

## Применение метода 3D-печати при изготовлении элементов антенно-фидерных устройств космических аппаратов

Ю.П. Борщев, А.И. Ананьев, И.В. Камышанов, Е.Н. Телелеяв

АО «НПО Лавочкина», Химки, 141402, Россия

*Дан краткий обзор аддитивных технологий, приведены результаты испытаний и исследований технологических свойств порошковых материалов, а также исследований и испытаний образцов из материалов, полученных из порошков с использованием технологии селективного лазерного сплавления на базе 3D-принтера модели SLM 280, их физических и механических свойств. Показаны прототипы изготовленных по технологии селективного лазерного сплавления элементов антенно-фидерных устройств космических аппаратов в АО «НПО Лавочкина». С учетом возможностей технологии селективного лазерного сплавления элементов вместо изготовления конструкторской документации на сборочные единицы изделия была разработана конструкторская документация на цельные изделия. Приведены результаты испытаний радиотехнических параметров некоторых типовых элементов (АФУ). Представлена оценка преимуществ применения технологии селективного лазерного сплавления, а именно сокращение цикла, снижение трудоемкости и стоимости изготовления деталей; повышение стабильности геометрии конструкции, уменьшение массы и количества дефектов в процессе изготовления изделий.*

**Ключевые слова:** проектирование, изготовление, испытание, спиральные антенны, волноводы, селективное лазерное сплавление, аддитивные технологии

**Введение.** В условиях жесткой мировой конкуренции в ракетно-космической сфере для эффективной работы по созданию космических аппаратов (КА) необходимо разрабатывать и внедрять новые технологии и материалы, позволяющие специалистам решать задачи проектирования и изготовления изделий, конструкция которых максимально соответствует требованиям функциональности, а сами изделия имеют минимальную массу и высокие качественные и стоимостные показатели.

Перспективным направлением производственных технологий, позволяющих решать поставленные задачи, являются аддитивные технологии.

Целью настоящей работы является определение принципиальной возможности и эффективности изготовления деталей и узлов КА с помощью технологии селективного лазерного сплавления (СЛС).

**Аддитивные технологии.** Технологии послойного синтеза, или аддитивные технологии (АТ), появились в конце 1980-х годов и до сих пор остаются наиболее динамично развивающимся направлением

«цифрового» производства. Аддитивные технологии различаются методом подвода энергии (лазерное излучение, электронный луч, тепловое воздействие, облучение солнечным светом, посредством связующего состава и т. д.), выбором материалов и способом их нанесения. Однако во всех случаях используется послойное наращивание материала [1–5].

Разработка и производство оборудования и порошков для 3D-печати изделий из металлов и сплавов — одно из самых активно развивающихся направлений в современном аддитивном производстве. Возможности АТ обеспечивают:

- повышение коэффициента использования материалов (до 95 %);
- изготовление сложнопрофильных изделий с элементами бионического дизайна, которые трудно или даже невозможно изготовить на существующем оборудовании;
- существенное снижение трудоемкости, длительности производственного цикла и себестоимости благодаря отказу от ряда технологических операций;
- повышение гибкости производства, отсутствие необходимости переналадки оборудования под новое изделие;

Для работы с металлическими материалами можно выделить два основных типа АТ по методу формирования слоя. К первому типу относятся процессы, при которых материал подается непосредственно в область подведения энергии, где в этот момент происходит построение слоя детали. Таким образом, процесс подачи материала и процесс его сплавления выполняются одновременно.

Технологии второго типа подразумевают наличие платформы, на которой предварительно формируется слой строительного материала. К технологии этого типа относится и селективное лазерное сплавление. Разнообразные модели 3D-принтеров для СЛС очень широко представлены на рынке. В статье приведено исследование работы установки СЛС (рис. 1) [6] с применением 3D-принтера модели SLM 280 HL. Одной из основных частей в такой установке является лазерная система на основе иттербиевого волоконного лазера.

Процесс СЛС проходит в защитной среде инертных газов — азоте или аргоне, предотвращающих окисление порошка. Все установки СЛС функционируют следующим образом. Сначала создается цифровая 3D-модель детали с использованием САПР или данных сканирования. Специальное программное обеспечение «разрезает» ее на тонкие слои толщиной от 20 до 100 мкм. Устройство для нанесения и выравнивания порошка равномерно распределяет его по поверхности рабочего стола. После этого лазерный луч избирательно плавит порошок путем сканирования поперечного сечения, сгенерированного из 3D-модели. По окончании сплавления порошкового слоя плат-

форма с изготавливаемым изделием опускается на заданную толщину. Процесс многократно повторяется, пока деталь не будет закончена.

