

УДК 520.6

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ИМИТАТОРОВ ЛУННОГО РЕГОЛИТА С РАЗЛИЧНЫМИ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

© 2024 г. Т. М. Томилина^{1,*}, А. А. Ким¹, Д. И. Лисов^{2,1}, А. М. Лысенко¹

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

**tatiana@imash.ac.ru*

Поступила в редакцию 29.11.2023 г.

Переработанный вариант 16.02.2024 г.

Принята к публикации 05.03.2024 г.

В статье представлены результаты лабораторных испытаний селективного лазерного сплавления (СЛС) порошковых композиций имитаторов лунного реголита из земных пород габбро-диабазы и лабрадорита, которые имеют различные диапазоны фракционности. Показано, что композиции с узкими диапазонами фракционности с размерами частиц 50...100 мкм и 100...140 мкм позволяют изготовить тестовые образцы с достаточно хорошими свойствами с параметрами относительно низкой пористости и приемлемым воспроизведением заданной геометрической формы. Получены экспериментальные зависимости пористости тестовых образцов от величины объемной плотности энергии сплавления. В обоих случаях узких диапазонов фракционности порошковых композиций из габбро-диабазы, как для 50...100 мкм, так и 100...140 мкм, эти зависимости практически совпадают с ростом плотности энергии и при 20 Дж/мм³ и выше достигают минимального значения пористости 30...35 %. С другой стороны, было экспериментально установлено, что применение СЛС для порошковых композиций с широким диапазоном фракционности от нескольких микрон до 100 мкм не позволяет изготовить тестовые образцы с удовлетворительными свойствами — как по низкой пористости, так и по точности соответствия заданной геометрии.

DOI: 10.31857/S0023420624050107, EDN: IGWAGQ

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы задача исследования дальнего космоса за пределами околоземных орбит перешла на новую стадию — его освоения. Активно обсуждается идея создания обитаемых баз на Луне, которая вполне может стать реальностью. Рядом стран объявлено о планах осуществить несколько крупных лунных проектов, включая и пилотируемые экспедиции, стратегической целью которых станет разведка и добыча лунных ресурсов. Ближайшей задачей освоения Луны является изучение физических условий на лунных полюсах, где по последним данным найдена вода (см., например, [1, 2]).

Одним из первых вопросов практического освоения Луны станет создание необходимой инфраструктуры, причем с максимально возможным использованием местных ресурсов. Первым

кандидатом на роль строительного материала стал поверхностный лунный грунт — реголит, свойства которого хорошо изучены [3] и многочисленные имитаторы его свойств уже созданы [4].

Уже в самом начале космических полетов на Луну в 1970–1980-х гг. исследователи изучали свойства реголита как природного материала лунной поверхности, и также с точки зрения взаимодействия с ним механических устройств, для которых он будет внешней средой. Решалась задача наземной отработки элементов лунной космонавтики — как обеспечить их функционирование в лунных условиях (например, луноход, скафандр). В начале 2000-х гг., по мере расширения планов будущего освоения Луны, возник интерес к реголиту как к строительному материалу для изготовления элементов лунной инфраструктуры на месте (In Situ Resource Utilization,

ISRU). Появился ряд предложений по изготовлению из реголита искусственных объектов на Луне — от площадки для посадки космического аппарата до деталей механизмов, элементов конструкций и инструментов [5–7].

В настоящее время технологии, которые предлагаются для создания элементов инфраструктуры *in situ* с применением реголита, развиваются в двух направлениях: с использованием связующих добавок — для получения материала типа «лунный бетон» для построения крупных объектов [8–10], при этом добавки составляют до 35 % по массе; и без применения добавок — когда практически чистый лунный грунт подвергается сплавлению. Сплавление может производиться как традиционным способом в формовочных печах [11–13], так и по новым, аддитивным технологиям 3D-печати.

Методы аддитивных технологий (АТ) изначально разрабатывались для быстрого прототипирования изделий (материал — пластик, технология *PolyJet*) и для оптимизации производственного процесса изготовления небольших изделий из металлического порошка (разные варианты лазерного сплавления). Для космического применения наиболее реализуемым в настоящее время представляется метод АТ на основе селективного лазерного сплавления (СЛС), когда лазер, двигаясь по заданной траектории, сплавляет частицы порошка в слое, и изделие формируется послойно на платформе построения. Если в земных условиях исходным материалом для СЛС является специально приготовленный порошок из металла или керамики, то в условиях лунной среды в рамках подхода ISRU исходным порошковым материалом может стать реголит.

Очевидно, что для технологий АТ, использующих для подхода ISRU помимо реголита специальные связующие материалы, необходима доставка дополнительного сырья на Луну или добыча таких компонентов, как, например, сера, непосредственно на месте [10]. Это понижает привлекательность реголита, как материала для прямого применения. Кроме того, как показали эксперименты, полученные образцы, исходно имея хорошие механические характеристики, после большого числа термических циклов деградируют — их прочность на сжатие падает в несколько раз из-за разных коэффициентов теплового расширения связующего материала и реголита.

Лазерные технологии для подхода ISRU, использующие чистый реголит, представляются более перспективными. Эти технологии могут

позволить создавать образцы различной геометрии под разные задачи без изменения устройства самой установки. Они обладают гибкой настройкой режимов сплавления, которые можно корректировать непосредственно на Луне для достижения наилучшего результата. При этом имеется опыт использования лазера, входящего в состав установок, в космических условиях (см., например, [14]).

Впервые принципиальная возможность такого применения АТ была продемонстрирована в работе [15], также АТ на основе СЛС были использованы в лабораторных экспериментах в ряде более поздних исследований [6, 16, 17, 7]. Были получены образцы небольших размеров (5...15 мм), разной геометрии, с высокой твердостью, но хрупкие. В качестве исходного материала обычно берется порошок коммерчески доступного имитатора JSC-1, разработанного в США, и по технологическим требованиям АТ путем просеивания убираются крупные фракции, больше 150 мкм [6, 7, 16]. Что касается особенностей самого технологического процесса послойного сплавления в зависимости от свойств исходного порошка, например, его морфологии и гранулометрического состава, то они в литературе не обсуждаются. Однако эти вопросы имеют принципиальное значение — необходимо экспериментально показать, что морфологические свойства порошкообразного материала, который может быть создан из реголита, позволяют применять технологии СЛС для его успешного сплавления в тестовые образцы. Следует выяснить требования к процессу предварительной подготовки реголита для его использования в качестве исходного материала. Очевидно, что сходство с реголитом по химическому составу еще не является достаточным основанием для использования того или иного имитатора для отработки технологии СЛС. Физика процесса СЛС также существенно зависит от размеров и формы частиц, от практической возможности приготовить необходимую для СЛС исходную порошковую композицию из природного реголита. Поэтому, вначале надо выделить те характеристики, которые станут определяющими: химический и минералогический составы, морфологию и размерное распределение частиц порошка.

Таким образом, на основе анализа результатов, полученных в различных исследованиях, можно сделать вывод, что для успешного проведения новых лабораторных экспериментов по отработке технологий СЛС с использованием

имитаторов лунного реголита необходимо предварительно решить два вопроса:

1) определить, какие земные породы / минералы являются оптимальными для применения в качестве имитатора лунного реголита для отработок технологий СЛС;

2) выяснить вопросы необходимости предварительной подготовки исходной порошковой композиции для СЛС с учетом свойств природного реголита.

В предыдущей работе авторов [18] для подобных исследований была обоснована возможность применения земных пород — измельченного габбро-диабаз и лабрадорита в качестве имитаторов реголита, соответственно морского и материкового типа.

Эти породы сходны по химическому составу с лунным реголитом (табл. 1), при этом они доступны в качестве сырья практически в неограниченных объемах. Габбро-диабаз — горная порода вулканического происхождения, по химическому и по минеральному составу близкая к базальту. Лабрадорит — также горная порода вулканического происхождения, состоящая в основном из плагиоклаза, лабрадора с примесью 5...7 % пироксенов и рудных минералов. В исследованиях использовались Карельский габбро-диабаз и Неверовский лабрадорит.

Имеются доступные промышленные технологии изготовления из указанных пород порошковых композиций, которые могут иметь различные гранулометрические и морфологические характеристики (распределение по размерам и по форме отдельных частиц) для применения в СЛС экспериментах.

Также в распоряжении исследователей имеются лазерные установки, пригодные по своим параметрам для отработок режимов СЛС с исходными тестовыми порошками из вещества этих пород.

В настоящей статье представлены результаты продолжения экспериментальных исследований зависимости свойств тестовых образцов, созданных на основе АТ в лабораторном эксперименте по методике СЛС, от гранулометрических характеристик различных имитаторов реголита из земных пород габбро-диабаз (ГД) и лабрадорита (ЛДР). Технологический процесс СЛС порошковых материалов требует учета большого количества факторов, оказывающих непосредственное влияние на свойства сплавленного тестового образца. Эти факторы были исследованы

экспериментально, и на этой основе были определены оптимальные параметры сплавления тестовых образцов.

ИЗУЧЕНИЕ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ С РАЗЛИЧНЫМИ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Как отмечалось выше, для лабораторного эксперимента были выбраны ГД и ЛДР с учетом сходства их химического состава с лунным реголитом в морских и материковых районах Луны.

В данной работе для решения поставленной задачи варианты исходных порошковых композиций из ГД и ЛДР были специально приготовлены путем измельчения и стирания каменной крошки природного камня и дальнейшего просеивания.

Как было показано в статье [18], наличие в порошковой композиции мелких фракций (пылевых частиц) с размерами <50 мкм затрудняет работу с порошком по технологии СЛС. Вероятно, это связано как с плохой сыпучестью материала при формировании слоев на платформе построения, так и с различием условий плавления для крупных и мелких частиц исходной порошковой композиции.

Кроме этого, следует иметь в виду, что тепловые свойства реголита существенно отличаются от свойств порошковых композиций из металлов — частицы реголита анизотропны по теплопроводности и неоднородны по температуре плавления для разных минералов, входящих в их состав, в то время как морфология у металлических порошков однородная.

