al.* Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology // Acta Astronaut. 2014. V. 93. P. 430–450. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.07.034
9. *Taylor S.L., Jakus A.E., Koube K.D. et al.* Sintering of micro-trusses created by extrusion-3D-printing of lunar regolith inks// Acta Astronaut. 2018. V. 143. P. 1–8. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.11.005
10. *Goulas A., Binner J.G.P., Engstrom D.S. et al.* Mechanical behaviour of additively manufactured lunar regolith simulant components // Proc IMechE Part L: J Materials: Design and Applications. 2018. V. 233. Iss. 8. P. 1629–1644. https://doi.org/10.1177/1464420718777932
11. *Caprio L., Demir A.G., Previtali B.* Determining the feasible conditions for processing lunar regolith simulant via laser powder bed fusion // Addit. Manuf. 2020. V. 32. Art. ID. 101029. https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.101029
12. *Kornuta D., Abbud-Madrid A., Atkinson J. et al.* Commercial lunar propellant architecture: A collaborative study of lunar propellant production// Reach. 2019. V. 13. Art. ID. 100026. https://doi.org/10.1016/j.reach.2019.100026
13. *Флоренский К.П.* Лунный грунт: свойства и аналоги. М.: АН СССР. Ин-т геохимии и аналит. химии им. В.И. Вернадского, 1975.
14. *Carrier W.D., Olhoeft G.R., Mendell W.* Physical properties of the lunar surface // Lunar sourcebook: A user’s guide to the Moon. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1991. P. 475–594.

15. *Taylor L.A., Pieters C.M., Britt D.* Evaluations of Lunar Regolith Simulants// Planet. Space Sci. 2016. V. 126. P. 1–7. https://doi.org/10.1016/j.pss.2016.04.005

16. *Slyuta E.N., Grishakina E.A., Makobchuk V.Y. et al.* Lunar soil-analogue VI-75 for large-scale experiments // Acta Astronaut. 2021. V. 187. P. 447–457. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.06.047

17. *Grugel R.N.* Sulfur “concrete” for lunar applications – Sublimation concerns // Adv. Space Res. 2008. V. 41. Iss. 1. P. 103–112. https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.08.018

18. *Fateri M., Gebhardt A.* Process Parameters Development of Selective Laser Melting of Lunar Regolith for On-Site Manufacturing Applications // Intern. J. Appl. Ceram. Technol. 2015. V. 12. Iss. 1. P. 46–52. https://doi.org/10.1111/ijac.12326

19. *Goulas A., Friel R.J.* 3D printing with moondust // Rapid Prototyp. J. 2016. V. 22. Iss. 6. P. 864–870. https://doi.org/10.1108/RPJ–02–2015–0022

20. *Gerdes N., Fokken L.G., Linke S. et al.* Selective Laser Melting for processing of regolith in support of a lunar base // J. Laser Appl. 2018. V. 30. Art. ID. 032018. https://doi.org/10.2351/1.5018576

21. *Farries K.W., Visintin P., Smith S.T. et al.* Construction of lunar masonry habitats using laser-processed bricks // 71st Intern. Astronautical Congress (IAC) – The CyberSpace Edition. 2020. IAC-20-E5.1.1 x58693. 11 p.

22. *Balla V.K., Roberson L.B., O’Connor G.W. et al.* First demonstration on direct laser fabrication of lunar regolith parts // Rapid Prototyp. J. V. 18. Iss. 6. P. 451–457. https://doi.org/10.1108/13552541211271992

23. *Goulas A., Binner J.G.P., Harris R.A. et al.* Assessing extraterrestrial regolith material simulants for in-situ resource utilisation based 3D printing // Appl. Mater. Today. 2017. V. 6. P. 54–61. https://doi.org/10.1016/j.apmt.2016.11.004