

Научная статья
УДК 621.762:629.78
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176852>

ЗАВИСИМОСТЬ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВОДОВ, ВХОДЯЩИХ В АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ, И ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ, ОТ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ КАНАЛОВ

**Юрий Петрович Борщев^{1✉}, Игорь Владимирович Камышанов²,
Валентин Константинович Сысоев³**

^{1,2,3}Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина, «НПО Лавочкина»,
Химки, Московская область, Россия

¹BorshchevIUP@laspace.ru✉

²ikamyshanov@mail.ru

³sysoev@laspace.ru

Аннотация: В настоящей работе авторами исследована зависимость шероховатости токопроводящих поверхностей каналов прямых волноводов, изготовленных с применением технологии селективного лазерного сплавления (СЛС) из отечественного порошка алюминиевого сплава AlSi10Mg, от их расположения на платформе построения 3Д принтера во время печати. Разработаны рекомендации по оптимальному расположению заготовок, в обеспечение минимальной средней шероховатости токопроводящих каналов волноводов. Также по технологии СЛС

были изготовлены угловые волноводы сантиметрового диапазона от 4,3 до 28 ГГц с размерами каналов от 8,6x4,3 до 35x15 мм, проведенные измерения их радиотехнических характеристик (РТХ) показали, что они имеют значения, соответствующие техническим требованиям конструкторской документации. Приведенные результаты исследования дают основание рекомендовать применение технологии СЛС при изготовлении определенного размера волноводов сантиметрового диапазона для антенно-фидерных систем космических аппаратов, без дополнительной обработки поверхностей каналов.

Ключевые слова: волноводы, селективное лазерное сплавление, шероховатость, радиотехнические характеристики, космические аппараты

Для цитирования: Борщев Ю.П., Камышанов И.В., Сысоев В.К. Зависимость радиотехнических характеристик волноводов, входящих в антенно-фидерные системы космических аппаратов, и изготовленных с применением селективного лазерного сплавления, от шероховатости поверхностей каналов // Труды МАИ. 2023.

№ 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176852>

Original article

DEPENDENCE OF THE RADIO TECHNICAL CHARACTERISTICS OF WAVEGUIDES INCLUDED IN THE ANTENNA-FEEDER SYSTEMS OF SPACECRAFT AND MANUFACTURED USING SELECTIVE LASER FUSION ON THE ROUGHNESS OF THE CHANNEL SURFACES

Yuri P. Borshchev^{1✉}, Igor V. Kamyshanov², Valentin K. Sysoev³

^{1,2,3}Lavochkin Research and Production Association, NPO Lavochkin, Khimki, Moscow region, Russia

¹BorshchevIUP@laspacespace.ru✉

²ikamyshanov@mail.ru

³sysoev@laspacespace.ru

Abstract. The article deals with the analysis of the of the radio technical characteristics dependence of waveguides as a part of the spacecraft antenna-feeder systems, and manufactured by selective laser fusion, on the roughness of the channels conductive surfaces. The need for this work arose as the result of the additive technology (SLM) introduction, which opened the possibility for manufacturing new, complex-profile structures of the spacecraft antenna-feeder systems elements with geometry and radio technical characteristics (RTC) close to the computed ones. However, along with numerous advantages, the SLM technology has a significant drawback, namely, the increased surface roughness (Ra) of approximately from 6.2 to 20.0 microns. At the same time, the tolerances recommended in the regulatory and reference literature for the of the conductive surfaces roughness of microwave devices are significantly lower.

The article presents the main factors of the SLM process affecting the amount of roughness, as well as the developed scheme of studies to assess the effect of roughness on the RTX of waveguides.

According to the research program, angular waveguides with channel sizes from 8,6x4,3 to 35x15 mm and transition from 8,6x4,3 to 10,7x4,3 mm, as well as straight waveguides with channel sizes of 28.5 x 12.6 mm were manufactured applying SLS technology, from domestic aluminum alloy powder, the channels surfaces herewith were not processed.

Straight waveguides, were arranged while 3D printing in groups at different angles relative to the construction platform.

Further, measurements of the RTX of the manufactured waveguides were performed, comparative diagrams of the frequency dependence in comparison with waveguides manufactured using traditional technology were adduced. The results of the RTX measurements revealed, in total, satisfactory results that meet the requirements of the design documentation. The results of the roughness measurements of the waveguide channels surfaces are presented.

