

УДК 520.6

## ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ ИЗ ИМИТАТОРА ЛУННОГО РЕГОЛИТА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

© 2024 г. А. А. Ким<sup>1</sup>, А. М. Лысенко<sup>1</sup>, Т. М. Томилина<sup>1, \*</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

\*[tatiana@imash.ac.ru](mailto:tatiana@imash.ac.ru)

Поступила в редакцию 06.12.2023 г.

После доработки 26.02.2024 г.

Принята к публикации 05.03.2024 г.

В статье представлены результаты экспериментального исследования прочностных свойств опытных образцов, полученных методом лазерного сплавления из порошковых композиций имитатора лунного реголита на основе габбро-диабазы. Порошковые композиции с диапазоном фракций 50...10 мкм и 100...140 мкм были подготовлены путем просеивания имитатора с гранулометрическим распределением частиц как у природного реголита. На опытных образцах с характерными размерами 7.5×5×6 мм<sup>3</sup> исследованы их свойства: объемная плотность, твердость и прочность при сжатии на разных режимах сплавления. Получена зависимость этих свойств от объемной плотности подводимой энергии в диапазоне от 12 до 25 Дж/мм<sup>3</sup>. Измеренная твердость по Виккерсу опытных образцов, сплавленных из композиции 50...100 мкм, имела диапазон 691...830 HV, образцы из композиции 100...140 мкм имели более широкий диапазон: 330...830 HV. Максимальные значения прочности на сжатие для образцов из обеих композиций достигали 17...20 МПа при медианных значениях 12 и 17 МПа для первой и второй композиции соответственно. Указанные значения в достаточной степени соответствуют тем, которые могли бы быть получены при переработке лунных ресурсов *in-situ*.

DOI: 10.31857/S0023420624050111, EDN: IGVIDA

### ВВЕДЕНИЕ

Необходимость разработки технологии лунной 3D-печати продиктована тем, что для строительства исследовательской базы на Луне будет необходимо создавать лунную инфраструктуру — конструкции энергетических установок, антенны для космической связи и радиотелескопов, средства размещения научной аппаратуры, модули для служебного и бытового применения и прочее [1]. Доставка элементов таких конструкций с Земли несоизмеримо повысит стоимость и существенно усложнит дальнейшее развитие миссии по освоению Луны. Вопрос об использовании лунных ресурсов *in situ* обсуждается на разных уровнях, и исследования в этом направлении уже имеют свою историю. Появились предложения по созданию строительных материалов по аналогии с земными вариантами и на основе имеющихся технологий. В первых таких предложениях в качестве строительного

материала предполагалось использовать так называемый «лунный бетон», то есть бетонную смесь из двух-трех компонентов, например, на основе алюминатно-кальциевого цемента [2], в пропорциях: реголит — 54.1 %, цемент — 30.9 %, вода — 1 %. При этом предполагалось, что все компоненты можно добыть на Луне, в том числе и воду [3]. Был получен один образец — куб со стороной 25.4 мм (1 дюйм) с компонентом из натурального реголита, доставленного на Землю миссией *Аполлон-16*, и несколько небольших образцов с имитатором. Предел прочности образцов на сжатие составлял около 75 МПа, пористость около 8 %. В аналогичных исследованиях [4, 5] значения предела прочности на сжатие получены 38 и 48 МПа соответственно. Более рациональное предложение было сделано в работе [6], где в качестве связующего материала вместо воды и цемента используется сера (т.н. серный бетон), серу также предполагалось добывать

на месте [7]. При соотношении компонентов: сера — 35 %, имитатор JSC-1 — 65 %, получен образец — куб со стороной 50.8 мм. Строительные элементы из такого материала могут иметь прочность на сжатие 33.8 МПа как у керамического кирпича. Такая технология имеет свои особенности — во время приготовления бетона необходимо поддерживать температуру смеси от 120 до 148° С [8], при этом, как отмечено в статье [9], после 50 термических циклов с изменением температуры в 50° С, прочность строительного элемента из серного бетона падает почти в 6 раз (с 47 до 8 МПа). «Безводный» бетон можно получить, если в качестве связующего материала использовать полимеры, когда к реголиту добавляется измельченный полимерный порошок, смесь нагревается и выдавливается в форму. В работе [10] таким образом получен куб со стороной 50 мм из «базальта 3-го поколения «HLS-1», с пределом прочности на сжатие 10.3 МПа, что вполне приемлемо для условий Луны, но в этом случае необходимые полимеры надо доставлять с Земли, причем такие полимеры должны хорошо работать в условиях вакуума и экстремальных температур.

Одним из интересных способов получения строительного элемента (СЭ) из лунного реголита является метод, основанный на самоподдерживающейся термитной реакции, в которой химическое соединение чистого алюминия с оксидом металла происходит с выделением тепла, достаточного для спекания лунного реголита. В работе [11] для запуска этой реакции использовали металлический проводник, который под действием тока нагревался до высокой температуры. В состав исходного материала входили: имитатор JSC-1A — 80.56 % и алюминий — 19.44 %, получены образцы цилиндрической формы с размерами по диаметру 2.5 см, по высоте до 7.5 см. Созданный СЭ имел прочность на сжатие 18 МПа. Существенный недостаток такого метода — получение чистого алюминия на Луне или его доставка с Земли.