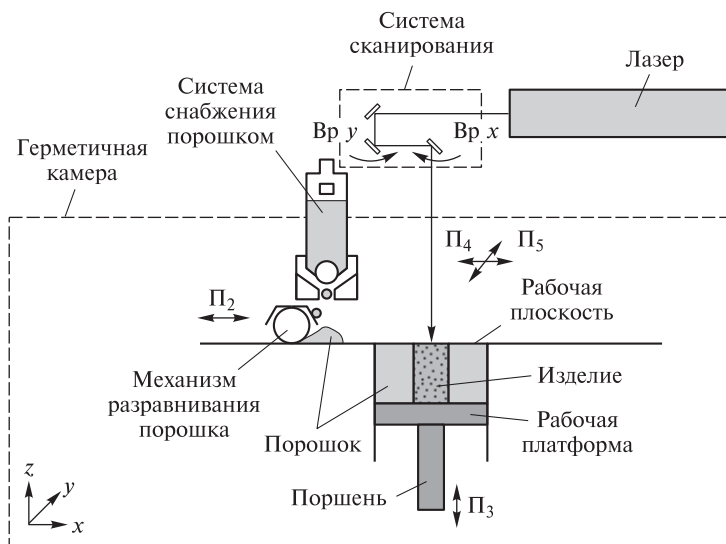


Рис. 1. Схема установки селективного лазерного сплавления

Технологически процесс СЛС определяется большим числом операционных параметров. Однако для исследования процессов СЛС и оптимизации режимов для отдельно взятого материала с известными характеристиками обычно используют показатель  $E_i$  — плотность энергии, Дж/мм<sup>3</sup>, который зависит от четырех параметров процесса: мощности лазера  $P$ , Вт; скорости сканирования  $V$ , мм/с; интервала сканирования  $X$ , мм; высоты слоя  $H$ , мкм. Эти показатели связаны между собой формулой

$$E_i = \frac{P}{VXH} \quad (1)$$

#### Отработка технологии СЛС и выбор деталей для 3D-печати.

**Испытания и исследования порошковых материалов.** К началу работ по внедрению технологии СЛС в числе доступных порошков были импортные из сплавов 316L, ВТ-6, AlSi10Mg и отечественный аналог AlSi10Mg. Поскольку из применяемых при производстве КА металлов до 70 % составляют алюминиевые сплавы, были проведены исследования и испытания материалов, получаемых из порошка AlSi10Mg. В лабораториях отдела главного металлурга с учетом с разработанной «Методикой по входному контролю, исследованию и хранению металлических порошков для технологии СЛС» от 21.07.2017 и соответствующих государственных стандартов были проведены:

– исследования технологических свойств порошков (формы частиц, текучести, влажности и гранулометрического состава) из алюминиевого сплава AlSi10Mg производства Германии и его аналога, выпускаемого ОК «Русал» (Россия);

– испытания и исследования механических свойств образцов из материалов, полученных по технологии СЛС.

Режимы создания образцов были установлены подбором параметров их построения по методике производителя 3D-принтера.

Результаты механических испытаний «гагаринских» образцов до и после термообработки из материалов, полученных технологией СЛС, а также образца из сплава АК7ч, изготовленного литьем, приведены в табл. 1 [7–10].

Таблица 1

Результаты механических испытаний «гагаринских» образцов

Состояние образца		Временное сопротивление $\sigma_B$ , кг/мм <sup>2</sup>	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , кг/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение $\delta$ , %
Селективное лазерное сплавление	Исходное (Германия)	43–44	35	6
	Т/о: 300 °С, 2 ч (Германия)	29,0	23,6	14
	Исходное (ОК «Русал»)	46,0	29,0	7
	Т/о: 300 °С, 2 ч (ОК «Русал»)	25,47	14,87	12,4
Литье из сплава АК7ч, Т6		21,6	11,8	4

**Выбор деталей и узлов КА для изготовления прототипов по технологии СЛС.** Детали и узлы КА были выбраны на основе результатов исследований и испытаний материала, полученного из порошка сплава AlSi10Mg, а также анализа требований конструкторской документации (КД) различных систем аппаратов к материалам. Были учтены требования КД к следующим параметрам:

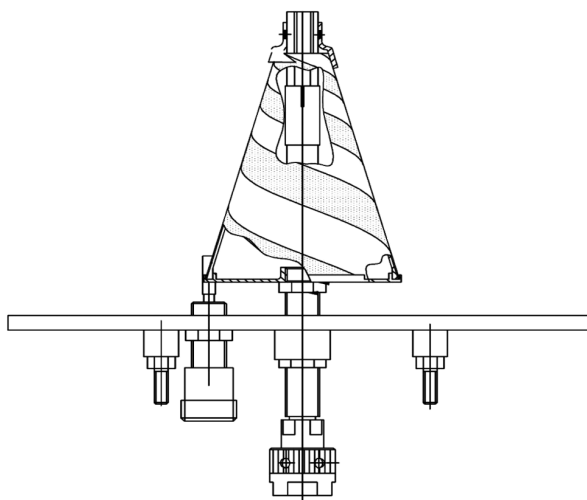
- плотность, обеспечивающая минимальную массу изделий;
- механические свойства на уровне литейных алюминиевых сплавов;
- коррозионная стойкость;
- технологичность;
- электропроводность;
- устойчивость к циклическим изменениям температуры;
- сохранение эксплуатационных свойств при воздействии факторов внешней космической среды.

В итоге для изготовления по технологии СЛС были выбраны элементы антенно-фидерных устройств (АФУ), в КД которых требования к физико-механическим свойствам материала соответствуют предъявляемым к свойствам материала, получаемого из порошка AlSi10Mg производства ОК «Русал».

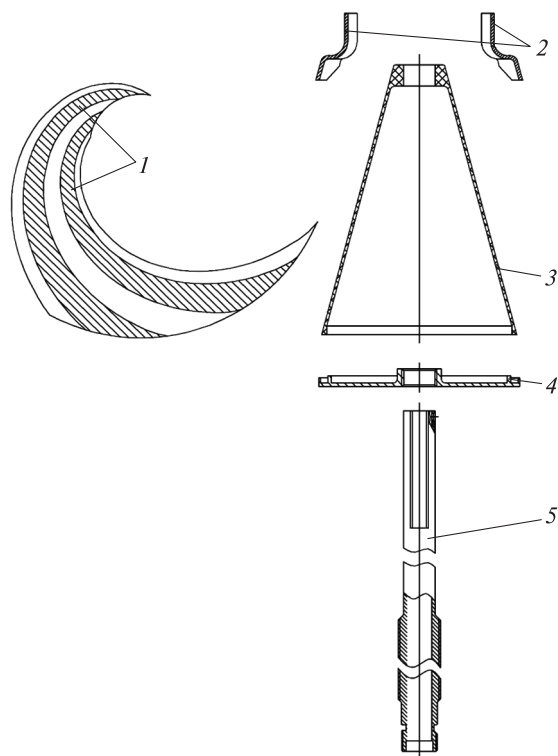
**Изготовление прототипов элементов АФУ по технологии СЛС.** Прототипы конической спиральной антенны и угловых волноводов, являющихся унифицированными элементами АФУ, изготовлены из порошков сплава AlSi10Mg на принтере модели SLM 280 HL. С учетом возможностей технологии СЛС была изменена конструкция изделий — вместо сборочных единиц разработана КД на цельные изделия. Это является несомненным достоинством данной технологии и позволяет в будущем упростить процесс проектирования и разработки КД на выпускаемые изделия.

В процессе изготовления были выработаны варианты расположения детали на рабочем столе 3D-принтера, количество и виды технологических поддержек, уточнены режимы построения.

**Коническая спиральная антенна.** По действующей технологии антенну комплектуют из нескольких сборочных единиц: конуса, выполненного из стеклотекстолита, доньшка, металлической двухзаходной спирали, наклеиваемой на конус, корпуса коаксиальной линии, в котором размещен центральный проводник, и экрана. При ее изготовлении требуется выполнять значительное количество операций: производство каркаса, наклейку спиралей на него, пайку, настройку параметров. Это увеличивает количество дефектов антенн, а также приводит к варьированию радиотехнических характеристик изделий в одной партии, в связи с чем приходится применять настроечные элементы. Внешний вид антенны приведен на рис. 2, а ее составных частей — на рис. 3.



