

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОРПУСА МОДУЛЬНОГО БЛОКА
НА ОСНОВЕ ВЫСОКОПРОЧНОГО ПОРОШКА РС-553
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ
СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ**

С.В. Волков

serzh.volkov.98@inbox.ru

Д.В. Вертянов

vdv.vertyanov@yandex.ru

С.П. Тимошенко

spt111@mail.ru

НИУ МИЭТ, Москва, г. Зеленоград, Российская Федерация

Аннотация

Предложено корпус модульного блока на основе высокопрочного порошка РС-553 изготавливать, используя аддитивную технологию селективного лазерного плавления (Selective Laser Melting — SLM). Сформулированы актуальность тематики данного направления, проблемы выбора и применения подходящего материала для эффективной реализации конструкций разной сложности с помощью аддитивных технологических процессов. Определены цели и задачи, а также необходимые методы для их достижения. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что применение аддитивной технологии селективного лазерного плавления с соответствующими параметрами (скоростью подачи, температурой) при производстве корпуса модульного блока приводит к уменьшению массового показателя изделия. Определены свойства, которые положительно влияют на качество получаемого образца. Установлено, что оптимизация параметров технологического процесса способствует улучшению морфологических свойств изделия (пористости и шероховатости). Показано, что высокопрочный порошок РС-553 на основе сплава системы Al–Mg–Sc по общей коррозии и прочности более стойкий, чем аналогичный порошок РС-330 на основе сплава AlSi10Mg, а также сплавы АМг6 и Д16, применяемые в традици-

Ключевые слова

Аддитивные технологии, аддитивное производство, аддитивная электроника, 3D-печать, селективное лазерное плавление, алюминиевые сплавы, гетерогенная интеграция

онной технологии. Полученный результат планируется использовать для гетерогенной интеграции с устройствами аддитивной электроники

Поступила 26.12.2023

Принята 14.02.2024

© Автор(ы), 2024

Введение. В ракетно-космической промышленности и ряде других отраслей часто возникает проблема оптимизации конструктивно-технологических аспектов, влияющих на сложность производства, а также приводящих к увеличению стоимости конечного изделия. Следовательно, в силу ряда экономических факторов при изготовлении оснастки для мелкосерийного производства деталей и конструкций различной сложности и ограниченного времени требуется альтернативное решение. Альтернативой могут выступить аддитивные технологии, использование которых позволяет быстро и эффективно получить детали и конструкции различной сложности. В частности, для производства металлических структур и изделий широко используется аддитивная технология SLM. Применяя аддитивную технологию SLM, можно синтезировать объекты различной сложности, сплавляя металлические порошки по CAD-моделям (рис. 1) [1, 2].



Рис. 1. Металлические структуры и изделия, синтезированные с помощью аддитивной технологии SLM

Фундаментальные возможности аддитивного производства металлов в аэрокосмической отрасли включают в себя значительное сокращение затрат и сроков поставки, использование новых материалов и уникальных конструктивных решений, уменьшение массы компонентов за счет высокоэффективных и легких конструкций, а также объединение нескольких компонентов для увеличения производительности или управления рисками. Такие возможности коммерчески выгодны при изготовлении важнейших частей аэрокосмической техники: ракетных двигателей, топливных баков, электронных схем, компонентов спутников, теплообменников, а также при поддержке устаревших систем [3–5].

Аддитивное производство относится к широкому классу технологий 3D-печати — от лазерной печати по металлу до струйной печати фотостойкими смолами. Эти технологии могут использоваться для развития направления аддитивной электроники. Аддитивная электроника обычно относится к системам, которые могут печатать диэлектрический и проводящий материалы выборочно в пределах объема 3D-печати. В некоторых технологиях аддитивной электроники используется медленное наращивание материала, по микронам за раз без внутреннего структурирования. Такие технологии потенциально могут применяться для дальнейшей гетерогенной интеграции печатной электроники в состав разрабатываемого устройства [6], например, при изготовлении многоуровневых печатных плат, встроенных компонентов, печатных соединений и других необходимых компонентов аддитивной электроники [7].

Основным преимуществом применения аддитивной технологии является возможность изготовления деталей сложной формы. Этого трудно или даже невозможно достичь традиционными методами производства, например, производством компонентов с внутренней структурой (охлаждающие каналы или ячеистые решетчатые структуры) [5]. Аддитивная технология SLM предлагает значительный потенциал для снижения массы изготавливаемых изделий. Это достигается за счет оптимизации морфологии поверхности и использования материалов с низкими массовыми показателями и отличными механическими свойствами (ударной прочностью, пластичностью). Широкое распространение металлического аддитивного производства в серийном производстве компонентов по-прежнему ограничено ассортиментом материалов, которые можно надежно обрабатывать с точки зрения конечной прочности изделия. Результаты сравнения механических свойств титановых, медных и алюминиевых сплавов, обработанных по аддитивной технологии SLM, приведены на рис. 2. Показано только шесть алюминиевых сплавов, успешно обрабатываемых по аддитивной технологии SLM, что по сравнению с традиционными технологиями литья составляет лишь некоторую часть [8, 9].