Представленные выше методы для создания СЭ требуют добавления в реголит дополнительного материала, что сильно усложняет их реализацию непосредственно на Луне, поэтому наряду с развитием этих методов появились предложения создавать СЭ из чистого реголита без добавок, например, в формовочных печах, путем непосредственного нагрева реголита до температуры несколько ниже температуры плавления. В таких условиях реголит спекается и образуется твердый образец с цельной

формой, практически без внутренних пор и с высоким значением предела прочности на сжатие. Например, в исследованиях [12, 13] из имитаторов реголита JSC-1 и JSC-1A были получены небольшие цилиндрические образцы диаметром 12 мм и высотой 7...20 мм, с пределом прочности на сжатие 219 и 230 МПа — одним из самых высоких на сегодняшний день для СЭ из лунного реголита. Однако высокое энергопотребление — 2 кВт по сравнению с 0.2 кВт для лазера, и необходимость изготавливать индивидуальную форму для разных СЭ могут служить препятствием для развития этого метода применительно к лунным условиям.

В качестве решения проблемы добавок, предлагается создавать СЭ из лунного реголита с помощью аддитивных технологий непосредственно на поверхности Луны, и затем собирать из них необходимые конструкции и сооружения.

На сегодняшний день эти земные технологии включают перечень уже достаточно хорошо развитых методов для изготовления деталей сложной формы. Для создания СЭ из реголита на Луне на данном этапе наиболее реализуемым представляется метод Селективного лазерного сплавления (СЛС), в котором сплавление исходного порошкового вещества происходит под действием лазерного излучения, и изделие формируется послойно на платформе построения по заданной программе. В промышленности в качестве исходного материала для СЛС используются специально приготовленные металлические порошки, имеющие однородный (или специально подобранный) химический состав, почти идеальную сферическую форму и гранулометрический состав с узким диапазоном распределения частиц. Однако лунный реголит как природный материал космического происхождения, сильно отличается по своим химическим, физико-механическим характеристикам от таких порошков.

Для реализации метода СЛС применительно к лунному грунту следует выяснить требования к подготовке исходного порошка с оптимальными свойствами не только по химическому, но и по гранулометрическому составу. Этот вопрос пока не изучен. Как правило, для экспериментов используются композиции из коммерчески доступного имитатора реголита JSC-1, разработанного в США, с диапазоном размеров частиц 0...100 мкм (частицы с размерами больше, чем 100...200 мкм удаляются путем просеивания). Но при таком широком диапазоне, сплавление порошка в слое происходит неравномерно, и, как было отмечено в работе авторов [14], наличие

мелких фракций также не позволяет нанести качественные слои — проявляется свойство «нетекучести» порошка.

В настоящее время не существует универсальной аддитивной технологии СЛС, которая эффективно могла бы сплавлять различные материалы. Например, при сплавлении керамических порошков обычно используют волоконный лазер с длиной волны 10.6 мкм, а для сплавления металлических порошков — 1.06 мкм. Применяются некоторые общие рекомендации: для того чтобы материал мог быть использован в технологическом процессе, он должен быть в виде порошка, желательно сферической формы, которая гарантирует высокую сыпучесть и плотность упаковки / слоя, и, как следствие, быстрое и воспроизводимое распределение слоев. Для оптимизации сыпучести рекомендуется узкое распределение зерен / частиц по размерам с низким процентом мелких частиц: 15...45 мкм или 20...63 мкм, а параметры процесса сплавления подбираются для каждого материала отдельно.

Также недостаточно изучен вопрос о том, какими свойствами должны обладать СЭ из лунного вещества для сборки лунных конструкций, насколько эти свойства зависят от свойств исходного порошка из лунного реголита и от выбора конкретных режимов сплавления.

Для подтверждения пригодности лунного реголита для практического применения для подхода *in situ resources utilization (ISRU)*, необходимо определить фактические физико-механические параметры СЭ, которые могут быть изготовлены на Луне с применением СЛС-технологии.

В настоящей статье представлены результаты лабораторных исследований прочностных характеристик тестовых образцов, созданных из имитатора лунного реголита на основе измельченной каменной крошки земной породы габбро-диабаз с различными гранулометрическими параметрами. Были измерены значения объемных и истинных плотностей тестовых образцов из порошков с разными гранулометрическими параметрами в зависимости от мощности лазера и режима сканирования, а также пределы прочности на сжатие тестовых образцов в зависимости от параметров сплавления. Представлены предварительные оценки возможности использования СЭ из лунного реголита с такими свойствами для строительства на Луне.

В предыдущих работах авторов [14, 15] было показано, что имитатор является адекватным аналогом вещества лунного реголита для

решаемой задачи, и его можно использовать для приготовления имитаторов лунного грунта как морского, так и материкового типа [15, 16]. Также были определены требования к гранулометрическим характеристикам порошков из габбро-диабаз для обеспечения удовлетворительных результатов сплавления при использовании СЛС-установки Concept Laser Mlab Cusing (GE Additive company) с волоконным лазером Yb:YAG с максимальным значением мощности  $P = 100$  Вт и скорости сканирования,  $V$ , до 325 мм/с.