Из простых физических соображений и опыта сплавления металлических порошков представляется очевидным, что оптимальные условия для СЛС можно подобрать в том случае, когда все частицы порошковой композиции из имитаторов реголита будут иметь одинаковые составы, размеры и форму.

Для проверки этого предположения в ходе данного исследования из ГД и ЛДР были изготовлены два варианта специально подготовленных порошковых композиций с относительно узким диапазоном фракционности: от 50 до 100 мкм и от 100 до 140 мкм. Для сравнения полученных результатов с полученными ранее результатами 2022 г. [18] в экспериментах были также использованы порошковые композиции

Таблица 1. Химический состав образцов реголита и имитаторов: Морской реголит (*Луна-16, Apollo-15*), Материковый реголит (*Луна-20, Apollo-16*), имитаторы: JSC-1A, NU-LHT, Габбро-диабаз, Лабрадорит

| | Море | | | | Материк | | | |
|--------------------------------------|---------------------|------------------------|--------------|----------------------------|---------------------|------------------------|--------------|-------------------------|
| | Реголит | | Имитатор | | Реголит | | Имитатор | |
| | <i>Луна-16, [3]</i> | <i>Apollo-15, [19]</i> | JSC-1A, [20] | Габбро-диабаз ¹ | <i>Луна-20, [3]</i> | <i>Apollo-16, [19]</i> | NU-LHT, [21] | Лабрадорит ¹ |
| SiO ₂ | 41.70 | 46.66 | 45.7 | 53.1 | 44.95 | 45.20 | 46.7 | 50.90 |
| TiO ₂ | 3.39 | 1.35 | 1.9 | 2.80 | 0.49 | 0.53 | 0.41 | 1.69 |
| Al ₂ O ₃ | 15.33 | 16.99 | 16.2 | 12.62 | 23.07 | 27.40 | 24.4 | 21.04 |
| FeO + Fe ₂ O ₃ | 16.64 | 11.67 | 12.4 | 15.26 | 7.35 | 4.16 | 4.16 | 8.60 |
| MnO | 0.21 | 0.16 | 0.2 | — | 0.11 | 0.06 | 0.07 | 0.09 |
| MgO | 8.78 | 10.56 | 8.7 | 2.46 | 9.26 | 4.27 | 7.90 | 2.83 |
| CaO | 12.49 | 11.55 | 10.0 | 7.49 | 14.07 | 16.60 | 13.6 | 9.76 |
| Na ₂ O | 0.34 | 0.47 | 3.2 | 1.35 | 0.35 | 0.47 | 1.26 | 3.70 |
| K ₂ O | 0.10 | 0.21 | 0.8 | 1.90 | 0.08 | 0.11 | 0.08 | 0.88 |
| P ₂ O ₅ | — | 0.20 | 0.7 | — | 0.11 | 0.12 | 0.15 | 0.20 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.21 | 0.26 | — | — | 0.15 | 0.11 | — | — |

¹Исследования, проведенные в химической лаборатории.

из ЛДР и ГД с широким распределением частиц по размерам от 0 до 100 мкм.

Измельченные породы ГД и ЛДР просеивались набором сит для получения порошковой композиции заданной фракционности. Были подготовлены четыре композиции:

- 1) 50...100 мкм (ГД 50-100) и
- 2) 100...140 мкм (ГД 100-140)
- 3) 0...100 мкм (ГД 0-100) и
- 4) 0...100 мкм (ЛДР 0-100).

Проверка сыпучести порошковых композиций

Применение стандартной методики изучения сыпучести с воронкой Холла (по ГОСТ 20899-9) показало, что порошковые композиции 1) и 2) с узким диапазоном фракций имеют удовлетворительную сыпучесть для использования пассивного способа нанесения слоев порошка на платформе построения 3D-принтера (табл. 2). С другой стороны, было установлено, что порошковые композиции 3) и 4) имеют низкую сыпучесть. В случае их применения это потребует разработки специального активного устройства формирования слоев для сплавления.

Изучение морфологических свойств отдельных частиц

Были проведены исследования морфологии частиц приготовленных композиций. Микрофотографии получены на электронном микроскопе TESCAN VEGA3-XMU. Было установлено, что морфология отдельных частиц порошковых

композиций с фракционностью 0...100 мкм, 50...100 мкм и 100...140 мкм имеет такой же характер, что и естественный лунный реголит (рис. 1а,б). В приготовленных композициях присутствуют частицы, как близкие по форме к сферическим (рис. 1в), так и остроугольные и вытянутые частицы (рис. 1г).

Изучение морфологических распределений

Примеры морфологических распределений для форм поверхностей частиц порошковых композиций ГД 50-100 и ГД 100-140 приведены на рис. 2. Для сравнения, на рис. 3 приведен пример морфологических распределений для форм частиц порошковой композиции, искусственно приготовленной для СЛС из нержавеющей стали [23]. Видно, что форма металлических частиц близки к сферической и диапазон фракций достаточно узкий: 15...50 мкм. Отсюда следует, что отработанные технологии СЛС из металлических порошков могут оказаться не оптимальными для сплавления форм, как из лунного реголита, так и из порошковых композиций имитаторов.

Основное отличие морфологии приготовленных порошковых композиций из земных пород и естественных порошков из лунного реголита состоит в наличии у реголита небольшой доли частиц с особыми свойствами. К ним относятся сферические частицы из стекла и металла (рис. 4а и 4б), а также спекшиеся частицы с неправильными дендритными (древopodobными) формами, рис. 4в. В связи с тем, что морфологические свойства реголита неравномерно

Таблица 2. Характеристики порошковых композиций

| Порошковые композиции | Гранулометрический состав композиции | Морфология | Насыпная плотность, г/см ³ | Плотность частиц, г/см ³ | Текучесть Время истечения, с |
|-----------------------|--------------------------------------|------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| ГД 50-100 | | | 1.4 | 3.071 ± ±0.001 | 40.13 |
| ГД 100-140 | | | 1.4 | 3.092 ± ±0.003 | 47.50 |
| ГД 0-100 | | | 0.8 | 3.098 ± ±0.003 | — (не сыпался) |
| ЛДР 0-100 | | | 0.7 | 3.136 ± ±0.011 | — (не сыпался) |

распределены по поверхности Луны, судить о точном процентном соотношении тех или иных частиц с особыми свойствами крайне сложно. Отсутствие в имитаторах таких редких частиц не будет определяющим фактором для решаемой

задачи, так как протекание процесса СЛС обуславливается свойствами преобладающих частиц, определяющих основные морфологические и теплофизические свойства вещества реголита. Можно считать, что подготовленные

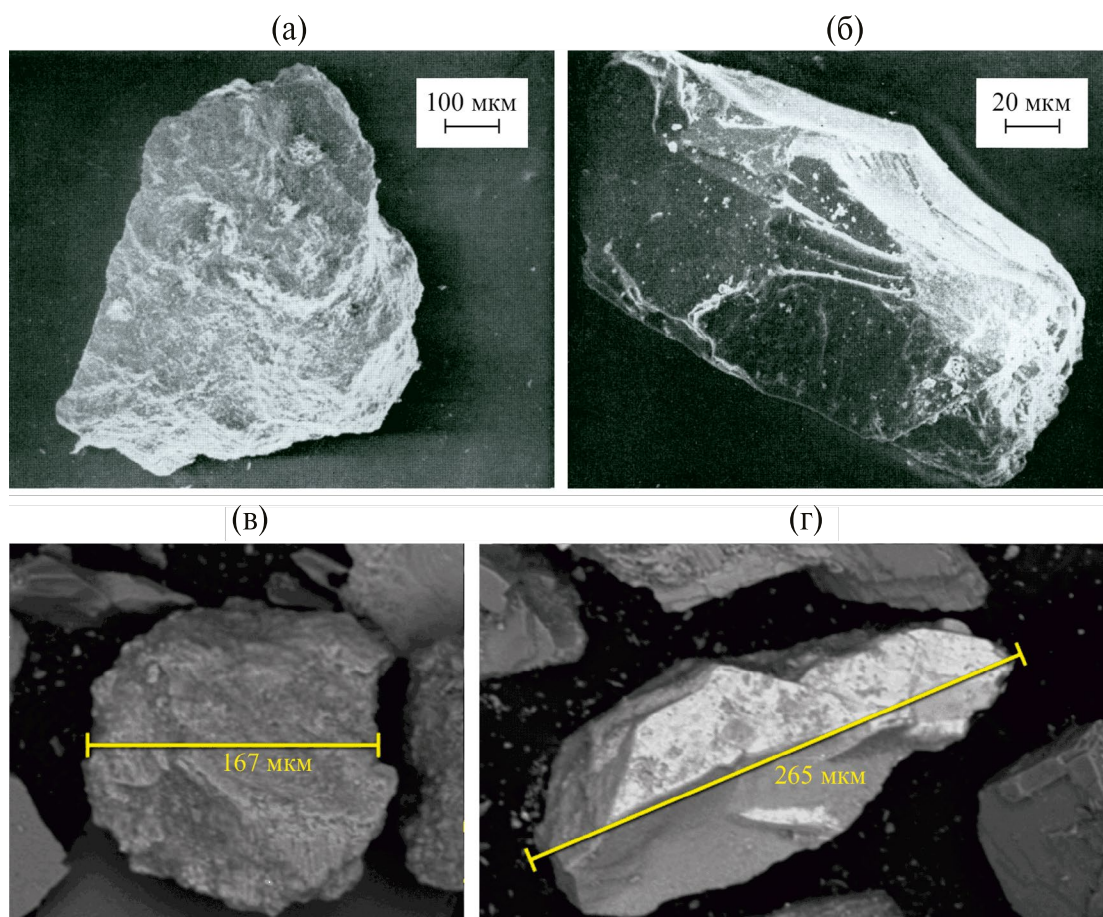


Рис. 1. Сравнение формы частиц природного реголита (а, б) [19] с габбро-диабазом для фракций: ГД 50-100 (в), ГД 100-140 (г).