Среди приведенных материалов алюминий-скандиевый сплав AlScMg имеет лучшее соотношение прочности и массы. Ключевой особенностью подобных сплавов является склонность к горячему растрескиванию и образованию расширенной зоны термического влияния. Состав алюминий-скандиевых сплавов основан на сплавах AlMg, которые имеют высокие ударную прочность и коррозионную стойкость [9, 10].

Цель настоящей работы — разработка и исследование корпуса модульного блока из высокопрочного порошка PC-553 на основе сплава си-

стемы Al–Mg–Sc, изготавливаемого с помощью аддитивной технологии SLM [11], а также улучшение показателя массы конструкции модульного блока благодаря применению аддитивной технологии, оптимизации технологического процесса и регулированию составляющих параметров.

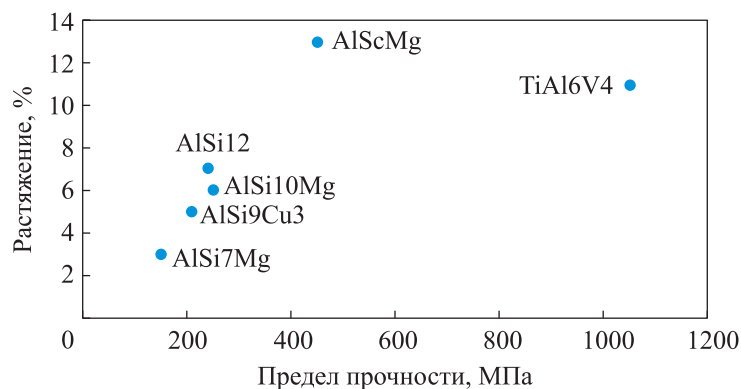


Рис. 2. Результаты сравнения механических свойств сплавов, обработанных по аддитивной технологии SLM

Модульный блок — устройство, конструктивно состоящее из электронных модулей, размещенных в механическом корпусе с заданной геометрической конфигурацией. Модульный блок используется в цифровой системе для контроля физических параметров внешней среды (температуры, давления и др.).

Использование высокопрочного порошка PC-553 для корпуса модульного блока решит задачу импортозамещения западных марок материалов, аналогичных российским по составу и свойствам [12].

Для формирования механической части конструкции модульного блока (корпуса устройства) выбрана аддитивная технология SLM. Используя материал, имеющий высокие показатели ударной прочности и износостойкости, с помощью аддитивной технологии SLM возможно создать изделие заданной сложности [13].

Упрощенная схема аддитивной технологии SLM приведена на рис. 3. Процесс состоит из нескольких основных этапов, включая напыление порошка и лазерное сканирование. Для обработки изделий по аддитивной технологии SLM используется инертная камера с контролируемой атмосферой по выбору, чтобы избежать окисления [14, 15].

Во время обработки металлический порошок облучается лазерным лучом высокой энергии, что позволяет ему быстро затвердевать до комнатной температуры. Высокая скорость охлаждения приводит к образованию микроструктур. На рис. 3 показаны три области структуры — рас-

плавленый, переплавленный и затвердевший материалы. Столбчатые структуры растут в направлении температурного градиента. Такая направленность позволяет получить текстурированный материал, геометрия которого контролируется сканированием во время технологического процесса.