## 1. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ, СПЛАВЛЕННЫХ ИЗ ВЕЩЕСТВА-ИМИТАТОРА ЛУННОГО РЕГОЛИТА

Для лабораторных исследований сплавленных тестовых образцов в качестве исходного вещества для имитатора лунного реголита был выбран габбро-диабаз (ГД). Ранее было показано (см. [14]), что измельченная и просеянная каменная крошка из ГД в достаточной степени воспроизводит состав и термо-механические свойства природного реголита. Было установлено, что условия сплавления для порошка-имитатора хорошо выполняются для композиций с диапазоном частиц 50...100 мкм (ГД 50-100) и 100...140 мкм (ГД 100-140) и с распределением частиц по размеру, как у природного реголита, поэтому исходный порошок для настоящего исследования был приготовлен в соответствии с процедурой, предложенной в работе [16].

Проведенные ранее лабораторные исследования показали [16], что достаточно качественные образцы для последующих исследований можно изготовить на СЛС-установке Concept Laser Mlab Cusing на режимах, параметры которых ( $P$ ,  $V$ ) изменялись в следующих диапазонах: мощность лазера  $P = 60...90$  Вт и скорость сканирования  $V = 125...200$  мм/с при постоянной толщине наносимого слоя  $h = 150$  мкм и шаге сканирования  $H = 190$  мкм. При этом соответствующие значения объемной плотности подводимой энергии  $E$ , которые рассчитывались как отношение  $P / VhH$ , принимали значения от 10.5 до 28 Дж/мм<sup>3</sup>.

Для выполнения лабораторных исследований было изготовлено 36 тестовых образцов из ГД 50-100 и 72 тестовых образца из ГД 100-140 с характерными размерами (длина, ширина, высота):  $7.5 \times 5 \times 6$  мм<sup>3</sup>. Ниже приведены результаты их лабораторных испытаний.

## 2. ЗАВИСИМОСТЬ ПЛОТНОСТИ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ОТ УСЛОВИЙ СПЛАВЛЕНИЯ

Для изучения зависимости параметров плотности сплавленных образцов от подводимой энергии сплавления были проведены измерения для двух видов плотности: для объемной плотности образца и для истинной плотности вещества, из которого состоит образец. Объемная плотность оценивалась на основе прямых измерений линейных размеров образцов, погрешность составляла 3...8 %, в предельных случаях до 14 %. Истинная плотность вещества измерялась методом гидростатического взвешивания, для которого погрешность составляет также 3...8 %, в предельных случаях до 1 %, и пикнометром с погрешностью до 2 %.

Тестовые образцы из порошковой композиции ГД 50-100 были изготовлены на девяти режимах сплавления с параметрами ( $P$ ,  $V$ ) на основе матрицы 3×3, столбцы которой соответствовали разной скорости сканирования  $V$ , а строки — разной мощности лазера  $P$ , каждой ячейке матрицы соответствовала расчетная величина объемной плотности подводимой энергии  $E$ ; в табл. 1 приведены параметры режимов ( $P$ ,  $V$ ) в порядке возрастания значений  $E$ .

Полученные тестовые образцы на подложке для одного сеанса сплавления представлены на рис. 1. Для каждого режима было выполнено четыре сплавления — таким образом, для каждого значения плотности энергии было изготовлено четыре образца.

На рис. 2 и 3 приведена зависимость объемной и истинной плотности, а также отношение между ними для образцов, изготовленных из порошковой композиции ГД 50-100 в диапазоне изменения плотности энергии сплавления от 12 до 22.5 Дж/мм<sup>3</sup>. Для каждой точки было изготовлено по четыре образца, для которых полученные значения хорошо согласуются между собой — разброс составляет не более 12 % (в основном, 0...6 %). Представленные на рисунках

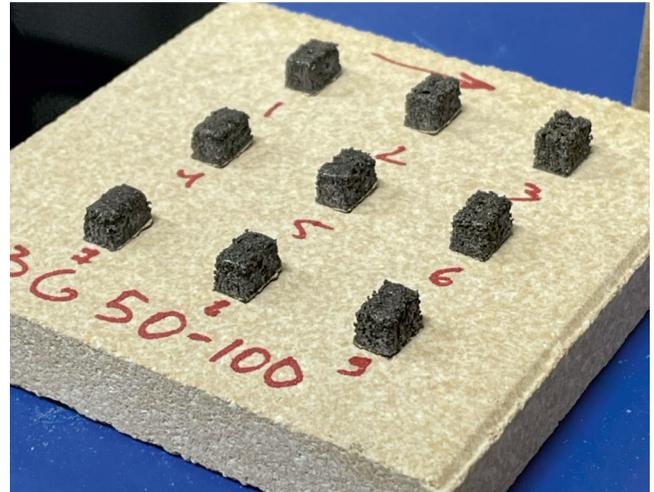


Рис. 1. Тестовые образцы из композиции ГД 50-100 на подложке, сплавленные на режимах 1–9 с заданными параметрами  $P$  и  $V$  (табл. 1); размеры образцов: 7.5×5×6 мм<sup>3</sup>.