порошки соответствуют реголиту в той мере, в какой это имеет место и для известных имитаторов JSC-1, JSC-1A, NU-LHT.

Накопленный опыт приготовления порошковых композиций и результаты их морфологического исследования показали, что существующее оборудование не всегда позволяет точно воспроизвести заданную фракционность. В изготовленных композициях наблюдаются частицы с размерами, значительно превышающими заданные, например, на рис. 1 в видна частица с размером больше 170 мкм по всем осям при заданном диапазоне 50...100 мкм. Следует отметить и недостаточную точность оборудования для гранулометрии, которое не всегда выявляет наличие таких частиц в порошковой пробе. Дело в том, что методики и оборудование разрабатывались для приготовления и гранулометрического анализа порошковых композиций из металлов, форма частиц которых близка к сферической. Вместе с тем, проведенный анализ гранулометрических показателей порошковых композиций из

имитаторов реголита свидетельствует о том, что процентное содержание частиц с размерами отличными от заданной фракционности невелико. В основном это связано с трудностями отделить «пылевую» фракцию. Для композиций ГД 50-100 наличие фракций меньше 50 мкм составляет около 20 %, а больше 100 мкм — 9 %; для ГД 100-140 фракции меньше 100 мкм — 23 %; больше 140 мкм — 15 %, поэтому их можно использовать для выяснения общих требований к применению СЛС-технологий для 3D-печати из лунного реголита.

Зависимость формирования слоев сплавления от морфологических и гранулометрических свойств порошковых композиций

Формирование слоя сплавления — важный элемент оптимальной реализации СЛС. От величины насыпной плотности зависят свойства опытных образцов. Параметры плотности приготовленных порошковых композиций 1) — 4) из ГД и ЛДР до и после утряски показаны в табл. 3.

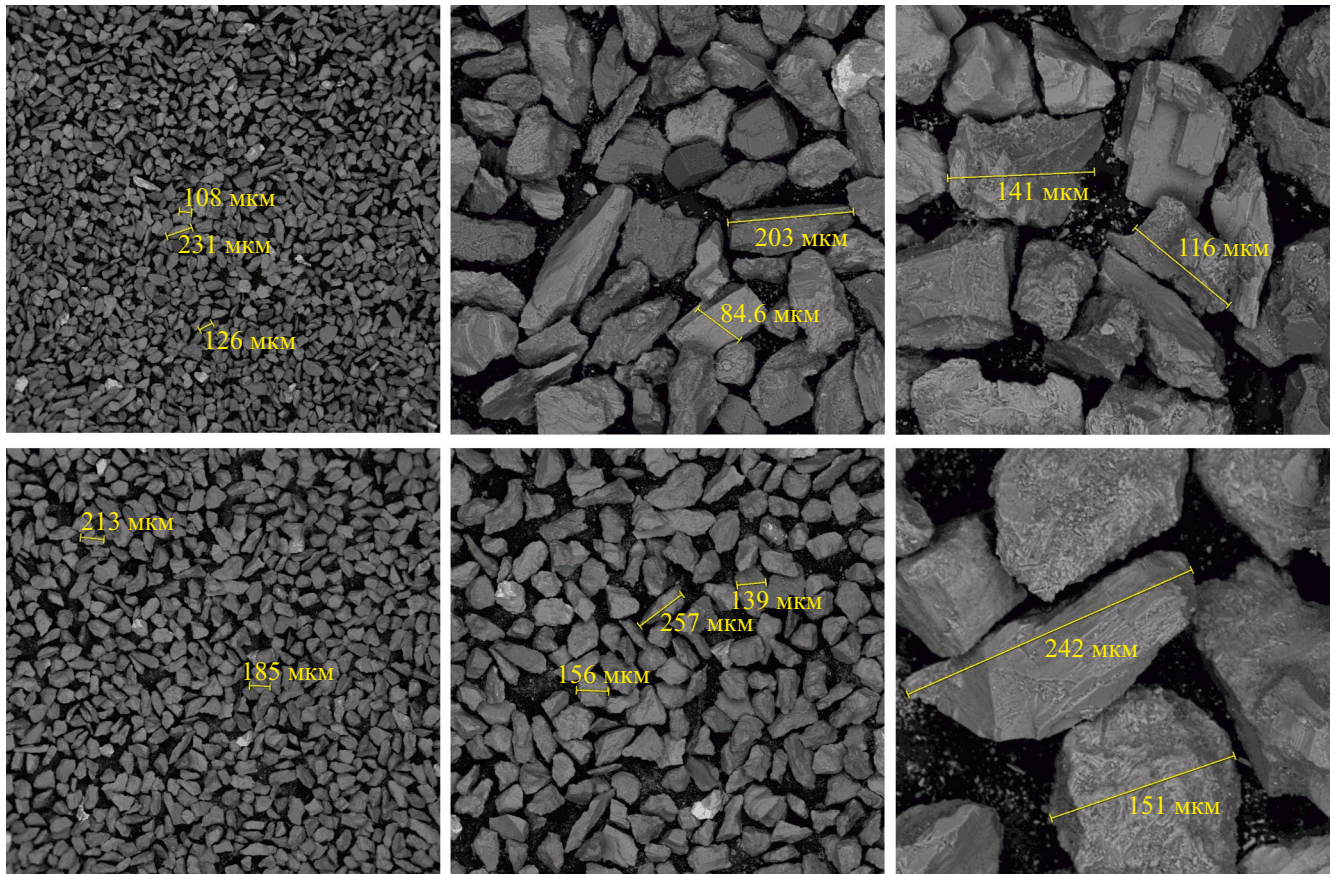


Рис. 2. Морфология частиц. Вверху: порошковая композиция ГД 50-100 с увеличениями в 55, 300 и 500 раз, слева направо. Внизу: порошковая композиция ГД 100-140 с увеличением в 55, 300 и 600 раз, слева направо. Размерными линиями отмечены частицы с размерами главных осей, превышающими заданную верхнюю границу фракционности.

В таблице также представлена плотность исходного вещества частиц композиции. Данные демонстрируют, что значения насыпной плотности порошковых композиций с узкими диапазонами

фракционности 50...100 мкм и 100...140 мкм практически совпадают и составляют 1.4 г/см^3 . При этом процедура утряски для этих композиций повышает плотность до 1.6 г/см^3 , примерно на 14 %. А порошковые композиции с широким диапазоном фракционности 0...100 мкм имеют низкую насыпную плотность $0.7...0.8 \text{ г/см}^3$, которая после утряски увеличивается в 1.71...1.75 раз, до $1.2...1.4 \text{ г/см}^3$. Очевидно, для повышения качества образцов более высокая плотность исходной порошковой композиции с узкой фракционностью является более предпочтительной.

Основные результаты морфологических исследований порошковых композиций

Итоговая табл. 2 содержит основные результаты морфологических исследований приготовленных порошковых композиций 1) – 4) для экспериментов по применению технологии СЛС. Очевидно, что порошковые композиции с узким диапазоном фракционности представляются предпочтительными по двум важным свойствам.

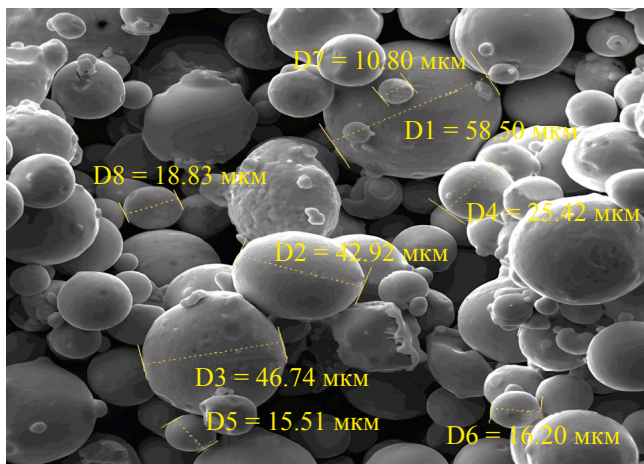


Рис. 3. Морфология поверхности частиц для порошка из нержавеющей стали марки 316L, размер фракций 10...50 мкм, форма близка к сферической [23].

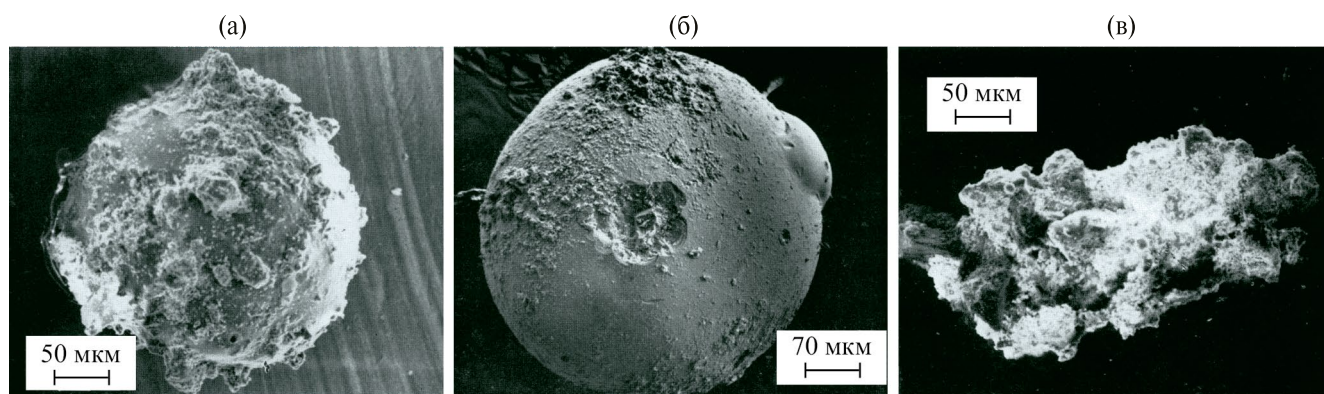


Рис. 4. Особые частицы реголита [22]: спекание частиц реголита на поверхности стеклянной сферической частицы, *Луна-16* (а); ударный микрократер на поверхности стеклянной сферической частицы, *Луна-16*, Море Изобилия (б); дендритовидная частица (в).