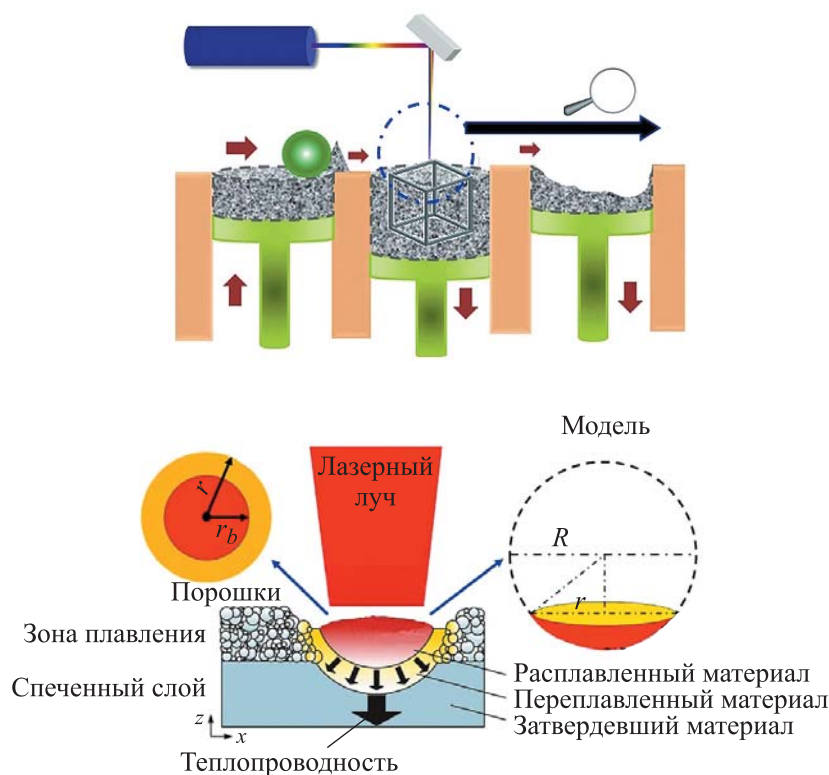


Рис. 3. Упрощенная схема аддитивной технологии SLM:

r и r_b — радиусы зоны плавления и лазерного луча

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Основными критериями выбора материала для формирования корпуса модульного блока стали коррозионная стойкость, а также ударная прочность. Для сравнения выбраны алюминиевые сплавы АМг6 и Д16, используемые в традиционной технологии литья, а в качестве альтернативы для аддитивного производства — порошки на основе коррозионно-стойких высокопрочных алюминиевых сплавов AlScMg (PC-553) [9, 10], AlSi10Mg (PC-330) [16, 17].

Алюминиевые сплавы пользуются большим спросом в различных отраслях промышленности, поэтому им уделяется значительное внимание. Поскольку это большое семейство сплавов с рядом легирующих элементов,

не все алюминиевые сплавы ведут себя одинаково при обработке по аддитивным технологиям SLM из-за различия легирующего состава [18].

Исследования направлены на оптимизацию параметров, непосредственно влияющих на эффективность плавления и стабильность сканирования для изготовления бездефектных изделий. Наибольший интерес могут представлять характеристики лазерного луча: мощность лазера, расстояние между штриховками, скорость сканирования, толщина слоя и стратегия сканирования [15].

Физическим параметром, который обычно рассматривается при оптимизации и варьировании параметров процесса, является плотность энергии [19]. Этот параметр рассчитывается на основе линейного, площадного или объемного подходов. Последний подход наиболее популярен [15]. Объемная плотность энергии рассчитывается по формуле

$$ED_v = \frac{P}{vht}, \quad (1)$$

где P — мощность лазера; v — скорость сканирования; h — расстояние между штрихами; t — толщина слоя.

Как следует из (1), одна и та же плотность энергии может быть достигнута при использовании различных комбинаций параметров. В некоторых литературных источниках в этой формуле вместо расстояния между штрихами используется диаметр лазерного луча. Для сопоставления эволюции дефектов и микроструктуры материала с параметрами процесса вместо значений плотности энергии также используют нормированные диаграммы процесса [20]. Формула для нормированного параметра ED^* (учитывает параметры процесса и свойства материала) имеет вид:

$$ED^* = \left(\frac{AP}{2vt\eta_b} \right) \left(\frac{1}{0,67\rho C_p (T_m - T_0)} \right) \left(\frac{1}{h^*} \right), \quad (2)$$

где A — поглощающая способность материала; η_b — радиус лазерного луча; ρ — плотность материала; C_p — удельная теплоемкость; T_m — температура плавления; T_0 — начальная температура слоя порошка; h^* — безразмерное расстояние между штрихами.

Ограничением для этой формулы служит отсутствие данных о поглощающей способности порошковых материалов. Поэтому значения поглощающей способности, измеряемые для полированных чистых металлических пластин или шероховатых окисленных поверхностей, берут

из литературных источников. Поглощающая способность материала меняется в зависимости от параметров процесса, используемого во время аддитивного производства [21].

Результаты и обсуждение. Несмотря на большое число исследований по оптимизации параметров процесса, основанных на плотности энергии, приведенные формулы не могут в полной мере отразить эффективность энергии, передаваемой материалу во время обработки. Например, эти формулы не учитывают шаблоны сканирования и стили штриховки, смещение сканирования по углам и границам, а также число сканирований слоев при итеративности разработки.

Для сравнительного анализа выбраны материалы (табл. 1), наиболее часто применяемые в традиционных аддитивных технологиях изделий различного уровня сложности [22, 23].