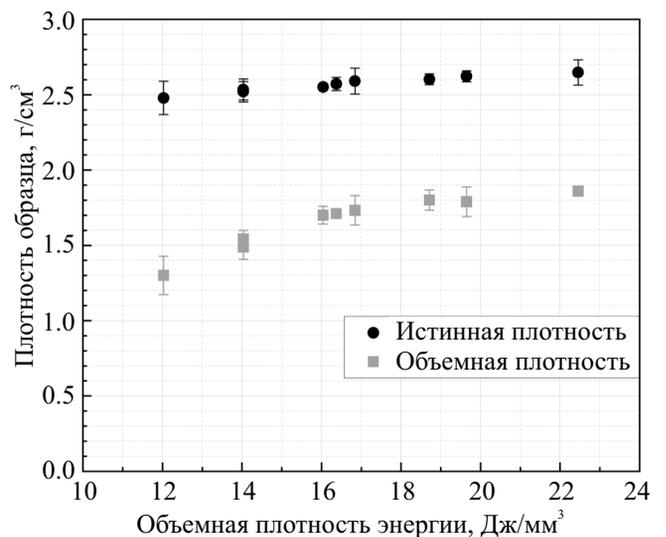
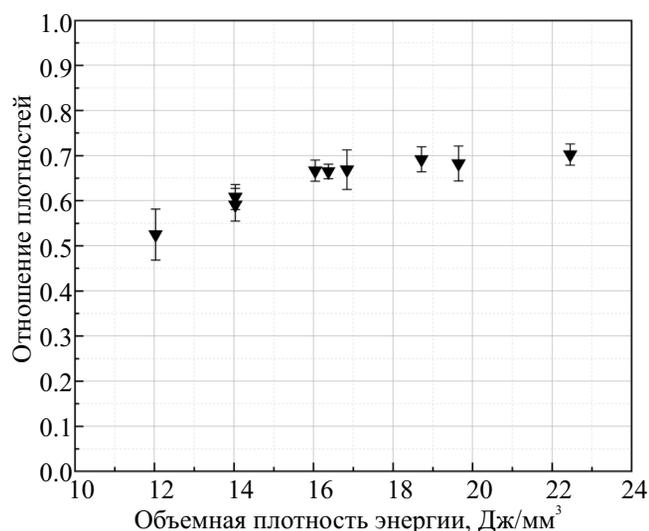


Рис. 2. Зависимость истинной и объёмной плотности образцов от объёмной плотности подводимой энергии для композиции из ГД 50-100.

Таблица 1. Режимы сплавления тестовых образцов из ГД 50-100

Параметры	Режимы								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Мощность $P$ , Вт	60	60	70	80	70	60	80	70	80
Скорость $V$ , мм/с	175	150	175	175	150	125	150	125	125
Плотность энергии $E$ , Дж/мм <sup>3</sup>	12.0	14.0	14.0	16.0	16.4	16.8	18.7	19.6	22.5



**Рис. 3.** Зависимость отношения объемной плотности к истинной плотности образцов от объемной плотности подводимой энергии для композиции ГД 50-100.

погрешности соответствуют точности измерений и стандартному отклонению, полученным для разных образцов.

Наблюдается рост плотности образцов с возрастанием плотности подводимой энергии. Объемная плотность образцов увеличивается примерно в 1.5 раза от 1.3 до 1.8 г/см<sup>3</sup> при возрастании плотности энергии также примерно в 1.5 раза от 12 до 19 Дж/мм<sup>3</sup> (рис. 2). Вероятно, эффект возрастания объемной плотности связан с уменьшением удельного объема полостей между отдельными частицами при более интенсивном сплавлении внешних слоев.

Также наблюдается слабое увеличение истинной плотности вещества тестовых образцов. При возрастании плотности энергии облучения с 12 до 22 Дж/мм<sup>3</sup> величина истинной плотности увеличивается с 2.5 до 2.6 г/см<sup>3</sup>, то есть примерно на 5 %.

Очевидно, что отношение объемной и истинной плотности образцов испытывает рост при росте плотности энергии от 12 до 19 Дж/мм<sup>3</sup> главным образом вследствие возрастания объемной плотности (рис. 2 и 3). В интервале значений плотности энергии выше 19 Дж/мм<sup>3</sup> отношение плотностей остается постоянным на уровне около 0.7.

Тестовые образцы из порошковой композиции ГД 100-140 были изготовлены на 18 режимах сплавления. Область рабочих режимов ( $P, V$ ) была расширена (на основе матрицы 4×4 плюс два режима) для уточнения характера зависимости плотности образцов от величины подводимой энергии сплавления, которая была получена для композиции ГД 50-100. Параметры режимов сплавления ( $P, V$ ) в порядке возрастания значений  $E$  приведены в табл. 2; в таблице имеются одинаковые значения энергии  $E$ , соответствующие разным режимам сплавления.

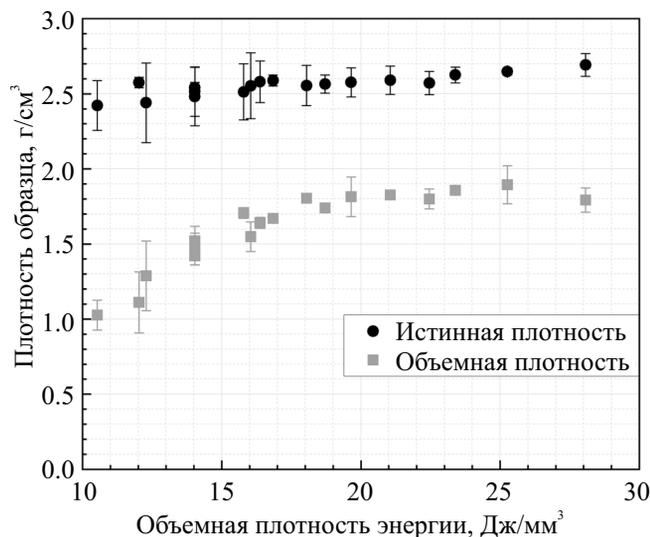
Для каждого режима ( $P, V$ ) также было выполнено четыре сплавления, и для каждого значения плотности энергии было получено четыре образца.