**Рис. 2.** Внешний вид конической спиральной антенны, изготовленной по действующей технологии



**Рис. 3.** Составные части конической спиральной антенны:  
1 — двузаходная спираль; 2 — поверхность контакта; 3 — конус;  
4 — доньшко; 5 — корпус

На рис. 4 приведен изготовленный с использованием технологии СЛС прототип антенны, у которой спирали, доньшко и корпус коаксиальной линии выполнены как единая деталь. Такая антенна не имеет немагнитического конуса. Экран изготовлен традиционным способом.



**Рис. 4.** Прототип антенны,  
выполненный методом 3D-печати

**Угловые волноводы.** Изготавливаемые по действующей технологии механическим способом угловые волноводы состоят из двух частей, соединенных крепежными элементами (рис. 5).

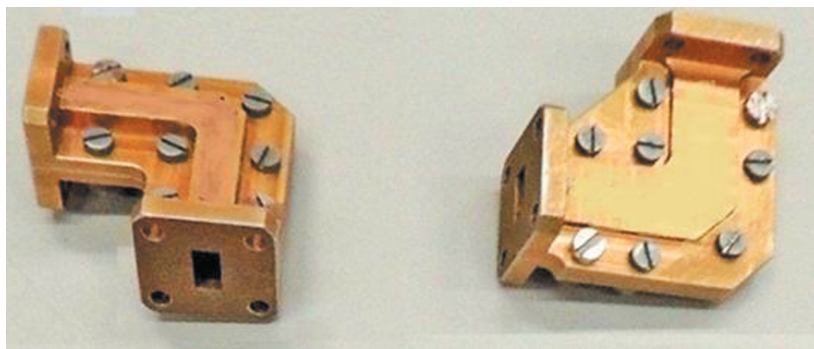


Рис. 5. Угловые волноводные переходы (действующая технология)

Угловые волноводы, изображенные на рис. 6, выполнены методом 3D-печати как цельные детали, что позволило исключить крепежные элементы и уменьшить массу. Обработку внутренних каналов при этом не проводили, шероховатость их поверхностей составляет от 15 до 25  $Ra$ , в зависимости от того, как они расположены при построении.

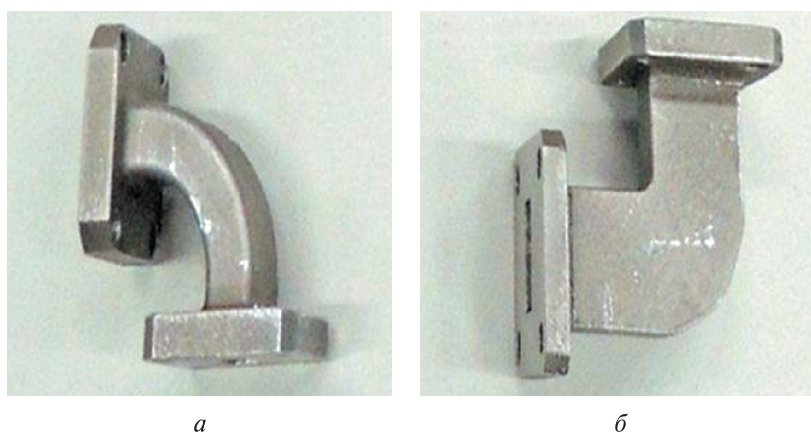


Рис. 6. Угловые волноводные переходы, изготовленные методом 3D-печати:  
а — изгиб в  $E$ -плоскости; б — изгиб в  $H$ -плоскости

Последующая обработка изготовленных с помощью технологии СЛС заготовок включает термообработку, отделение от рабочего стола, удаление поддержек и механическую обработку стыковочных плоскостей, отверстий и резьб.

**Исследования радиотехнических параметров элементов АФУ КА.** Цель исследований радиотехнических параметров изготовленных методом 3D-печати элементов АФУ КА — проверка, соответствуют ли фактические значения параметров заданным техническими условиями (ТУ) конструкторской документации (КД).

**Исследование угловых волноводов.** Проведено сравнение коэффициента стоячей волны (КСВ) и ослабления мощности сигнала угловых волноводов, выполненных по технологии СЛС, с соответствующими показателями аналогичных изделий, произведенных по действующей технологии. Измерения КСВ и ослабления мощности сигнала проводили с помощью анализатора цепей PNA-L (Keysight).

Результаты измерений параметров угловых волноводов сечением размерами  $8 \times 4,3$  мм, изогнутых в  $E$ - и  $H$ -плоскостях, приведены на рис. 7–10.