Таблица 1

**Свойства наиболее распространенных материалов, используемых
в традиционных аддитивных технологиях**

Материал	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К)
AMг6	305	145	71/71	122
Д16	450	450	72/72	130
PC-300 (AlSi10Mg)	360	300	68/68	155
PC-553 (AlScMg)	500	450	72/72	187

В результате сравнительного анализа материалов выбраны наиболее важные свойства (пределы прочности и текучести, модуль упругости, коэффициент теплопроводности), которые потенциально могут быть использованы при создании корпуса модульного блока заданного уровня сложности (рис. 4).

В рассматриваемом случае предел прочности порошка PC-553 имеет наибольший показатель относительно рассматриваемых алюминиевых сплавов, что указывает на его высокую ударную прочность. Остальные свойства менее интересны при решении данных задач. Таким образом, более подходящим материалом для формирования механической части модульного блока по аддитивной технологии SLM может выступить порошок PC-553 [9, 10] на основе алюминиевого сплава, имеющего коррозионную стойкость, а также высокую ударную прочность благодаря содержанию магния и скандия.

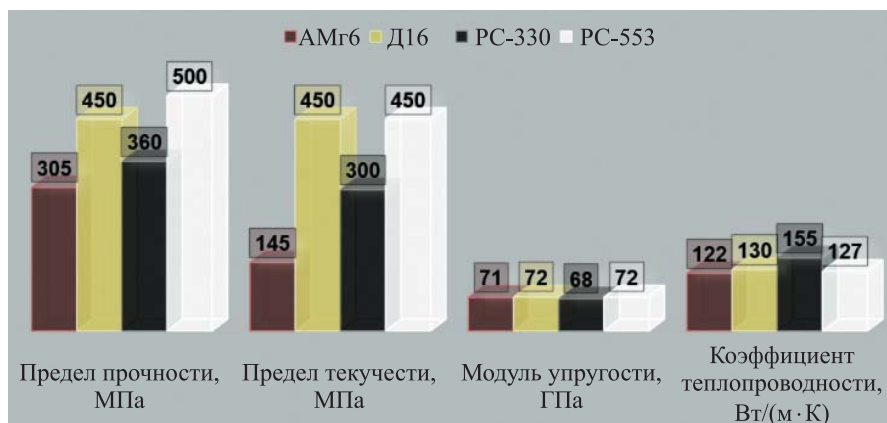


Рис. 4. Диаграммы сравнения основных свойств, используемых в аддитивных технологиях

В процессе разработки модульного блока спроектирована 3D-модель корпуса, подготовлен маршрут для физической реализации опытного образца на основе выбранного материала (порошка PC-553) и аддитивной технологии SLM.

Для изучения пределов обработки порошка PC-553 отрегулированы три ключевых параметра процесса SLM: 1) скорость лазерного сканирования v в диапазоне 400...1300 мм/с (рис. 5); 2) плотность энергии ED ; 3) мощность P лазера в диапазоне 325...400 Вт. Зависимость относительной плотности энергии от скорости сканирования приведена на рис. 5.

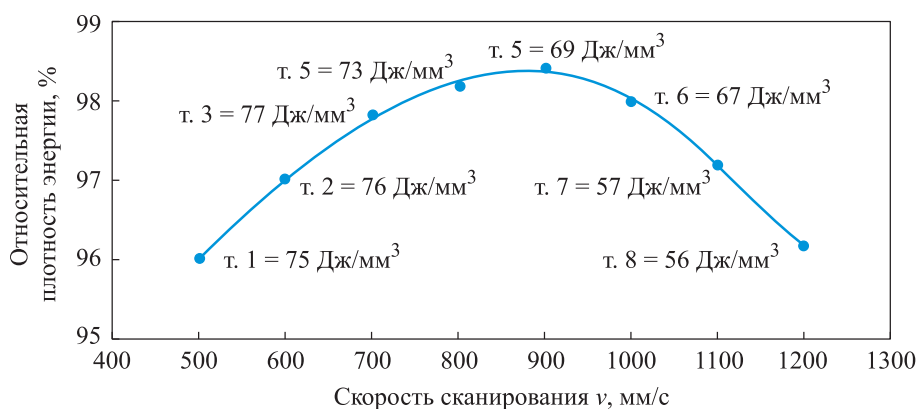


Рис. 5. Зависимость относительной плотности энергии от скорости сканирования

В процессе подбора параметров определена оптимальная плотность энергии ED в диапазоне 60...75 Дж/мм³ для минимальной пористости. Технологическое окно скорости сканирования в диапазоне 800...1000 мм/с

оценивалось как наиболее оптимальное, поскольку в объеме образца появлялись лишь небольшие сферические поры [23–25]. Наилучшие результаты относительной плотности, равные $98 \pm 0,3 \%$, достигнуты при мощности лазера 330...370 Вт и скорости сканирования 900 мм/с.