На рис. 4 и 5 приведены зависимости объемной и истинной плотности образцов, изготовленных из указанной композиции. Видно, что результаты для зависимости объемной и истинной плотностей от плотности энергии для двух порошковых композиций качественно хорошо совпадают. Для высоких значений плотности энергии >20 Дж/мм<sup>3</sup> тестовые образцы из композиций ГД 50-100 и ГД 100-140 имеют примерно одинаковую объемную плотность около 1.8...1.9 г/см<sup>3</sup> и истинную плотность около 2.7 г/см<sup>3</sup>.

Сходство зависимости плотностей тестовых образцов из ГД 50-100 и ГД 100-140 от объемной плотности энергии хорошо иллюстрируется графиками зависимости параметра пористости тестовых образцов от плотности энергии (рис. 6).

**Таблица 2.** Режимы сплавления тестовых образцов из ГД 100-140

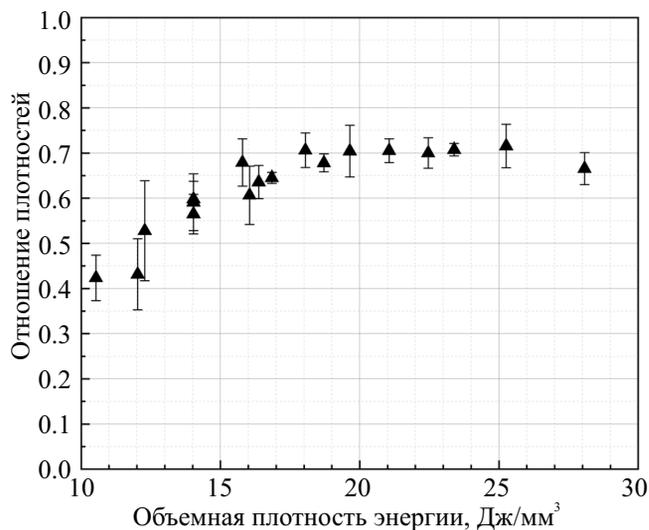
Параметры	Режимы																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Мощность $P$ , Вт	60	60	70	60	70	80	90	80	70	60	90	80	70	90	80	100	90	100
Скорость $V$ , мм/с	200	175	200	150	175	200	200	175	150	125	175	150	125	150	125	150	125	125
Плотность энергии, Дж/мм <sup>3</sup>	10.5	12.0	12.3	14.0	14.0	14.0	15.8	16.0	16.4	16.8	18.0	18.7	19.6	21.1	22.5	23.4	25.3	28.1



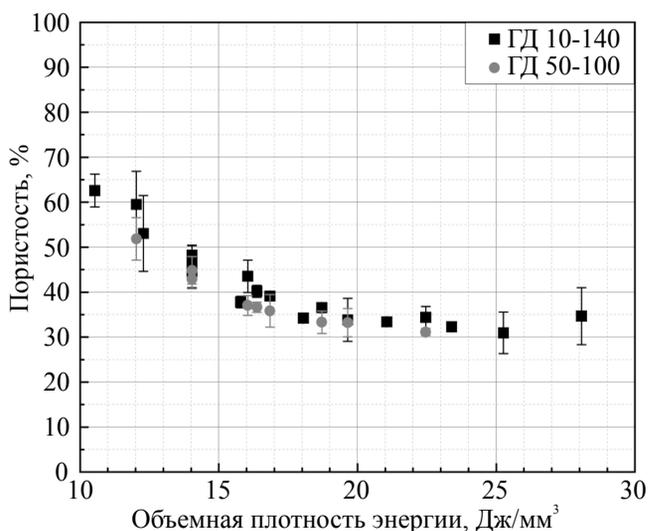
**Рис. 4.** Зависимость истинной и объёмной плотности образцов от объёмной плотности подводимой энергии для порошковой композиции ГД 100-140.

Одинаковое значение истинной плотности тестовых образцов, около  $2.7 \text{ г/см}^3$  при подводимой энергии  $>17 \text{ Дж/мм}^3$ , для разных порошковых композиций (см. рис. 2 и 4), по всей видимости, связано с формированием в тестовом образце структуры из сплавленного вещества, которая определяется не только мощностью лазерного луча, но также шагом сканирования. Известно, что истинная плотность вещества габбро-диабазы составляет  $3.07 \text{ г/см}^3$ . Отношение истинной плотности тестовых образцов,  $2.7 \text{ г/см}^3$ , к указанной плотности равно 0.87. Вероятно, именно этот параметр остаточной пористости отличает структуру вещества в тестовых сплавленных образцах от исходного вещества габбро-диабазы.

Очевидно, что остаточная пористость вещества образцов при высокой энергии сплавления может быть связана с дискретным характером лазерного облучения слоя исходного порошка в виде отдельных треков. Расстояние между отдельными треками равно шагу сканирования лазера. Вещество вдоль треков состоит из сплавленных частиц, для которых при оптимальном режиме сплавления свободное пространство между частицами может быть близко к нулю, в то время как между треками нагревание происходит только вследствие теплопереноса и сплавление носит частичный характер, поэтому средняя пористость для всего объема сплавленного образца остается отличной от нуля.