Таблица 3. Насыпная плотность порошковых композиций

| Композиция | Масса навески, г | Исходный объём порошка, см ³ | Объём порошка после утряски, см ³ | Насыпная плотность, г/см ³ | Насыпная плотность после утряски, г/см ³ | Плотность порошка, г/см ³ |
|------------|------------------|---|--|---------------------------------------|---|--------------------------------------|
| ГД 50-100 | 19.62 | 14.3 | 12.0 | 1.4 | 1.6 | 3.071 ± 0.001 |
| ГД 100-140 | 21.16 | 15.5 | 13.0 | 1.4 | 1.6 | 3.092 ± 0.003 |
| ГД 0-100 | 12.85 | 16.0 | 9.5 | 0.8 | 1.4 | 3.098 ± 0.003 |
| ЛДР 0-100 | 11.65 | 16.5 | 9.5 | 0.7 | 1.2 | 3.136 ± 0.011 |

Во-первых, они обладают удовлетворительным свойством сыпучести, что необходимо для приготовления слоев для сплавления. Композиции с фракционностью от 0 мкм собственной сыпучестью не обладают — их применение в установке СЛС потребует разработки дополнительного механизма для приготовления сплавляемых слоев.

Следует отметить, что сыпучесть порошковых композиций с узким диапазоном фракционности была проверена в условиях земного поля гравитации. Известно, что лунное ускорение свободного падения примерно в 6 раз меньше земного. Вопрос о подтверждении достаточно высокой сыпучести лунного реголита в условиях лунного тяготения даже после дополнительной обработки поверхностей частиц пока остается открытым и требует отдельного изучения.

Во-вторых, было показано, что насыпная плотность порошковых композиций с узким диапазоном фракционности ГД 50-100 и ГД 100-140 достаточно велика и составляет около 45 % от исходной плотности вещества частиц, и условия для процесса сплавления могут быть более благоприятными для изготовления образцов с достаточно высокой объемной плотностью.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОИСК РЕЖИМОВ СЛС ДЛЯ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ С РАЗНОЙ ФРАКЦИОННОСТЬЮ

Экспериментальная установка для тестирования сплавления порошковых композиций

Анализ публикаций по сплавлению имитаторов реголита показал, что для получения тестового образца не требуется большая мощность лазера. В основном используется волоконный непрерывный лазер Yb:YAG с длиной волны 1.06 мкм [15, 6, 16]. На такой длине волны реголит поглощает около 92 % падающего излучения (для газового CO₂ лазера с длиной волны 10.6 мкм поглощение составляет всего 18 %), и такие лазеры устанавливаются в промышленных СЛС-установках для металла.

На основе простой расчетной модели сплавления и обзора литературы был определен тип и параметры лазера, наиболее подходящего для проведения исследований по сплавлению порошка имитатора лунного реголита. Установка с максимальной мощностью лазера 100 Вт и длиной волны лазерного излучения 1.06 мкм была

Таблица 4. Характеристики установки СЛС Concept Laser Mlab cusing

| Наименование | Значение |
|-------------------------------------|--------------|
| Тип активного элемента | Yb:YAG |
| Длина волны излучения, мкм | 1.06 |
| Режим работы | Непрерывный |
| Максимальная мощность излучения, Вт | 100 |
| Диаметр сфокусированного пучка, мкм | 50 |
| Область построения, мм | 80 × 90 × 90 |
| Тип защитной среды | Азот |

создана на основе промышленного 3D-принтера Concept Laser Mlab cusing. Ее характеристики приведены в табл. 4.

В состав установки входят контейнер для исходного порошка, камера с платформой построения, лазерная сканирующая система и контейнер для отходов сплавления с остатками порошка. Предварительно подготовленный порошок засыпается в первый контейнер. В процессе работы установки порция порошка из этого контейнера высыпается на платформу построения и разравнивается, образуя слой установленной толщины. Лазерный луч, двигаясь по заданной траектории, сплавляет частицы порошка в слой. Процесс СЛС обеспечивается циклическим сканированием лазерного луча, сплавляющего слой за слоем.

Установка позволяет изменять параметры скорости движения лазерного луча V (мм/с) и мощности лазера P (Вт). Они определяют режим сплавления и задаются в программной среде установки. Там же задается траектория движения лазера и толщина отдельного слоя порошка h .

Готовый образец снимается с платформы построения для дальнейшего исследования его свойств. Для того, чтобы не повредить платформу построения к ней крепится специальная подложка. Процедура снятия готового образца с подложки и выбор соответствующего материала для ее изготовления представляют собой отдельную задачу. Материал подложки выбирается исходя из близости ее химического состава к сплавляемому порошку для согласования тепловых характеристик, в основном по температуре плавления. После тестирования нескольких материалов была выбрана керамическая плитка Муллит-кордиерит, которая состоит из оксида кремния, оксида алюминия и оксида магния ($MgO:Al_2O_3:SiO_2=2:2:5$).

Сравнение условий сплавления для порошковых композиций

Очевидно, что особенности морфологии порошковых композиций, рассмотренные выше, должны значительно повлиять на процесс их сплавления по методу СЛС. Определение оптимальных режимов сплавления для указанных выше четырех порошковых композиций проводилось в три этапа: сплавление одиночных треков с изменением режимов сплавления; сплавление одиночных слоев и изготовление тестовых образцов заданной геометрии.

На первом этапе исследования условий сплавления одиночные треки сплавлялись в широком диапазоне изменения параметров: скорость сканирования лазерного луча V изменялась от 125 до 275 мм/с, мощность лазера P — от 20 до 100 Вт при толщине наносимого слоя $h = 200$ мкм. Таким образом, были выбраны 14 режимов для тестирования процесса сплавления. Каждому режиму соответствовала отдельная траектория движения луча лазера по подложке в форме прямоугольника (номера 1–14 на рис. 5).

Характер сплавленных треков анализировался сначала визуально, а затем с помощью оптического микроскопа В-500 ВРН Optika Microscopes. Выбирались режимы сплавления, для которых трек имел равномерную ширину, без признаков разбрызгивания расплавленного порошка и большую концентрацию сплавленного вещества по траектории движения лазерного луча.

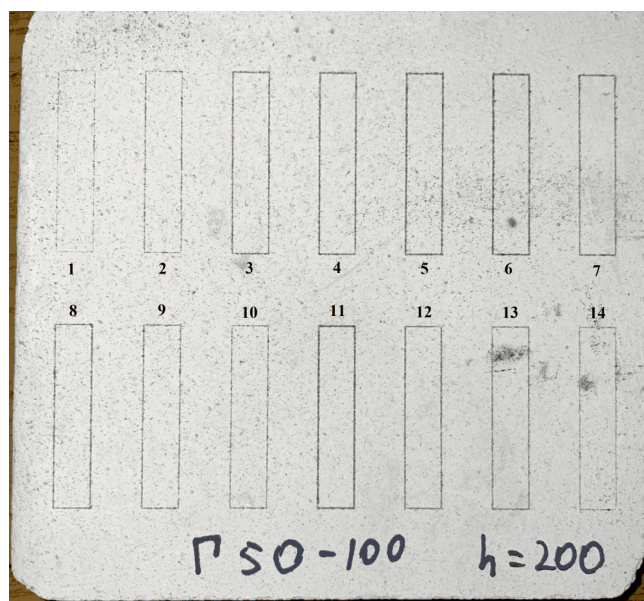


Рис. 5. Траектории движения луча лазера по подложке при разных режимах сплавления (1–14).

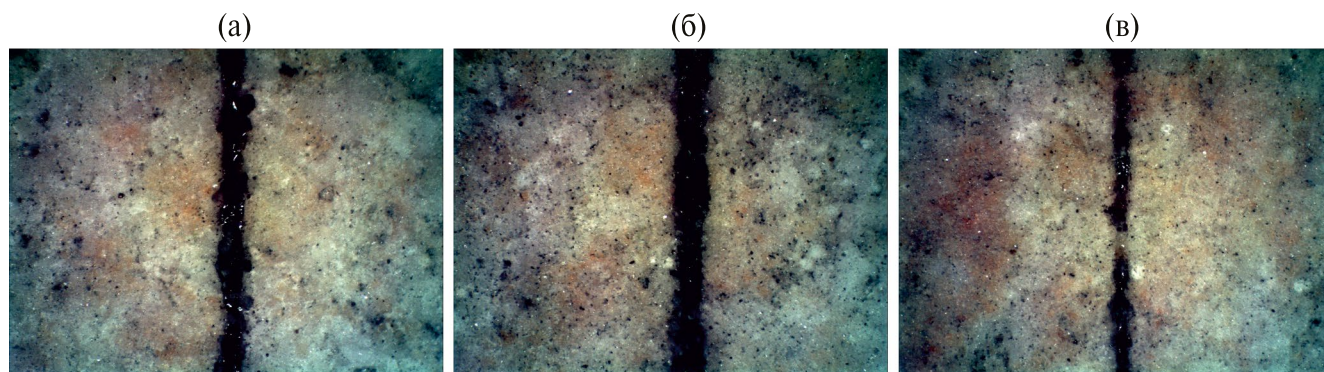


Рис. 6. Треки для порошковой композиции ГД 50-100 для разных режимов сплавления P , V : (а) — 100 Вт, 200 мм/с; (б) — 80 Вт, 175 мм/с; (в) — 50 Вт, 200 мм/с.