В результате разработки изготовлена механическая часть корпуса модульного блока по традиционной технологии путем литья (рис. 6, а) и аддитивной технологии с помощью 3D-печати (рис. 6, б).

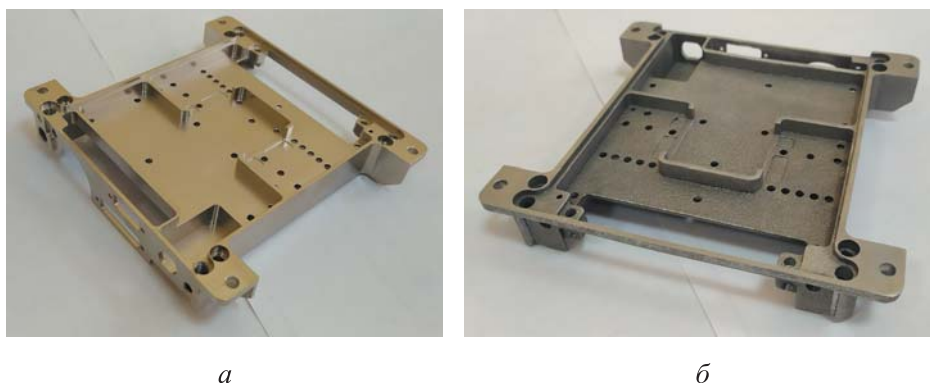


Рис. 6. Механическая часть корпуса модульного блока, изготовленная по традиционной технологии путем литья (АМг6) (а) и по аддитивной технологии с помощью 3D-печати (РС-553) (б)

Согласно результатам проведенных экспериментальных исследований, аддитивная технология SLM может служить альтернативой традиционной технологии литья, поскольку вследствие применения порошка РС-533 достигается снижение показателей массы и стоимости конечного изделия (табл. 2).

Таблица 2

Результат оптимизации конструкции модульного блока

Показатель	Литье, сплав АМг6	3D-печать, порошок РС-553
Масса, кг	0,18	0,13
Предел прочности, МПа	305	500
Предел текучести, МПа	145	450

В результате проведенных исследований выявлена проблема, заключающаяся в неоптимальном сочетании параметров селективного лазерного плавления (в частности, скорости подачи и температуры). Это привело к росту пористости и потере пластичности материала, что требует дальнейшей калибровки параметров технологического процесса.

Заключение. На текущем этапе разработки получены результаты, отражающие преимущества применения металлического высокопрочного порошка PC-533.

Разработан и исследован корпус модульного блока, выполненный из высокопрочного порошка PC-553 на основе коррозионно-стойкого алюминиевого сплава системы Al–Mg–Sc. Установлено, что основным недостатком применения аддитивной технологии SLM является недостаточная пластичность получаемого изделия. Компенсировать недостаток можно термической обработкой.

Регулируя параметры технологического процесса, можно определить режимы, позволяющие теоретически улучшить качественные показатели изделия, которые требуют экспериментального подтверждения. Это послужит предметом для дальнейших исследований в целях доработки технологического процесса изготовления изделий подобного рода. В дальнейшем планируется использовать полученный корпус для гетерогенной интеграции с устройствами аддитивной электроники.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Blakey-Milner B., Gradl P., Snedden G., et al. Metal additive manufacturing in aerospace: a review. *Mater. Des.*, 2021, vol. 209, art. 110008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>
- [2] Li S.S., Yue X., Li Q.Y., et al. Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry. *J. Mater. Res. Technol.*, 2023, vol. 27, pp. 944–983. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.274>
- [3] Manokhina E.S., Egorov N.V. Application of additive technologies in rocket and space engineering. *Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации*, 2023, № 22, с. 190–191. EDN: SFLWOR
- [4] Камалов Т.В., Истомин В.В. Применение аддитивных технологий в ракетно-космической технике. *Наукосфера*, 2022, № 1-1, с. 207–213. EDN: RWFZAX
- [5] Perera A.T.K., Song K., Umezu S., et al. Recent progress in functionalized plastic 3D printing in creation of metallized architectures. *Mater. Des.*, 2023, vol. 232, art. 112044. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112044>
- [6] Bastola A., He Y., Im J., et al. Formulation of functional materials for inkjet printing: A pathway towards fully 3D printed electronics. *Mater. Today Electron.*, 2023, vol. 6, art. 100058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtelec.2023.100058>
- [7] Hoerber J., Glasschroeder J., Pfeffer M., et al. Approaches for additive manufacturing of 3D electronic applications. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 17, pp. 806–811. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.090>
- [8] Koutny D., Skulina D., Pantělejev L., et al. Processing of Al-Sc aluminum alloy using SLM technology. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 74, pp. 44–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.027>