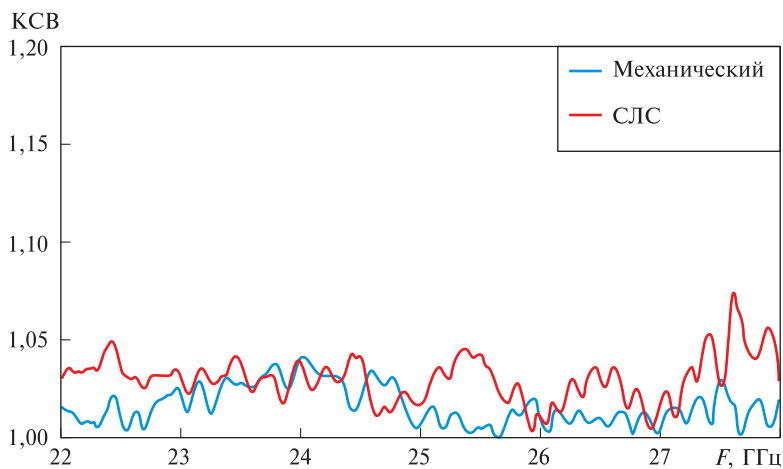


Рис. 7. Сравнительные частотные характеристики КСВ угловых волноводов, изогнутых в  $H$ -плоскости

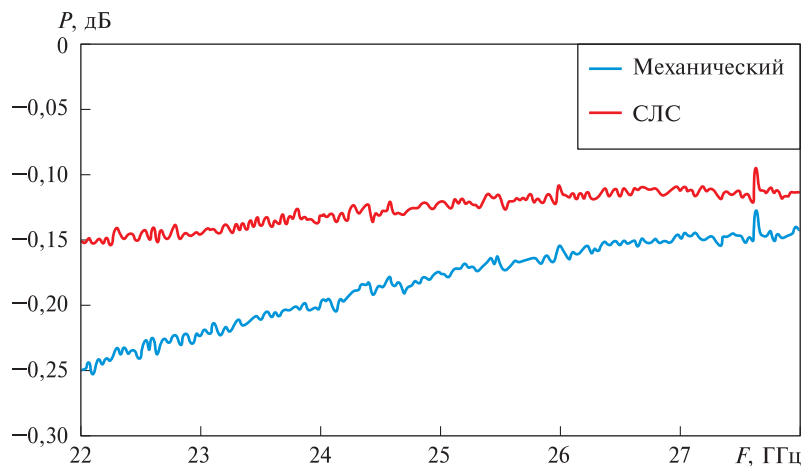
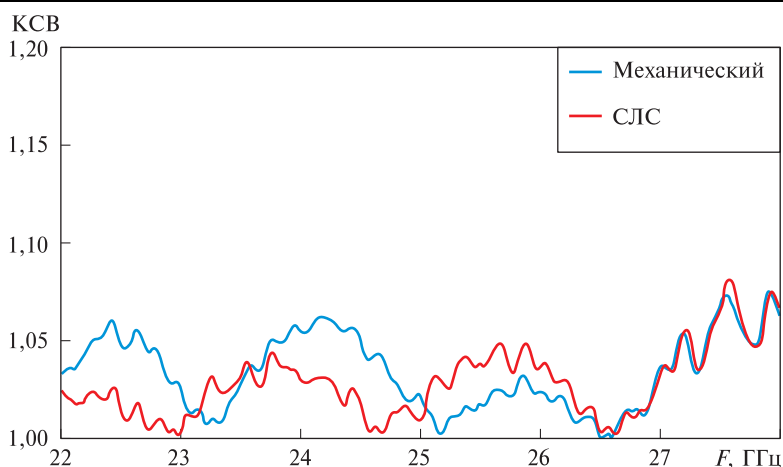
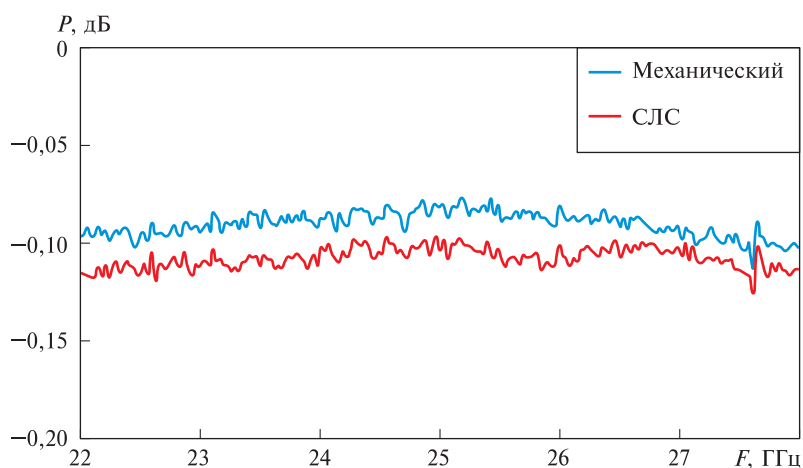