На рис. 6 для примера показаны треки для порошковой композиции ГД 50-100 с узким диапазоном фракционности для различных режимов сплавления (P и V): (а) — 100 Вт, 200 мм/с; (б) — 80 Вт, 175 мм/с; (в) — 50 Вт, 200 мм/с, соответственно треки 5, 11 и 9 на рис. 5. В случае (а) наблюдаются признаки разбрызгивания расплавленного вещества вдоль трека. Для случая (б) трек имеет вполне удовлетворительную структуру, для случая (в) мощность лазерного луча недостаточна для формирования качественного сплавления вещества вдоль трека.

Для сравнения на рис. 7 приведен вид треков для ЛДР 0-100 с широким диапазоном фракционности. Эти треки характеризуются большой неравномерностью сплавления частиц порошка (рис. 7а), наличием стеклянных вкраплений и непроплавленных участков (рис. 7б), что, по-видимому, является следствием неравномерного

распределения частиц порошка в порошковом слое.

Таким образом, по результатам изучения отдельных треков можно сделать вывод, что порошковые композиции с узким диапазоном фракционности 50...100 мкм или 100...140 мкм позволяют реализовать оптимальные условия сплавления (параметры V и P), когда отдельные треки имеют практически постоянную ширину и хороший уровень сплавления по глубине (рис. 6). Очевидно, что при задании траектории сканирования лазерного луча при сплавлении тестовых образцов расстояние между соседними треками должно выбираться исходя из значений ширины для отдельных треков. С другой стороны, порошковые композиции с широким диапазоном фракционности имеют неравномерные по ширине треки, что указывает на неоднородность условий сплавления вдоль треков. Это означает,

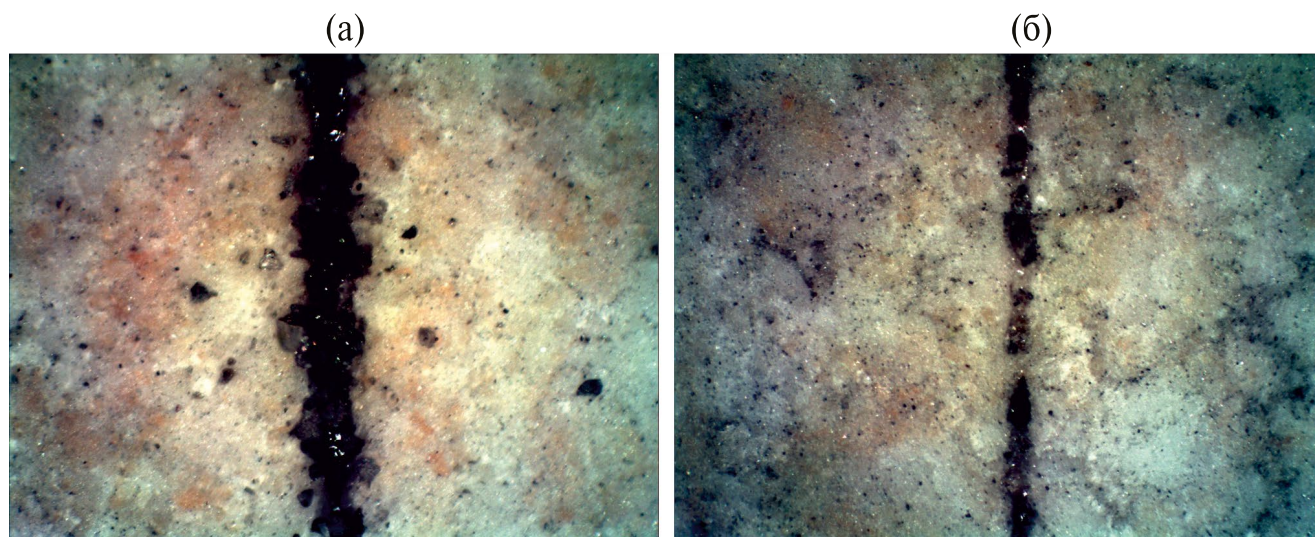


Рис. 7. Треки для порошковой композиции ЛДР 0-100 для разных режимов сплавления P , V : (а) — 80 Вт, 175 мм/с и (б) — 50 Вт, 125 мм/с.

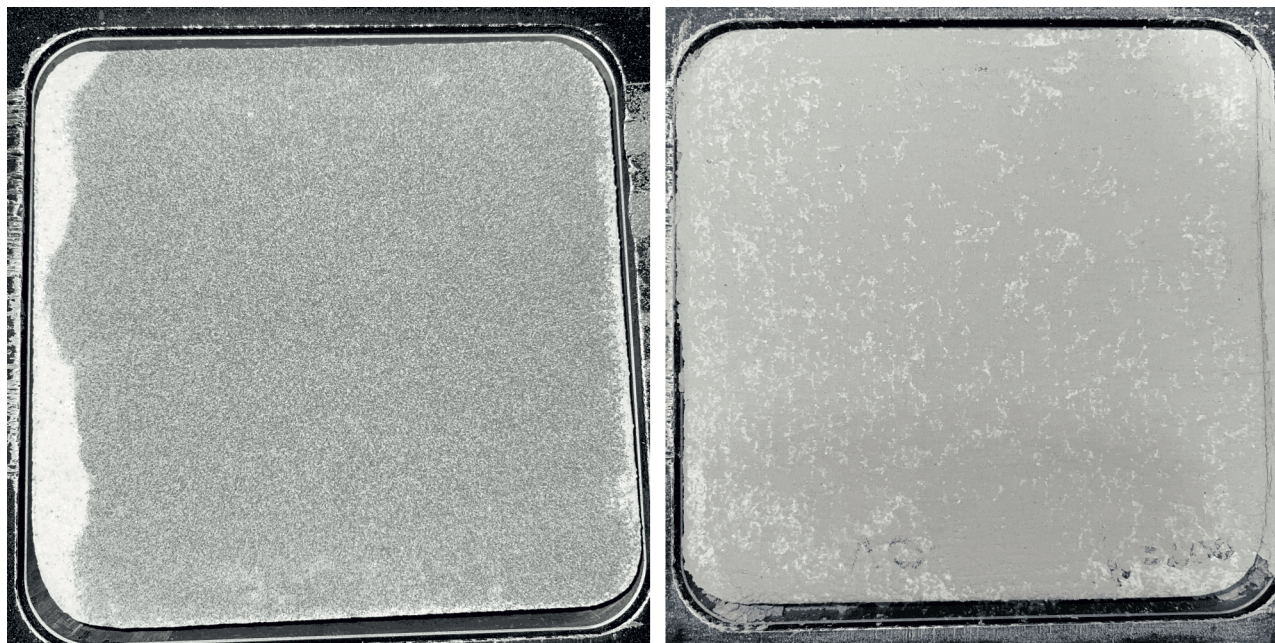


Рис. 8. Слои порошка на платформе построения из ГД 100-140 (слева) и ЛДР 0-100 (справа).

что такие порошковые композиции могут оказаться непригодными для практического применения СЛС технологий с использованием лунного реголита.

На втором этапе тестировались условия сплавления одиночных слоев. В данном случае потребовалось выяснить зависимость качества нанесенных исходных слоев из порошковых композиций для СЛС от их фракционности. На рис. 8 представлены фотографии нанесенных слоев из порошков ГД 100-140 и ЛДР 0-100 на платформе построения. В первом случае образуется ровный и однородный слой (слева), для которого технологии СЛС смогут обеспечить качественный результат сплавления. Напротив, в случае ЛДР с широким диапазоном фракционности при формировании слоя образуется множество «островков», на которых нет порошка, и слой получается не однородный (справа). Очевидно, что при разработке технологий СЛС из лунного реголита вопросы формирования однородных слоев порошка с однородной поверхностной плотностью и толщиной слоев будут иметь важнейшее значение. Учитывая природные свойства реголита с очень широким диапазоном фракционности, для СЛС может потребоваться предварительная переработка сырья для значительного сужения этого диапазона.

Тестирование режимов сплавления одиночных слоев для поиска оптимального рабочего диапазона параметров сплавления проводилось

на девяти режимах (1–9 на рис. 9), на основе матрицы 3 × 3, столбцы которой соответствовали разной скорости сканирования V , а строки — разной мощности лазера P ; для каждой ячейки матрицы соответствующая величина объемной плотности подводимой энергии E определялась как:

$$E = P / VhH, \quad (1)$$

где P — мощность лазера, V — скорость сканирования, h — толщина слоя и H — ширина трека.

При изготовлении тестовых однослойных образцов на различных режимах работы лазера при изменении объемной плотности подводимой энергии были выявлены оптимальные рабочие режимы СЛС в диапазоне 7.7...14.3 Дж/мм³ (при изменении P в пределах 60...80 Вт и V в пределах 125...175 мм/с и значениях $H = 190$ мкм и $h = 230$ мкм), при которых получался качественный однородный слой без шероховатостей / неровностей поверхности и без отрыва слоя от подложки (см. рис. 9). На рис. 9 в верхнем ряду показаны зоны сплавленных одиночных слоев на подложках до удаления остатков порошка после сплавления, в нижнем ряду — после удаления.