- [9] Захаров В.В., Филатов Ю.А. Современные тенденции развития алюминиевых сплавов, легированных скандием. *Технология легких сплавов*, 2022, № 3, с. 9–18. DOI: <https://doi.org/10.24412/0321-4664-2022-3-9-18>
- [10] Рябов Д.К., Панов А.В., Виноградов Д.А. и др. Перспективы применения экономнолегированных скандийсодержащих алюминиевых сплавов. *Технология легких сплавов*, 2021, № 2, с. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.24412/0321-4664-2021-2-23-31>
- [11] Тарасова Т.В., Аблеева Р.Р. Изготовление изделий методом селективного лазерного плавления из порошков алюминиевых сплавов. *Вестник современных технологий*, 2017, № 1, с. 48–51. EDN: ZOFLYF
- [12] Абрамов И.В., Лукина Ю.Д., Абрамов В.И. Обеспечение развития аддитивных технологий в России в условиях санкций. *Российский экономический вестник*, 2022, т. 5, № 4, с. 198–204. EDN: ZJVLWN
- [13] Денисюк Д.В., Ивлев Д.Ю., Кузнецов А.О. Использование SLM технологий 3D печати в авиастроении. *Тр. XXI Всерос. науч.-техн. конф. «Наука. Промышленность. Оборона»*. Т. 1. Новосибирск, НГТУ, 2020, с. 15–19. EDN: FTNAJN
- [14] Mishra R.-S., Thapliyal S. Design approaches for printability-performance synergy in Al alloys for laser-powder bed additive manufacturing. *Mater. Des.*, 2021, vol. 204, art. 109640. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109640>
- [15] Aboulkhair N.T., Simonelli M., Parry L., et al. 3D printing of aluminium alloys: additive manufacturing of aluminium alloys using selective laser melting. *Prog. Mater. Sc.*, 2019, vol. 106, art. 100578. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100578>
- [16] Aboulkhair N.-T., Everitt N.-M., Ashcroft I., et al. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Addit. Manuf.*, 2014, vol. 1-4, pp. 77–86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.001>
- [17] Караваев А.К., Пучков Ю.А. Исследование структуры и свойств сплава AlSi10Mg, полученного методом селективного лазерного сплавления. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2020, № 5 (134), с. 71–85. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-5-71-85>
- [18] Литвинцев А.И. Перспективы применения алюминиевых порошковых сплавов для изготовления деталей по аддитивной технологии. *Технология легких сплавов*, 2015, № 4, с. 25–30. EDN: VLQGNR
- [19] Bertoli U.S., Wolfer A.-J., Matthews M.-J., et al. On the limitations of volumetric energy density as a design parameter for selective laser melting. *Mater. Des.*, 2017, vol. 113, pp. 331–340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.10.037>
- [20] Thomas M., Baxter G.-J., Todd I. Normalised model-based processing diagrams for additive layer manufacture of engineering alloys. *Acta Mater.*, 2016, vol. 108, pp. 26–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.02.025>
- [21] Trapp J., Rubenchik A.-M., Guss G., et al. *In situ* absorptivity measurements of metallic powders during laser powder-bed fusion additive manufacturing. *Appl. Mater. Today*, 2017, vol. 9, pp. 341–349. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.08.006>

[22] Литунов С.Н., Слободенюк В.С., Мельников Д.В. Обзор и анализ аддитивных технологий. Ч. 1. *Омский научный вестник*, 2016, № 1, с. 12–17. EDN: TRTGIN

[23] Зобов П.Г., Дектярев А.В., Казаченко К.В. и др. Исследование физико-механических свойств образцов, полученных по технологии SLM. Ч. 1. Предел прочности. *Известия КГТУ*, 2022, № 65, с. 107–117. EDN: DKWDQP

[24] Соковиков М.А., Оборин В.А., Чудинов В.В. Исследование структурных и механических аспектов локализации пластической деформации и разрушения при динамическом нагружении. *Вестник Пермского федерального исследовательского центра*, 2021, № 2, с. 27–33.