Рис. 8. Сравнительные частотные характеристики ослабления мощности сигнала угловых волноводов, изогнутых в  $H$ -плоскости





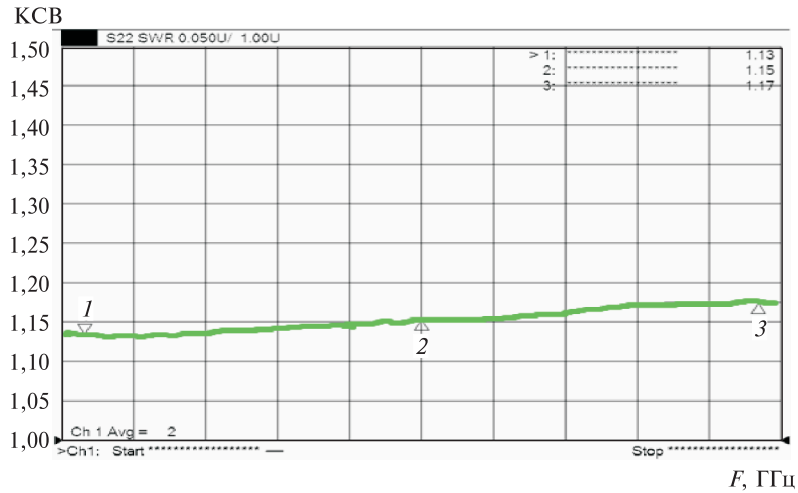
**Рис. 9.** Сравнительные частотные характеристики КСВ угловых волноводов, изогнутых в  $E$ -плоскости



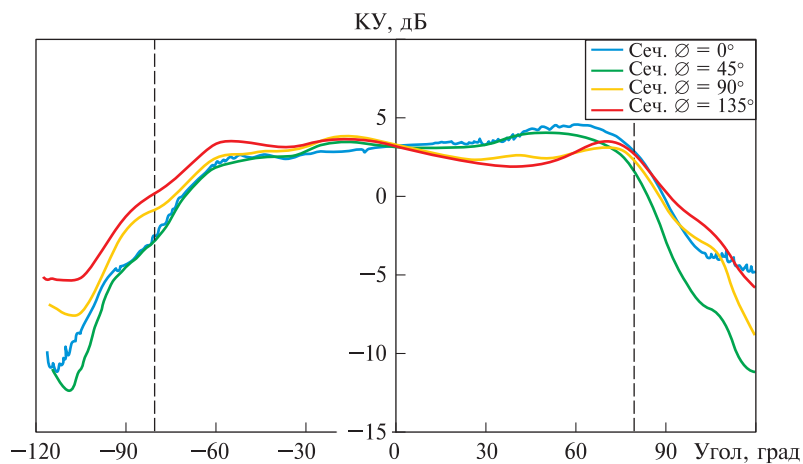
**Рис. 10.** Сравнительные частотные характеристики ослабления мощности сигнала угловых волноводов, изогнутых в  $E$ -плоскости

**Исследования конической спиральной антенны.** Проведены измерения параметров конической спиральной антенны: КСВ, получены диаграммы направленности (ДН) и коэффициента усиления (КУ) в нормальных условиях. Измерения КУ антенны проводили в безэховой камере на установке для определения характеристик излучения малонаправленных антенн, измерения КСВ — с помощью анализатора цепей PNA, ДН — по специальной методике. Исследования выполняли в нормальных условиях, а также после воздействия механических факторов в процессе транспортирования и после воздействия рабочих и циклических температур.

Результаты измерений радиотехнических параметров конической спиральной антенны приведены на рис. 11 и 12.



**Рис. 11.** Частотная характеристика КСВ спиральной антенны в рабочем диапазоне частот



**Рис. 12.** Диаграммы направленности спиральной антенны в рабочем диапазоне частот и в четырех сечениях при коэффициенте усиления в секторе углов  $\pm 80^\circ$  не менее  $-3$  дБ

В соответствии с ТУ у антенн и угловых волноводов должен быть  $КСВ \leq 1,2$ , а у спиральной антенны в диапазоне углов  $\pm 80^\circ$  должен быть КУ не менее  $-3$  дБ.