Было установлено, что сплавление слоев из порошковых композиций с узким диапазоном фракционности позволяет получить слои с удовлетворительными свойствами поверхности и достаточно однородной толщиной. В тоже время, слои из композиций с широкой фракционностью

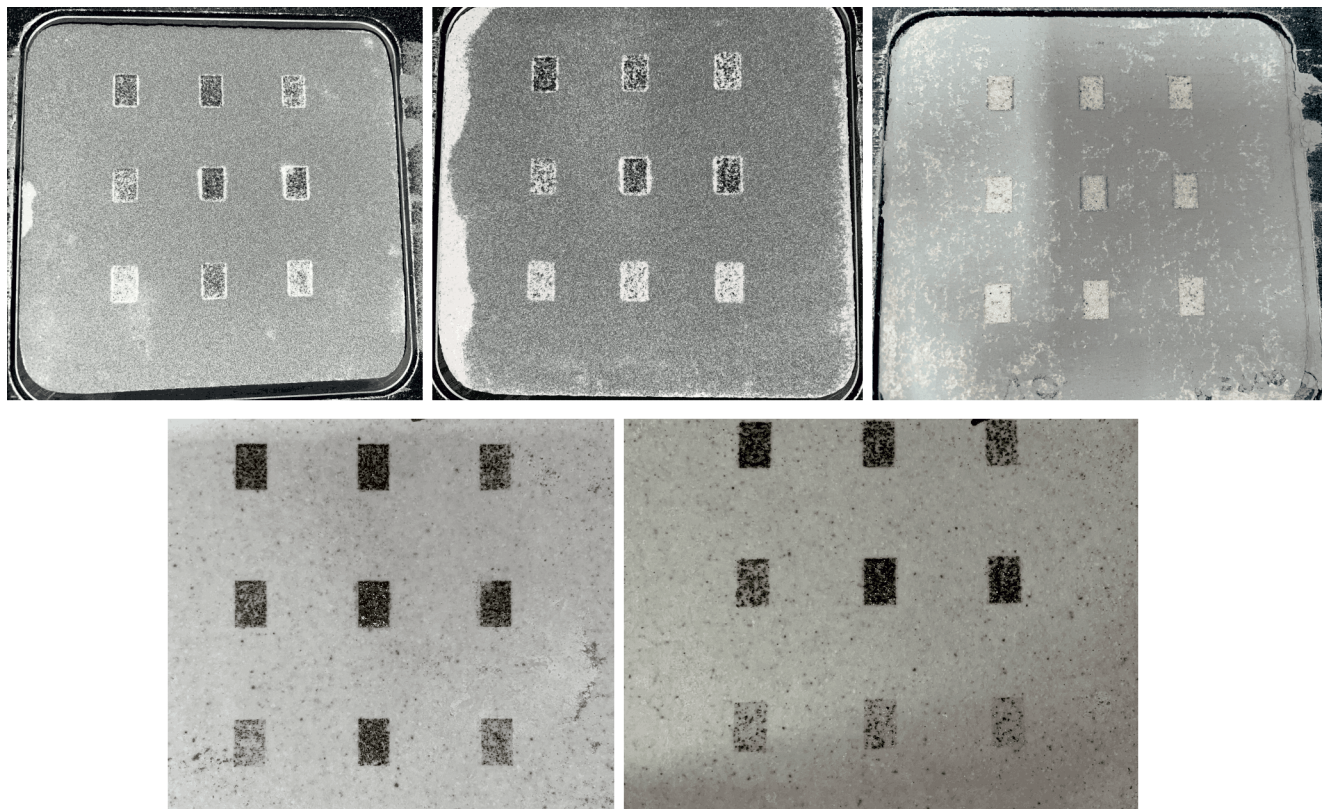


Рис. 9. Верхний ряд: фотографии сплавления однослойных образцов из порошковых композиций ГД 50-100, ГД 100-140, и ЛДР 0-100 (слева направо). Нижний ряд: фотографии однослойных образцов из ГД 50-100, ГД 100-140 после удаления остаточного порошка вне зон сплавления.

имели крупнозернистую неоднородную поверхность и повышенную ломкость при отделении от подложки, после удаления остатков порошка не оставалось качественного слоя.

На третьем этапе исследования условий сплавления было выполнено сплавление многослойных образцов заданной геометрии (длина, ширина, высота): $7.5 \times 5.0 \times 6.0 \text{ мм}^3$ (40 слоев).

Предварительно были проведены пробные сплавления трехмерных образцов с параметрами $V = 175 \text{ мм/с}$ и $P = 80 \text{ Вт}$, что соответствует оптимальным значениям для сплавления одиночных слоев, полученным на предыдущем этапе. Толщина каждого наносимого слоя порошка $h = 150 \text{ мкм}$ была назначена из условия оптимального сплавления одного слоя для порошковой композиции ГД 100-140.

В качестве переменной величины для сплавления пробных образцов было принято расстояние между треками H , которое в первом приближении соответствовало ширине треков. Согласно выражению (1), с изменением величины H изменялась общая величина плотности энергии E , которую приобретало вещество пробного образца

во время сплавления (табл. 5). В качестве величин оценки качества пробных образцов использовались значения пористости и относительной точности соответствия фактической геометрии образца заданным размерам (в процентах).

По результатам предварительного сплавления пробных образцов было установлено, что в зависимости от ширины трека H значительно изменяются как пористость образцов, так и точность соответствия их формы заданной геометрии (см. табл. 5 и рис. 10). Максимальную зависимость от величины плотности энергии показывает высота образца (сокращение до 59 % относительно заданной, см. верхнюю строку табл. 1). Значительное сжатие пробных образцов по высоте, вероятно, связано со сквозным проплавлением соседних слоев при высокой плотности энергии. Следует отметить, что при этом пробные образцы имели достаточно низкую пористость, около 32 %. Это также означает, что доля сплавленного вещества в пробном образце была достаточно высокой.

Однако при малых значениях плотности энергии геометрические параметры пробных образцов удовлетворительно соответствуют заданным

Таблица 5. Характеристики образца, в зависимости от объёмной плотности энергии

| | Расстояние между треками H , мкм | Плотность энергии E , Дж/мм ³ | Характеристики образца | | Точность геометрии, % ¹ | | |
|---|------------------------------------|--|---------------------------------------|---------------|------------------------------------|--------------------|--------------------|
| | | | Объёмная плотность, г/см ³ | Пористость, % | Фактическая длина | Фактическая ширина | Фактическая высота |
| 1 | 110 | 27.72 | 1.760 | 32.0 | 95 | 88 | 59 |
| 2 | 130 | 23.46 | 1.736 | 33.0 | 95 | 92 | 67 |
| 3 | 150 | 20.33 | 1.553 | 40.0 | 95 | 87 | 77 |
| 4 | 170 | 17.94 | 1.530 | 40.9 | 94 | 89 | 77 |
| 5 | 190 | 16.04 | 1.479 | 42.9 | 94 | 93 | 85 |
| 6 | 210 | 14.52 | 1.335 | 48.4 | 94 | 95 | 86 |

¹Точность геометрии образца в процентах по отношению к заданным значениям: длина, ширина, высота соответственно.

значениям, но при этом объем пористости составляет примерно половину геометрического объема (см. строку 6 табл. 5). Можно предположить, что пробные образцы с такой высокой пористостью имеют малую прочность.

Для выяснения свойств вещества пробных образцов была изучена их структура после сплавления с плотностью энергии около значений 17...19 Дж/мм³ (это соответствует строкам 3–5 табл. 5). На рис. 11 приведены микрофотографии отшлифованных поверхностей пробных образцов из ГД 100-140, полученные на электронном микроскопе TESCAN VEGA3-XMU. На изображениях видно, что на поверхности образца имеются множественные поры и микротрещины, а также спеченные шарики диаметром около 5 мкм. Вместе с тем, на масштабах около нескольких десятков микрон вещество имеет достаточно высокую однородность, что позволяет сделать вывод об удовлетворительном качестве пробных образцов, изготовленных в указанных режимах СЛС.

На рис. 10 показан вид образцов, сплавленных с разными значениями плотности энергии: (а) — крайне рыхлый для плотности энергии менее 10 Дж/мм³; (б) — образец с удовлетворительной формой для плотности энергии 10...25 Дж/мм³ и (в) — образец с крайне искаженной геометрией для плотности энергии больше 25 Дж/мм³.

Таким образом, на всех трех этапах предварительных исследований пробных образцов было установлено, что порошковые композиции с узким диапазоном фракционности 50...100 мкм и 100...140 мкм позволяют создавать образцы с вполне хорошими параметрами по пористости и геометрии, в то время как для образцов из порошковых композиций с фракционностью от 0 до 100 мкм пробные образцы с удовлетворительными свойствами получить не удалось (рис. 12). Для применения СЛС технологии для изготовления тестовых образцов из порошковых композиций с узким диапазоном фракционности были выбраны оптимальные режимы сплавления со значениями плотности энергии от 12 до

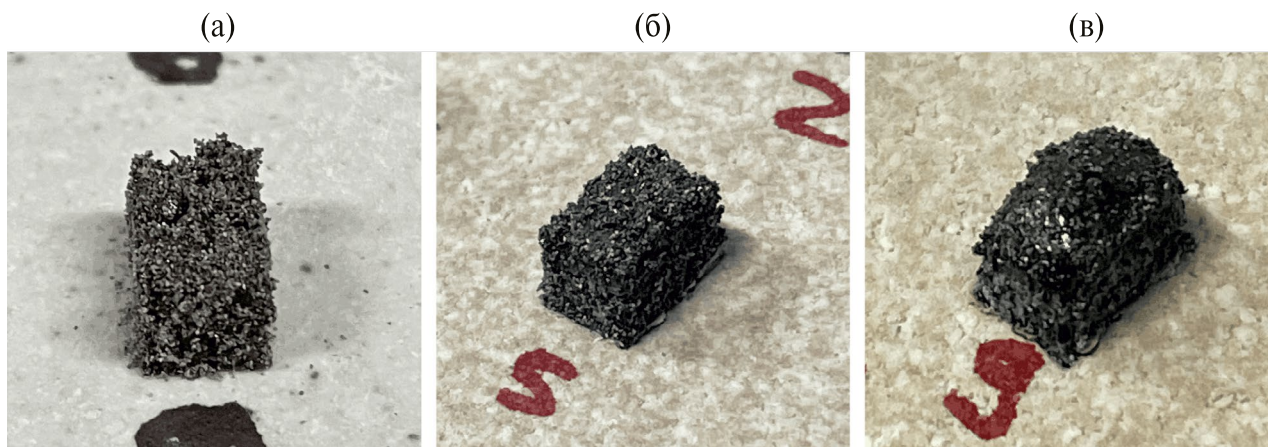


Рис. 10. Образцы, сплавленные при разных значениях объёмной плотности подводимой энергии: (а) — крайне рыхлый, плотность энергии менее 10 Дж/мм³; (б) — с удовлетворительной формой, плотность энергии 10...25 Дж/мм³; (в) — с крайне искаженной геометрией, плотность энергии больше 25 Дж/мм³.