DOI: <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2021.2.3>

[25] Рохлин Л.Л., Бочвар Н.Р. Физико-химические исследования алюминиевых сплавов с несколькими переходными металлами. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2014, № 2, с. 35–42. EDN: RUWNHP

Волков Сергей Владиславович — аспирант Института нано- и микросистемной техники НИУ МИЭТ (Российская Федерация, 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

Вертянов Денис Васильевич — канд. техн. наук, доцент Института нано- и микросистемной техники НИУ МИЭТ (Российская Федерация, 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

Тимошенко Сергей Петрович — д-р техн. наук, профессор Института нано- и микросистемной техники НИУ МИЭТ (Российская Федерация, 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Волков С.В., Вертянов Д.В., Тимошенко С.П. Разработка и исследование корпуса модульного блока на основе высокопрочного порошка РС-553 с использованием аддитивной технологии селективного лазерного плавления. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2024, № 2 (147), с. 22–36. EDN: HGAEBQ

**DEVELOPMENT AND STUDY OF A MODULAR BLOCK HOUSING
BASED ON THE RS-533 HIGH-STRENGTH POWDER
USING THE ADDITIVE SELECTIVE LASER MELTING TECHNOLOGY**

S.V. Volkov

serzh.volkov.98@inbox.ru

D.V. Vertyanov

vdv.ertyanov@yandex.ru

S.P. Timoshenkov

spt111@mail.ru

MIET, Moscow, Zelenograd, Russian Federation

Abstract

The paper proposes to manufacture the modular block housings using the RS-533 high-strength powder and the SLM additive selective laser melting technology. It formulates relevance of the subject in this area and problems in selecting and introducing the suitable material in effective implementation of structures with varying complexity using the additive manufacturing processes. Goals and objectives are defined, and the necessary methods are applied to achieve them. During manufacture of the modular block housing, the experimental study results made it possible to establish that using the additive SLM technology with the appropriate parameters (feed rate and temperature) was leading to a decrease in the product mass index. Properties were established positively effecting the resulting prototype quality. It was revealed that optimization of the technological process parameters helped to improve the product morphological properties (porosity and roughness). It was shown that the RS-533 high-strength powder based on the Al–Mg–Sc alloy system was more resistant to general corrosion and strength than the similar RS-330 powder based on the AlSi10Mg alloy, as well as the AMg6 and D16 alloys used in the traditional technology. The obtained result is planned to be introduced in heterogeneous integration with the additive electronics devices

Keywords

Additive technologies, additive manufacture, additive electronics, 3D printing, selective laser melting, aluminum alloys, heterogeneous integration

Received 26.12.2023

Accepted 14.02.2024

© Author(s), 2024

REFERENCES

- [1] Blakey-Milner B., Gradl P., Snedden G., et al. Metal additive manufacturing in aerospace: a review. *Mater. Des.*, 2021, vol. 209, art. 110008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>
- [2] Li S.S., Yue X., Li Q.Y., et al. Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry. *J. Mater. Res. Technol.*, 2023, vol. 27, pp. 944–983. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.274>
- [3] Manokhina E.S., Egorov N.V. Application of additive technologies in rocket and space engineering. *Molodezh. Obshchestvo. Sovremennaya nauka, tekhnika i innovatsii* [Youth. Society. Modern Science, Technologies & Innovations], 2023, no. 22, pp. 190–191. EDN: SFLWOR
- [4] Kamalov T.V., Istomin V.V. Application of additive technologies in rocket and space technology. *Naukosfera*, 2022, no. 1-1, pp. 207–213 (in Russ.). EDN: RWFZAX