**Рис. 5.** Зависимость отношения объёмной плотности к истинной плотности образцов от объёмной плотности подводимой энергии, напечатанных из порошковой композиции ГД 100-140.



**Рис. 6.** Зависимость пористости тестовых образцов от плотности подводимой энергии для порошковых композиций ГД 50-100 и ГД 100-140.

### 3. ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЧНОСТИ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ ОТ УСЛОВИЙ СПЛАВЛЕНИЯ

При изучении плотности тестовых образцов было установлено, что образцы, изготовленные на разных режимах сплавления, имеют практически совпадающие свойства. Для изучения прочности были изготовлены 18 сплавленных тестовых образцов, по 9 экземпляров из каждой фракционной композиции ГД 50-100 и ГД 100-140, и проведены стандартные измерения



**Рис. 7.** Вид образца, установленного между сжимающими плитами испытательной установки.

предела прочности на сжатие. Сплавление образцов производилось на режимах ( $P$ ,  $V$ ), при которых плотность подводимой энергии менялась в пределах от 12 до 19 Дж/мм<sup>3</sup> (при постоянной толщине слоя 150 мкм и шаге сканирования 190 мкм). Этим параметрам соответствует диапазон изменения пористости образцов от 60 % — при низкой энергии, до 35 % — при высокой (см. рис. 6).

Исследования механической прочности проводились на основе стандарта ГОСТ Р 57606-2017 «Композиты керамические. Метод испытания на сжатие при нормальной температуре» на универсальной электромеханической испытательной машине фирмы «Инстрон» модель 1115 со сменным динамометром с предельной нагрузкой 5 кН. Пример установки образца в измерительном приборе представлен на рис. 7.

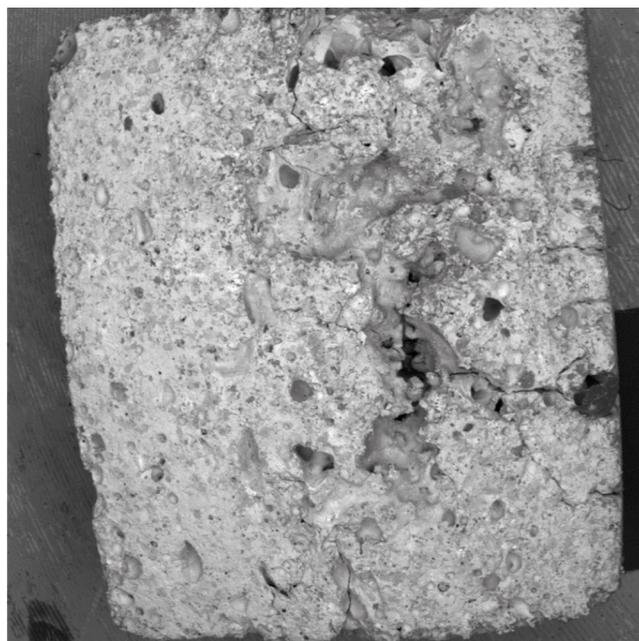
Измерение геометрических размеров деформации образцов при нагружении проводилось цифровым микрометром с ценой шкалы измерения 1 мкм. Расчет продольной деформации образцов был выполнен по времени с учетом скорости перемещения подвижного захвата

испытательной машины и её жесткости с нагружающей оснасткой. Полученная жесткостная диаграмма вычиталась из всех диаграмм испытания образцов.

Перед испытаниями тестовые образцы подвергались механической обработке для придания им формы параллелепипеда. Все образцы имели небольшие сколы и неровности боковых поверхностей, влияние которых на качество проводимых экспериментов было оценено как незначительное. На рис. 8 показана микроструктура поверхности одного из образцов. Также для всех исследуемых образцов были измерены значения поверхностной твердости по методу Виккерса. Полученные значения для экземпляров из композиции ГД 50-100 имеют диапазон 691...830 HV, у образцов из композиции ГД 100-140 отмечен более широкий диапазон: 330...830 HV.

Оценка прочности проводилась по признаку разрушения образца с параллельным измерением величины деформации. Пример деформационной кривой, полученной в рамках испытаний одного из образцов, представлен на рис. 9.

Результаты измерений значений прочности (в мегапаскалях) в зависимости от плотности энергии сплавления для тестовых образцов из порошковых композиций ГД 50-100 и ГД 100-140 представлены раздельно в табл. 3 и на рис. 10



**Рис. 8.** Микроструктура поверхности тестового образца из порошковой композиции ГД 100-140. Фотография получена с электронного сканирующего микроскопа TESCAN VEGA 3 XMU.

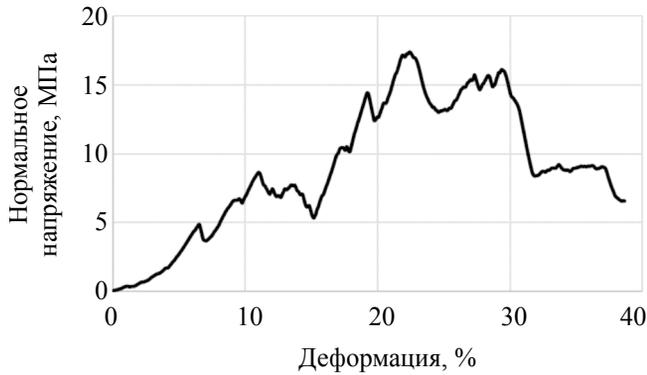


Рис. 9. Пример деформационной кривой: нормальное напряжение на сжатие образца в зависимости от деформации.