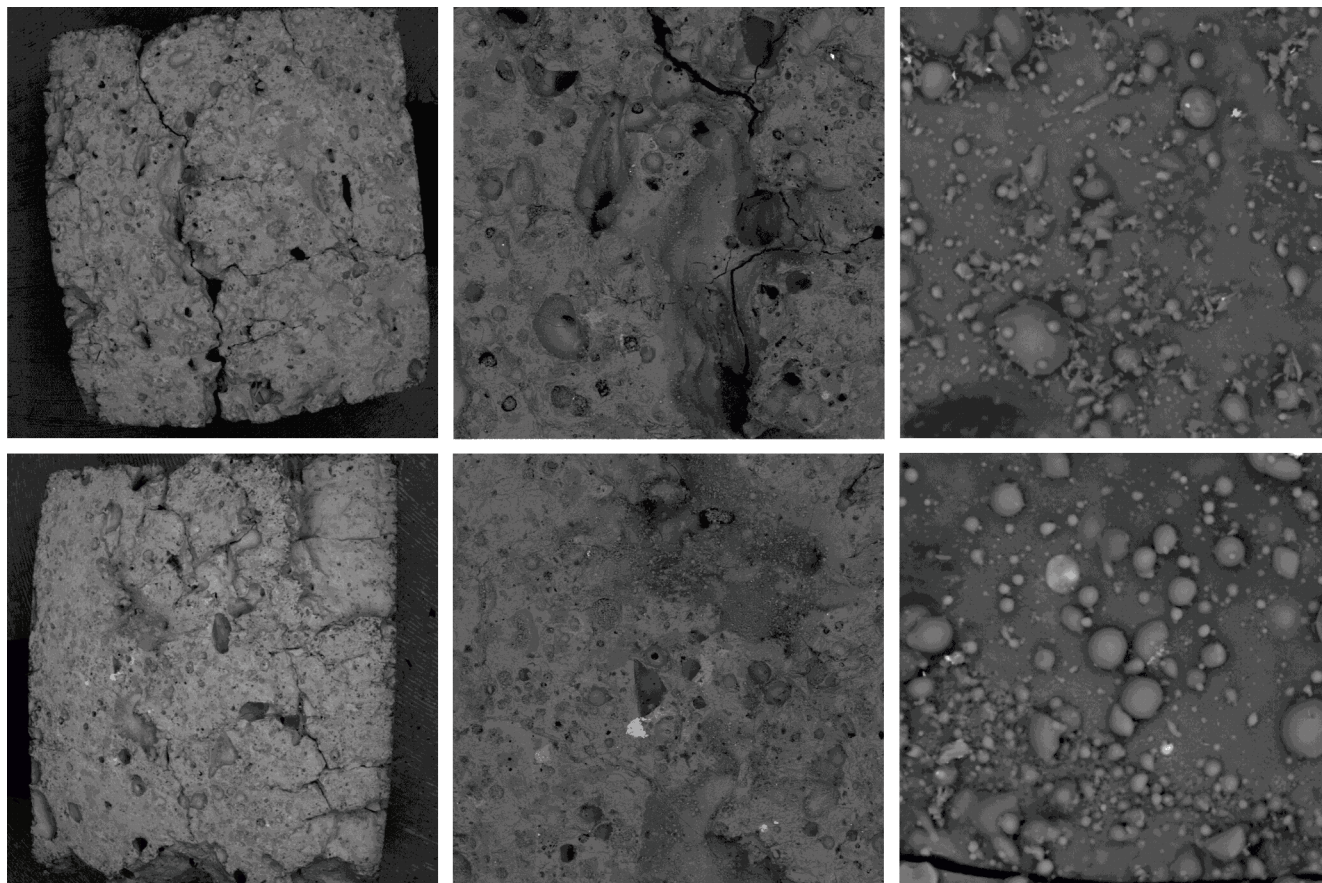


Рис. 11. Микрофотографии поверхности образцов для композиции ГД 100-140 на режимах СЛС с параметрами 60 Вт, 125 мм/с, 16.8 Дж/мм³ (вверху) и 80 Вт, 150 мм/с, 18.7 Дж/мм³ (внизу); увеличение в 35, 100, 2300 раз (слева направо).

22.5 Дж/мм³ (P в пределах 60...80 Вт и V в пределах 125...175 мм/с), а толщина слоев h — 150 мкм. Для композиции ГД 100-140 с учетом приведенных выше результатов предварительного сплавления диапазон режимов был расширен до значений плотности энергии 28 Дж/мм³.

СВОЙСТВА ТЕСТОВЫХ ОБРАЗЦОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ СЛС ДЛЯ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ ИЗ ГАББРО-ДИАБАЗА С УЗКИМИ ДИАПАЗОНАМИ ФРАКЦИОННОСТИ

В качестве основной характеристики тестовых образцов использовался параметр их пористости, который, как известно, в значительной мере определяет прочностные свойства готового изделия. Следует учесть, что для описания процесса СЛС для изготовления деталей на основе АТ необходимо совместно рассматривать четыре параметра с физической размерностью плотности массы. Первый — плотность исходного вещества

частиц порошка. Конкретно для габбро-диабазы эта величина $\rho_{ИВ} \approx 3.1 \text{ г/см}^3$ (см. табл. 3). Естественно предположить, что вещество габбро-диабазы с указанной плотностью заметной пористостью не обладает. Второй важной величиной для СЛС технологии является насыпная массовая плотность порошковой композиции, $\rho_{ПК}$. Как было показано выше эта величина зависит от фракционности частиц данной композиции. Оказалось, что она повышается с уменьшением диапазона фракционности при удалении частиц малых размеров — для порошковых композиций ГД 50-100 и ГД 100-140 она оказалась одинаковой и составляет около 1.4 г/см³, что соответствует параметру пористости порошка около 55 %. Третья величина массовой плотности соответствует геометрической плотности образца после СЛС — эта плотность, ρ_0 , превышает значение для исходного порошка, так как произошло уменьшение занятого порошком объема вследствие сплавления. Наконец, четвертая величина с размерностью массовой плотности соответствует истинной плотности вещества

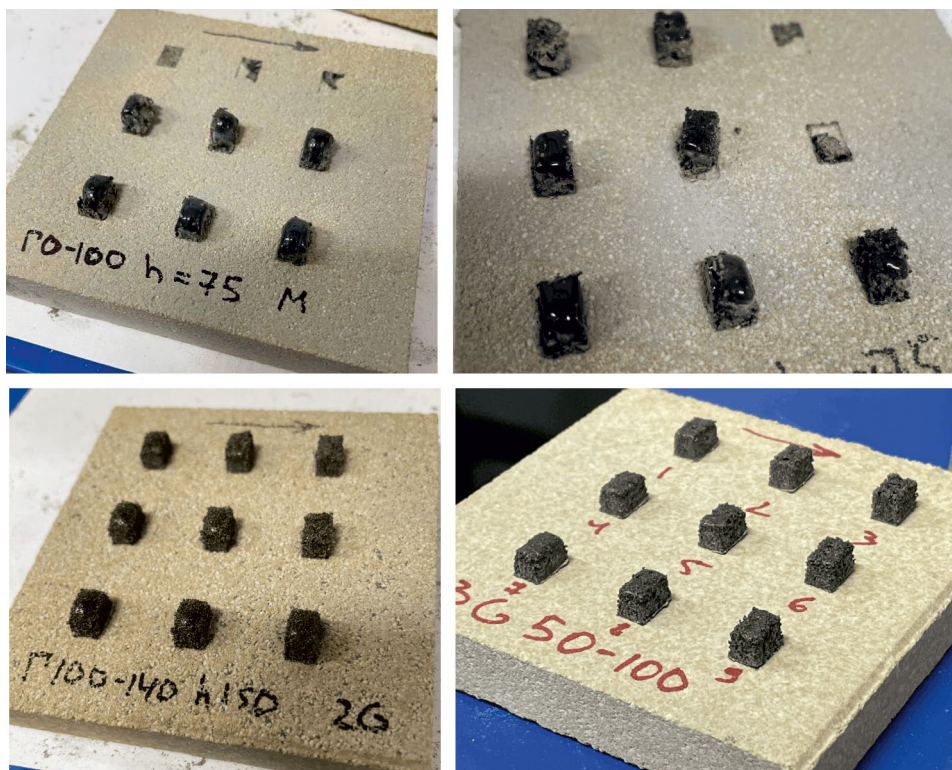


Рис. 12. Пробные сплавленные образцы из четырех композиций на подложках: ГД 0-100 и ЛДР 0-100 (вверху) и ГД 50-100 и ГД 100-140 (внизу).

образца после сплавления, $\rho_{СЛС}$. Величина плотности, $\rho_{СЛС}$, всегда меньше плотности исходного вещества, $\rho_{ИВ}$, так как при сплавлении в веществе неизбежно образуются закрытые поры, которые уменьшают его плотность. Очевидно, что величина $1 - \rho_0/\rho_{СЛС}$, выраженная в процентах, определяет параметр пористости. При этом можно предположить, что именно величина плотности $\rho_{СЛС}$ в конечном итоге определяет прочностные и тепловые свойства образцов, изготовленных по технологии СЛС.

На рис. 13 представлены зависимости пористости экспериментальных образцов от плотности энергии при СЛС. Сплавления на одних и тех же режимах проводились многократно для усреднения данных на основании измерений для нескольких независимо полученных образцов. Погрешности на графиках обусловлены отклонениями результатов отдельных серий от среднего значения. Полученные зависимости по характеру согласуются с результатами статьи [24], где использовался имитатор JSC-1 с фракциями 0...100 мкм, однако достигнутое минимальное значение пористости составило 40 %. Для образцов, полученных в результате настоящего исследования, минимальное значение пористости составило около 30 %. Это означает, что параметры

исходной порошковой композиции и режимов СЛС были выбраны более удачно, что позволило получить образцы с более высокой степенью сплавления.