- [5] Perera A.T.K., Song K., Umezu S., et al. Recent progress in functionalized plastic 3D printing in creation of metallized architectures. *Mater. Des.*, 2023, vol. 232, art. 112044. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112044>
- [6] Bastola A., He Y., Im J., et al. Formulation of functional materials for inkjet printing: A pathway towards fully 3D printed electronics. *Mater. Today Electron.*, 2023, vol. 6, art. 100058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtelec.2023.100058>
- [7] Hoerber J., Glasschroeder J., Pfeffer M., et al. Approaches for additive manufacturing of 3D electronic applications. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 17, pp. 806–811. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.090>
- [8] Koutny D., Skulina D., Pantělejev L., et al. Processing of Al-Sc aluminum alloy using SLM technology. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 74, pp. 44–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.027>
- [9] Zakharov V.V., Filatov Yu.A. Modern trends in the development of aluminum alloys doped with scandium. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys], 2022, no. 3, pp. 9–18 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/0321-4664-2022-3-9-18>
- [10] Ryabov D.K., Panov A.V., Vinogradov D.A., et al. Prospects of application of low cost doped aluminium alloys with SC-additions. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys], 2021, no. 2, pp. 23–31 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/0321-4664-2021-2-23-31>
- [11] Tarasova T.V., Ableeva R.R. Fabrication of parts by selective laser melting using aluminum alloys. *Vestnik sovremennykh tekhnologiy* [Journal of Modern Technologies], 2017, no. 1, pp. 48–51 (in Russ.). EDN: ZOFLYF
- [12] Abramov I.V., Lukina Yu.D., Abramov V.I. Prospects and problems of the use of additive technologies in Russia under the anti-Russian sanctions. *Rossiyskiy ekonomicheskii vestnik* [Russian Economic Bulletin], 2022, vol. 5, no. 4, pp. 198–204 (in Russ.). EDN: ZJVLWN
- [13] Denisyuk D.V., Ivlev D.Yu., Kuznetsov A.O. [Using SLM 3D printing technologies in the aircraft]. *Tr. XXI Vseros. nauch.-tekhn. konf. "Nauka. Promyshlennost. Oborona"*. T. 1 [Proc. XXI Russ. Sc.-Pract. Science. Industry. Defense. Conf. Vol. 1]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2020, pp. 15–19 (in Russ.). EDN: FTHAJN
- [14] Mishra R.-S., Thapliyal S. Design approaches for printability-performance synergy in Al alloys for laser-powder bed additive manufacturing. *Mater. Des.*, 2021, vol. 204, art. 109640. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109640>
- [15] Aboulkhair N.T., Simonelli M., Parry L., et al. 3D printing of aluminium alloys: additive manufacturing of aluminium alloys using selective laser melting. *Prog. Mater. Sc.*, 2019, vol. 106, art. 100578. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.100578>
- [16] Aboulkhair N.-T., Everitt N.-M., Ashcroft I., et al. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Addit. Manuf.*, 2014, vol. 1-4, pp. 77–86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.001>
- [17] Karavaev A.K., Puchkov Yu.A. Investigating the structure and properties of the AlSi10Mg alloy manufactured by means of selective laser melting. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2020, no. 5 (134), pp. 71–85 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-5-71-85>

- [18] Litvintsev A.I. Application prospects of pm aluminium alloys for production of components via the additive technology technique. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys], 2015, no. 4, pp. 25–30 (in Russ.). EDN: VLQGNR
- [19] Bertoli U.S., Wolfer A.-J., Matthews M.-J., et al. On the limitations of volumetric energy density as a design parameter for selective laser melting. *Mater. Des.*, 2017, vol. 113, pp. 331–340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.10.037>
- [20] Thomas M., Baxter G.-J., Todd I. Normalised model-based processing diagrams for additive layer manufacture of engineering alloys. *Acta Mater.*, 2016, vol. 108, pp. 26–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.02.025>
- [21] Trapp J., Rubenchik A.-M., Guss G., et al. *In situ* absorptivity measurements of metallic powders during laser powder-bed fusion additive manufacturing. *Appl. Mater. Today*, 2017, vol. 9, pp. 341–349. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.08.006>
- [22] Litunov S.N., Slobodenyuk V.S., Melnikov D.V. Review and analysis of additive technologies. Part 1. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2016, no. 1, pp. 12–17 (in Russ.). EDN: TRTGIN
- [23] Zobov P.G., Dektyarev A.V., Kazachenko K.V., et al. Study of physical and mechanical properties of samples obtained by SLM technology. Part 1. Strength limit. *Izvestiya KGTU* [KSTU NEWS], 2022, no. 65, pp. 107–117 (in Russ.). EDN: DKWDQP
- [24] Sokovikov M.A., Oborin V.A., Chudinov V.V. Investigation into structural and mechanical aspects of localization of plastic deformation and fracture under dynamic loading. *Vestnik Permskogo federalnogo issledovatel'skogo tsentra* [Perm Federal Research Centre Journal], 2021, no. 2, pp. 27–33 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2021.2.3>
- [25] Rokhlin L.L., Bochvar N.R. Physical-and-chemical investigation of aluminum alloys with several transition metals. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik* [All Materials. Encyclopaedic Reference Manual], 2014, no. 2, pp. 35–42 (in Russ.). EDN: RUWNHP

Volkov S.V. — Post-Graduate Student, NMST Institute, MIET (Shokina ploshchad 1, Moscow, Zelenograd, 124498 Russian Federation).

Vertyanov D.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, NMST Institute, MIET (Shokina ploshchad 1, Moscow, Zelenograd, 124498 Russian Federation).

Timoshenkov S.P. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, NMST Institute, MIET (Shokina ploshchad 1, Moscow, Zelenograd, 124498 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Volkov S.V., Vertyanov D.V., Timoshenkov S.P. Development and study of a modular block housing based on the RS-533 high-strength powder using the additive selective laser melting technology. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2024, no. 2 (147), pp. 22–36 (in Russ.). EDN: HGAEBQ