**Заключение.** На основании результатов проведенных исследований и испытаний прототипов элементов АФУ КА установлено, что значения основных радиотехнических характеристик угловых волноводов и конической спиральной антенны, изготовленных по технологии СЛС, соответствуют требованиям КД и их значения не хуже, чем у изделий, изготовленных по существующим технологиям.

Применение технологии СЛС позволяет обеспечить:

- уменьшение более чем на 50 % цикла, трудоемкости и стоимости изготовления деталей;
- снижение массы угловых волноводных переходов до 50 % и спиральной антенны до 30 %;
- значительное повышение температуры эксплуатации антенны;
- увеличение стабильности геометрии конструкции и уменьшение количества дефектов в процессе изготовления изделий.

Предлагается продолжить работы по внедрению в конструкцию космических аппаратов деталей, изготовленных по технологии селективного лазерного сплавления из отечественного порошка. Для этого необходимо провести работы по сертификации материала и по подтверждению технических характеристик изделий в условиях, имитирующих условия эксплуатации (лабораторно-отрабочные и доводочные испытания).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies*. New York, Springer Science + Business Media, 2015.
- [2] Каблов Е.Н. Аддитивные технологии — доминанта национальной технологической инициативы. *Интеллект и технологии*, 2015, № 2 (11), с. 52–55.
- [3] Неруш С.В. [Электронный ресурс].  
URL: [http://itp-forum.ru/conf2015/documents/Section\\_presentations/1\\_%D0%9D%D0%B5%D1%80%D1%83%D1%88\\_%D0%92%D0%98%D0%90%D0%9C.pdf](http://itp-forum.ru/conf2015/documents/Section_presentations/1_%D0%9D%D0%B5%D1%80%D1%83%D1%88_%D0%92%D0%98%D0%90%D0%9C.pdf)
- [4] *Wohlers Report 2015. 3D Printing an Additive Manufacturing State of the Industry*. Annual Worldwide Progress Report. 2015. URL: <http://goo.gl/5ac1d8>
- [5] Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. *Аддитивные технологии в машиностроении. Пособие для инженеров*. Москва, ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015, 220 с.
- [6] Назаров А.П. *Разработка технологического процесса изготовления сложно-профильных деталей из жаропрочного кобальтового сплава методом селективного лазерного сплавления. Автореферат*. Москва, ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2013, с. 128.
- [7] Ананьев А.И., Борщев Ю.П. и др. Инновационные технологии — в космическую отрасль. *Вестник НПО имени С.А. Лавочкина*, 2017, № 4 (38), с. 134–137.
- [8] Ананьев А.И., Борщев Ю.П. и др. Микропористость сплава AlSi10Mg, полученного методом селективного лазерного сплавления. *Технология машиностроения*, 2017, № 12, с. 5–9.
- [9] Louvis E., Fox P., Sutcliffe C.J. Selective laser melting of aluminium components. *J Mater Process Technol.*, 2011, vol. 211, pp. 275–84.
- [10] Read N., Wang W., Essa K., Attallah M.A. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development. *Mater Des.*, 2015, vol. 65, pp. 417–424.

Статья поступила в редакцию 19.03.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Борщев Ю.П., Ананьев А.И., Камышанов И.В., Телеляев Е.Н. Применение метода 3D-печати при изготовлении элементов антенно-фидерных устройств космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 9. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-9-2014>

**Борщев Юрий Петрович** — аспирант, начальник участка отдела № 323, АО «НПО Лавочкина». e-mail: [byr@laspace.ru](mailto:byr@laspace.ru)

**Ананьев Анатолий Иванович** — канд. техн. наук, главный металлург отдела № 323 АО «НПО Лавочкина». e-mail: [anai@laspace.ru](mailto:anai@laspace.ru)

**Камышанов Игорь Владимирович** — ведущий инженер-электроник отдела антенно-фидерных устройств № 536 АО «НПО Лавочкина». e-mail: [ikamyshanov@mail.ru](mailto:ikamyshanov@mail.ru)

**Телеляев Евгений Николаевич** — ведущий инженер-конструктор отдела антенно-фидерных устройств № 536 АО «НПО Лавочкина». e-mail: [eugenet1981@mail.ru](mailto:eugenet1981@mail.ru)