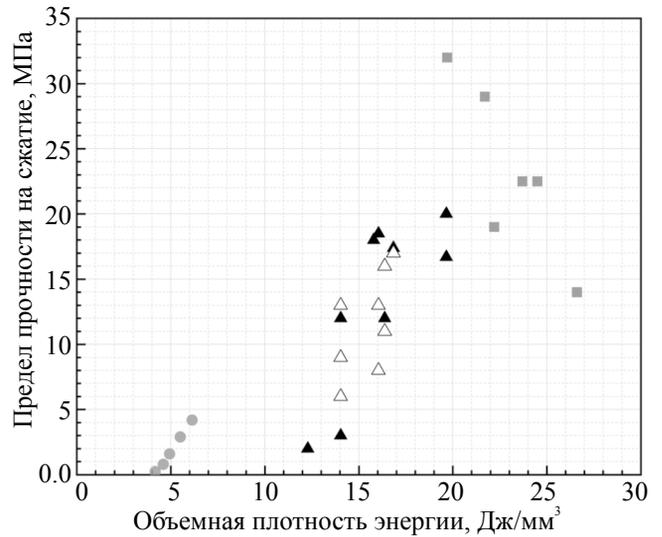


Рис. 10. Зависимость предела прочности на сжатие сплавленных образцов от объёмной плотности энергии: белый треугольник — ГД 50-100; чёрный треугольник — ГД 100-140; серый круг и серый квадрат — данные, приведенные в работах [17] и [18] соответственно.

(обозначены треугольниками). В табл. 3 порядок расположения результатов измерений соответствует увеличению объемной плотности энергии сплавления.

Для ГД 50-100 максимальный предел прочности, равный около 17.0 МПа, и модуль Юнга, около 1020 МПа, достигаются при следующих параметрах сплавления:  $P = 60$  Вт;  $V = 125$  мм/с; толщина слоя  $h = 150$  мкм; шаг сканирования  $H = 190$  мкм. При этом величина деформации составляет 5.21 %.

Для ГД 100-140 максимальный предел прочности, равный 17...20.0 МПа, и модуль Юнга,

~900...1500 МПа, достигаются при аналогичных параметрах сплавления:  $P = 70$  Вт;  $V = 125$  мм/с; толщина слоя  $h = 150$  мкм; шаг сканирования  $H = 190$  мкм. При этом величина деформации составляет 2.85 %.

Таблица 3. Результаты измерений значений предела прочности на сжатие образцов

№ п/п	Мощность $P$ , Вт	Скорость $V$ , мм/с	Плотность энергии $E$ , Дж/мм <sup>3</sup>	Предел прочности, МПа *	Модуль Юнга, МПа *
ГД 50-100					
1	60	150	14.0	13	482
2	70	175	14.0	9; 6	410; 471
3	80	175	16.0	8; 13	430; 977
4	70	150	16.4	16; 11	397; 546
5	60	125	16.8	17	1026
ГД 100-140					
6	70	200	12.3	2	199
7	80	200	14.0	3	151
8	70	175	14.0	12	617
9	90	200	15.8	18	609
10	80	175	16.0	19	1559
11	70	150	16.4	12	623
12	60	125	16.8	17	1410
13	70	125	19.6	17; 20	1373; 941

\* Два значения в одной ячейке таблицы означают, что на этом режиме были сплавлены и исследованы два образца.

Для сравнения на рис. 10 показаны экспериментальные оценки прочности для опытных образцов, приведенные в работах [17, 18]. Можно говорить о том, что полученные результаты измерений предела прочности сплавленных образцов имеют корреляцию с результатами работы [17] — с ростом подводимой энергии сплавления предел прочности возрастает. Данные исследования [18] не позволяют сделать аналогичный вывод в рассмотренном диапазоне высоких значений энергии 20...26 Дж/мм<sup>3</sup>, предел прочности с увеличением энергии имеет тенденцию к уменьшению. Можно предположить, что причина состоит в характере разрушения образцов в процессе механических испытаний — наиболее вероятно, что на таких высоких для реголита энергиях (выше оптимальных) происходило хрупкое разрушение сплавленных образцов, при котором предел прочности образцов может быть неустойчив.

Следует отметить, что в работе [17] рассмотрена узкая область низких энергий (4...6 Дж/мм<sup>3</sup>) и соответственно получены низкие показатели прочности (от 0 до 4 МПа), которые приближаются к параметрам строительного кирпича только на верхней границе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе экспериментальных данных установлено, что порошковые композиции из габбро-диабазы ГД 50-100 и ГД 100-140 позволяют получить тестовые образцы удовлетворительно качества со значением параметра пористости на уровне 30 % при величине плотности энергии сплавления около 18...19 Дж/мм<sup>3</sup>. При меньших энергиях объем пористости увеличивается. Установлено, что зависимость пористости от плотности энергии СЛС оказалась практически одинаковой для двух указанных композиций.

Прочность тестовых образцов изучалась для значений плотности энергии сплавления от 12 до 20 Дж/мм<sup>3</sup>. Установлено, что эти показатели незначительно отличаются для порошковых композиций ГД 50-100 и ГД 100-140. Экспериментально полученные значения соответствовали значениям по прочности с большим разбросом от 2 до 20 МПа, при этом медианные значения составляли 12 МПа для ГД 50-100 и 17 МПа для ГД 100-140. Большие разбросы указанных значений могут быть связаны как с разной величиной плотности энергии сплавления, так и с неоднородностью частиц по размерам в исходных порошковых композициях.