При этом можно предположить, что полученный уровень сплавления наиболее близок

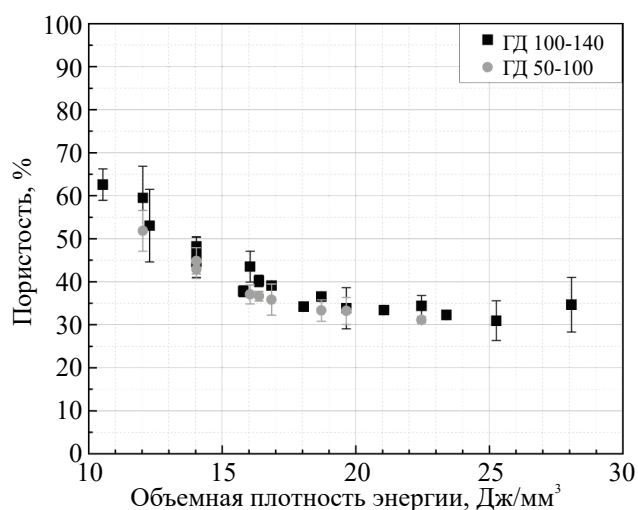


Рис. 13. Зависимость пористости образцов для композиций ГД 50-100 и ГД 100-140 от объемной плотности подводимой энергии E .

к максимальному — величина 3.1 г/см^3 вероятно не может быть достигнута без полного расправления исходной порошковой композиции с утратой заданной геометрической формы.

Была решена задача по поиску наилучшего режима селективного лазерного сплавления, позволяющего проводить многослойное сплавление специально приготовленных порошковых композиций из габбро-диабаз: ГД 50-100 и ГД 100-140 в штатном режиме нанесения слоев на платформу построения.

Было получено 36 образцов для ГД 50-100 и 72 для ГД 100-140. Проведено 15 экспериментов по СЛС в различных режимах для изготовления тестовых образцов из габбро-диабаз, преобразованного в порошковые композиции с узкими диапазонами фракционности ГД 50-100 и ГД 100-140. Использовано 15 кг исходного материала. Суммарное время работы лазерной установки составило 15 ч.

Также были выполнены несколько многослойных сплавлений образцов с меньшей толщиной слоя, с использованием повторного прожига, а также образец со сложной геометрией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы: лунный реголит как порошковый материал для решения задачи изготовления элементов лунной инфраструктуры на месте (In Situ Resource Utilization, ISRU) обладает рядом особенностей по сравнению с земными материалами, которые проявляются при попытке использовать для его обработки готовые технологии.

В настоящей статье это было показано на примере технологии селективного лазерного сплавления. Исходный материал — имитатор реголита должен проходить стадию предварительной подготовки, при этом в качестве имитатора могут выступать измельченные земные породы: габбро-диабаз или лабрадорит. Исследования показали, что для выбранной технологии не имеет значения какой из имитаторов морской или материковый используется, определяющее значение имеют форма частиц и характер распределения их по размерам. Предложенные композиции порошковых материалов с выделенным диапазоном фракций ГД 50-100 и ГД 100-140 показали свое преимущество по сравнению с обычно используемыми имитаторами с диапазоном частиц от 0 до 100 мкм в более технологичном процессе изготовления тестовых образцов и более

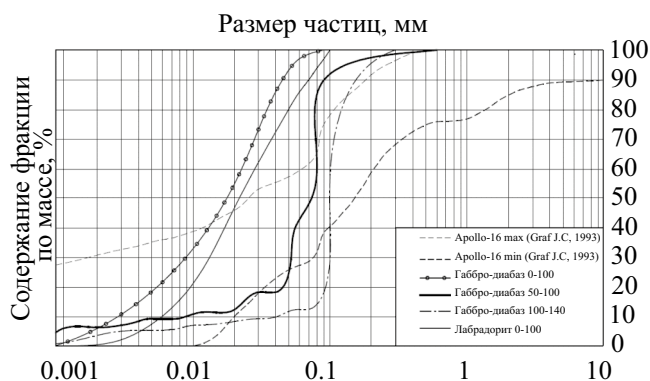


Рис. 14. Интегральные распределения частиц по размерам для порошковых композиций: ГД 0-100, ГД 50-100, ГД 100-140 и ЛДР 0-100 и область распределений частиц для всех образцов реголита с *Apollo-16* (*Apollo-16 max* и *Apollo-16 min*).

широком диапазоне режимов сплавления, при которых получают образцы заданной формы.

При этом следует отметить, что предложенные на основе проведенных экспериментов порошковые композиции незначительно отличаются по своим гранулометрическим характеристикам от реального реголита. На рис. 14 представлено сравнение интегральных гранулометрических распределений для всех образцов реального реголита, доставленных в экспедиции *Apollo-16* [19], и порошковых композиций, изученных в настоящей статье. Распределения для обеих оптимальных для СЛС композиций, ГД 50-100 и ГД 100-140, находятся в пределах кривых максимальных и минимальных границ распределений реального реголита.

Это означает, что для применения технологий СЛС для подхода ISRU может потребоваться предварительная корректировка фракционности лунного реголита с устранением мелких частиц и формированием порошковых композиций с узким диапазоном фракционности. Дальнейшие исследования должны быть направлены на дополнительное изучение и экспериментальное моделирование процесса сплавления такого материала неземного происхождения для подтверждения возможности использования лунного реголита с применением СЛС технологий.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность ЦКП АТОС Университета «ВОЕНМЕХ» за техническую помощь в проведении эксперимента по сплавлению имитаторов лунного реголита на лазерных установках, сотрудникам ЦКП МИСИС

и «МЕХАНОБР» за помощь в подготовке порошковых композиций.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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. DOI: 10.7868/S0044394819010018
2. *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 (6003). P.483–486. <https://doi.org/10.1126/science.1185696>
3. *Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Николаева О.В.* Лунный грунт: свойства и аналоги. М.: [б.и.], 1975.
4. *Taylor L.A., Pieters C. M., Britt D.* Evaluations of Lunar Regolith Simulants // *Planetary and Space Science*. 2016. V. 126. P. 1–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2016.04.005>
5. *Farries K.W., Visintin P., Smith S.T.* Construction of lunar masonry habitats using laser-processed bricks // 71st Int. Astronautical Congress (IAC) – The CyberSpace Edition. 2020.
6. *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. Iss. 1. P. 46–52. DOI: 10.1111/ijac.12326
7. *Caprio L., Demir A.G., Previtali B. et al.* Determining the feasible conditions for processing lunar regolith simulant via laser powder bed fusion // *Additive Manufacturing*. 2020. V. 32. Art.ID. 101029. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.101029>
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 Astronautica*. 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 Astronautica*. 2018. V. 143. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.11.005>
10. *Grugel R.N.* Integrity of sulfur concrete subjected to simulated lunar temperature cycles // *Advances in Space Research*. 2012. V. 50. P. 1294–1299. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2012.06.027>
11. *Simonds C.H.* Sintering and hot pressing of Fra Mauro composition glass and the lithification of lunar breccias // *American J. Science*. 1973. V. 273. P. 428–439. <https://doi.org/10.2475/ajs.273.5.428>
12. *Allen C.C., Morris R.V., McKay D.S.* Oxygen extraction from lunar soils and pyroclastic glass // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 1996. V.101. P.26085–26095. <https://doi.org/10.1029/96JE02726>
13. *Meek T.T., Cocks F.H., Vaniman D.T. et al.* Microwave processing of lunar materials: Potential applications // Lunar and Planetary Institute. 1985.
14. *Maurice S., Wiens R.C., Saccoccio M. et al.* The ChemCam instrument suite on the Mars Science Laboratory (MSL) rover: science objectives and mast unit description // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 170. P. 95–166. DOI: 10.1007/s11214-012-9912-2
15. *Balla V.K., Roberson L.B., O'Connor G.W. et al.* First demonstration on direct laser fabrication of lunar regolith parts // *Rapid Prototyping J.* V. 18. Iss. 6. P. 451–457. <https://doi.org/10.1108/13552541211271992>
16. *Goulas A., Binner J.G.P., Harris R.A. et al.* Assessing extraterrestrial regolith material simulants for in-situ resource utilisation based 3D printing // *Applied Materials Today*. 2017. V. 6. P. 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2016.11.004>
17. *Gerdes N., Fokken L. G., Linke S. et al.* Selective Laser Melting for processing of regolith in support of a lunar base // *J. Laser Applications*. 2018. V. 30. Art. ID. 032018. DOI: 10.2351/1.501857
18. *Томилина Т.М., Ким А.А., Лисов Д.И. и др.* Эксперимент «Лунный-принтер» по лазерному сплавлению лунного реголита в космическом проекте «Луна-грунт» // *Косм. исслед.* 2023. Т. 61. № 4. С. 311–321. DOI: 10.31857/S0023420622600313.
19. *Rose H. J., Baedeker P. A., Berman S. et al.* Chemical composition of rocks and soils returned by the Apollo 15, 16, and 17 missions // *Proc. Lunar Sci. Conf. 6th*. 1975. P. 1363–1373.
20. *Ray C.S., Reis S.T., Sen S. et al.* JSC-1A lunar soil simulant: Characterization, glass formation, and selected glass properties // *J. Non-Crystalline Solids*. 356. 2010. V. 44. P. 2369–2374. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2010.04.049
21. Material Safety Data Sheet NU-LHT-2M. 2008. NU-LHT – NASA. https://ares.jsc.nasa.gov/projects/simulants/_resources/nu-lht-2m_sds.pdf
22. *Родэ О.Д., Иванов А.В., Назаров М. А. и др.* Атлас микрофотографий поверхности частиц лунного реголита. Прага: Академия, 1979. 242 с.
23. *Smelov V.G., Sotov A.V., Agapovichev A.V. et al.* Selective Laser Melting of Metal Powder of Steel 316L // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016. V. 142. Art.ID. 012071. DOI:10.1088/1757-899X/142/1/012071
24. *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. DOI: 10.1177/1464420718777932