## Application of 3D printing method in manufacture of elements of spacecraft antenna-feeder systems

Yu.P. Borschev, A.I. Ananiev, I.V. Kamyshev, E.N. Telelyaev

Lavochkin Research and Production Association,  
Moscow region, Khimki, 141402, Russia

*The paper briefly overviews additive technologies, the results of tests and studies of the technological properties of powder materials, samples from materials obtained from powders using selective laser melting technology (SLM) based on the SLM 280 3D printer, their physical and mechanical properties. The study describes the prototypes of SLM-based elements of spacecraft antenna-feeder systems (AFS) manufactured in Lavochkin Association. Taking into account the capabilities of SLM technology, the design of the elements was changed: instead of assembly units, design documentation (DD) for one-piece products was developed. The paper introduces the results of tests of radio technical parameters of some typical AFS elements. Within the framework of studies, we assessed the following advantages of SLM technology: reduction of the cycle, labor intensity and cost of parts manufacture; reduction in weight, increase in the stability of the structure geometry and decrease in the number of defects in the process of products manufacture.*

**Keywords:** design, manufacturing, testing, helix antennas, wave guides, selective laser melting, additive technologies

### REFERENCES

- [1] Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies*. New York, Springer Science + Business Media, 2015.
- [2] Kablov E.N. *Intellect i tekhnologii – Intel & Tech*, 2015, no. 2 (11), pp. 52–55.
- [3] Nerush S.V. [Electronic resource]. Available at: [http://itp-forum.ru/conf2015/documents/Section\\_presentations/1\\_%D0%9D%D0%B5%D1%80%D1%83%D1%88\\_%D0%92%D0%98%D0%90%D0%9C.pdf](http://itp-forum.ru/conf2015/documents/Section_presentations/1_%D0%9D%D0%B5%D1%80%D1%83%D1%88_%D0%92%D0%98%D0%90%D0%9C.pdf)
- [4] *Wohlers Report 2015. 3D Printing an Additive Manufacturing State of the Industry. Annual Worldwide Progress Report*. 2015. Available at: <http://goo.gl/5ac1d8>
- [5] Zlenko M.A., Nagaytsev M.V., Dovbysh V.M. *Additivnye tekhnologii v mashinostroenii* [Additive technologies in mechanical engineering]. Moscow, FSUE NAMI Publ., 2015, 220 p.
- [6] Nazarov A.P. *Razrabotka tekhnologicheskogo protsessa izgotovleniya slozhnoprofilnykh detaley iz zharoprochnogo kobaltovogo splava metodom selektivnogo lazernogo splavleniya* [Development of a technological process for the manufacture of complex-profile parts from a heat-resistant cobalt alloy by the method of selective laser melting]. Abstract. Moscow, MSTU STANKIN Publ., 2013, p. 128.
- [7] Ananiev A.I., Borschev Yu.P., et al. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina (Bulletin of Lavochkin Association)*, 2017, no. 4 (38), pp. 134–137.
- [8] Ananiev A.I., Borschev Yu.P., et al. *Tekhnologiya mashinostroeniya (Mechanical-engineering technology)*, 2017, no. 12, pp. 5–9.
- [9] Louvis E., Fox P., Sutcliffe C.J. Selective laser melting of aluminium components. *J Mater Process Technol.*, 2011, vol. 211, pp. 275–84.

- [10] Read N., Wang W., Essa K., Attallah M.A. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development. *Mater Des.*, 2015, vol. 65, pp. 417–424.

**Borschev Yu.P.**, post-graduate student, Head of the Section, Department no. 323, Lavochkin Research and Production Association. e-mail: [byp@laspace.ru](mailto:byp@laspace.ru)

**Ananiev A.I.**, Cand. Sc. (Eng.), Chief Metallurgist, Department no. 323, Lavochkin Research and Production Association. e-mail: [anai@laspace.ru](mailto:anai@laspace.ru)

**Kamyshanov I.V.**, Lead Electrical System Engineer, Department of Antenna-Feeder Systems no. 536, Lavochkin Research and Production Association.  
e-mail: [ikamyshanov@mail.ru](mailto:ikamyshanov@mail.ru)

**Telelyaev E.N.**, Lead Design Engineer, Department of Antenna-Feeder Systems no. 536, Lavochkin Research and Production Association. e-mail: [eugenet1981@mail.ru](mailto:eugenet1981@mail.ru)