Объединение полученных оценок прочности с данными исследований других авторов (рис. 10) позволяет говорить о тенденции увеличения прочности тестовых образцов с ростом плотности энергии сплавления. На данном этапе можно сделать вывод, что в случае использования порошковых композиций ГД 50-100 и ГД 100-140 в качестве исходного материала для СЛС можно получить вполне удовлетворительные строительные элементы с объемной плотностью около 1.8 г/см<sup>3</sup>, истинной плотностью вещества 2.6 г/см<sup>3</sup> (рис. 2 и 4) и пределом прочности по напряжениям около 10 МПа, что соответствует известным значениям для твердого керамического кирпича.

Для иллюстрации полученных результатов можно оценить высоту башни на лунной поверхности, которую можно было бы построить из блоков с указанными параметрами, изготовленных из лунного реголита методом СЛС. Высота башни  $L$  может быть определена из условия, что суммарное давление в условиях лунной гравитации на нижнем СЭ башни будет соответствовать предельно допустимой нагрузке на сжатие для нижнего блока, принятой равной характерной величине 10 МПа. Согласно полученной выше оценке объемной плотности для СЭ,  $\rho \approx 1.8$  г/см<sup>3</sup>, полное давление на нижний блок башни составит  $p = \rho g_L L$ , где  $g_L = 1.63$  м/с<sup>2</sup> — ускорение свободного падения на Луне. Приравнявая эту величину к 10 МПа, получаем величину предельной высоты башни около  $L = 3408$  м.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность Центру аддитивных технологий и объемного сканирования Университета «ВОЕНМЕХ» за техническую помощь в проведении эксперимента по сплавлению имитаторов лунного реголита на лазерных установках, сотрудникам Научно-исследовательского центра композиционных материалов МИСИС и НПК «Механобр-техника» за помощь в подготовке порошковых композиций.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Митрофанов И.Г., Зеленый Л.М.* Об освоении Луны. Планы и ближайшие перспективы // Земля и Вселенная. 2019. № 4. С. 16–37. DOI: 10.7868/S0044394819040029.
2. *Lin T.D., Love H., Stark D.* Physical properties of concrete made with Apollo 16 lunar soil sample // 2nd Conf. On Lunar Bases & Space Activities. 1987. P. 483–487.
3. *Hashimoto A.* Evaporation metamorphism in the early nebula – evaporation experiments on the melt FeO-MgO-SiO<sub>2</sub>-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and chemical fractionations of primitive materials // *Geochemical J.* 1983. V. 17. Art.ID. 111.
4. *Mishulovich A., Lin T.D., Tresouthick S.W. et al.* Lunar cement formulation // Kaden R.A. (ed.): SP-125: Lunar Concrete. American Concrete Institute. 1991. P. 255–264.
5. *Swint D.O., Schmidt S.R.* Optimizing lunar concrete // Kaden R.A. (ed.): Lunar Concrete. American Concrete Institute. 1991. P. 41–56.
6. *Omar H.A.* Production of lunar concrete using molten Sulphur // Final Research Report for JoVe NASA Grant NAG8 – 278. 1993. <http://wayback.archive-it.org/1792/20100201064830/http://hdl.handle.net/2060/19980001900>
7. *Vaniman D., Pettit D., Heiken G.* Uses of lunar sulfur // NASA. Johnson Space Center, 2nd Conf. on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century. 1992. P. 429–435.
8. *Grugel R. N., Toutanji H.* Sulfur concrete for lunar applications – sublimation concerns // *Advances in Space Research.* 2008. V. 41. Iss. 1. P. 103–112. DOI: 10.1016/j.asr.2007.08.018
9. *Toutanji H., Glenn-Loper B., Schrayshuen B.* Strength and durability performance of waterless lunar concrete // 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit AIAA. 2005. DOI: 10.2514/6.2005-1436
10. *Koh S.W., Yoo J., Bernaold L.E. et al.* Experimental study of waterless concrete for lunar construction // *Earth & Space 2010: Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments.* 2010. P. 1098–1102. DOI: 10.1061/41096(366)102
11. *Faierson E.J., Logan K.V.* Potential ISRU of lunar regolith for planetary habitation applications // *Badescu V. (ed.): Moon: Prospective Energy and Material Resources.* Springer. 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-27969-0\_9
12. *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>
13. *Indyk S.J., Benaroya H.* A structural assessment of unrefined sintered lunar regolith simulant // *Acta Astronaut.* 2017. V. 140. P. 517–536. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.09.018>
14. *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.
15. *Ким А.А., Лысенко А.М., Томилина Т.М.* Получение изделий из лунного реголита с помощью аддитивных технологий // *Науч. тр. 6-ой международной научно-технической конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение» (Живком-2022).* 2022. С. 151–154. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50230062>; <https://ssms-imash.com/images/Proceedings%20ZHIVKOM-2022.pdf>
16. *Томилина Т.М., Ким А.А., Лисов Д.И. и др.* Лабораторные испытания селективного лазерного сплавления имитаторов лунного реголита с различными гранулометрическими свойствами // *Косм. исслед.* 2024. Т. 62. № 5.
17. *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. P. 1–16. DOI: 10.1177/1464420718777932
18. *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>