Based on the waveguides data on roughness and the RTX, summarized in tables, the analysis of the roughness impact on the RTX was performed.

The analysis revealed that the waveguides RTX was deteriorates with an increase in the average roughness of the channel, which depends on the position of the part on the construction platform during 3D-printing. Optimal is the position, at which the overhanging surfaces of the channels have the smallest area.

The results of the conducted studies give grounds to recommend the SLM technology application in the AFS KA waveguides manufacturing in the centimeter range without

additional treatment of channel surfaces. It is necessary herewith to set rational modes of the SLM process.

Keywords: waveguides, selective laser fusion, roughness, radio technical characteristics, spacecraft

For citation: Borshchev Yu.P., Kamyshanov I.V., Sysoev V.K. Dependence of the radio technical characteristics of waveguides included in the antenna-feeder systems of spacecraft and manufactured using selective laser fusion on the roughness of the channel surfaces.

Trudy MAI, 2023, no. 132. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=176852>

Введение

Волноводный тракт и его элементы являются важнейшей частью антенно-фидерных систем (АФС) космических аппаратов (КА). Качество изготовления волноводов во многом определяет эффективность работы АФС КА.

В современной научно-технической литературе имеется много публикаций, в которых описаны различные методы расчета и назначения производственных допусков (технических требований) при проектировании и производстве устройств СВЧ. Производственные допуски включают в себя допуски на свойства материалов, шероховатость токопроводящих поверхностей, а также на конструкцию и сборку узлов СВЧ [1-2].

Общим для подавляющего числа типов устройств СВЧ является допуск на шероховатость поверхностей, от которой в значительной мере зависят РТХ.

Рекомендуемые в нормативной и справочной литературе допуски на шероховатость зачастую завышены и применимы к протяженным волноводным

трактам, значения рекомендуемых допусков на порядок меньше фактической шероховатости поверхности каналов, получаемой по технологии СЛС. В то же время высота микронеровностей поверхности при СЛС во много раз меньше рабочей длины волны, что позволяет говорить о микронеровностях, практически не искажающих заданной структуры электромагнитного поля, также нужно учитывать сравнительно небольшую длину волноводов, применяемых в космической технике.

С появлением аддитивной технологии селективного лазерного сплавления (СЛС) стало возможным изготовление новых, сложно-профильных конструкций антенн и устройств СВЧ, с геометрией и РТХ близкими к расчетным; [3-7] Кроме того, при изготовлении заготовок деталей по технологии СЛС, отпадает необходимость применения специальной технологической оснастки, снижается количество ручных операций, трудоемкость, цикл разработки и производства изделий. Улучшается качество связи во время эксплуатации (уменьшение поводов волноводов при перепадах температур за счет уменьшения количества сочленений в конструкции), снижается масса изделий. Наряду с достоинствами, одной из особенностей технологии СЛС является относительно высокая степень шероховатости поверхностей изделий, особенно это касается каналов волноводов сложной формы, снижение шероховатости которых затруднительно и не всегда возможно [8-12].

Целью настоящей работы является определение степени влияния шероховатости каналов СВЧ волноводов, изготовленных с применением технологии СЛС, на их РТХ.

Предметом исследования в данной работе являются прямые волноводы и их сборки, а также прототипы угловых волноводов, применяемым в АФС КА разработки АО «НПО Лавочкина».

Анализ механизмов возникновения шероховатости каналов волноводов при изготовлении их с применением технологии СЛС

Механизм образования шероховатости плоских поверхностей канала волноводов, изготовленных с применением технологии СЛС, достаточно подробно исследован [13-15]. Основными факторами, влияющими на шероховатость, являются:

- ступенчатая структура наклонных поверхностей, вследствие послойного характера построения изделия;
- неравномерность теплообмена, в зависимости от геометрии и расположения детали во время процесса СЛС;
- детализация полигональной сетки 3Д модели - совокупность вершин, рёбер и граней, которые определяют форму многогранного объекта в трёхмерной компьютерной графике и объёмном моделировании;
- расположение поверхностей канала волновода на платформе построения относительно направления синтеза.
- и конечно режимы синтеза деталей, в том числе толщина слоя порошка, шаг и траектория сканирования луча лазера.

Последовательность работ

Исследование влияния шероховатости каналов волноводов на их РТХ осуществлялось по схеме, представленной на рис.1.

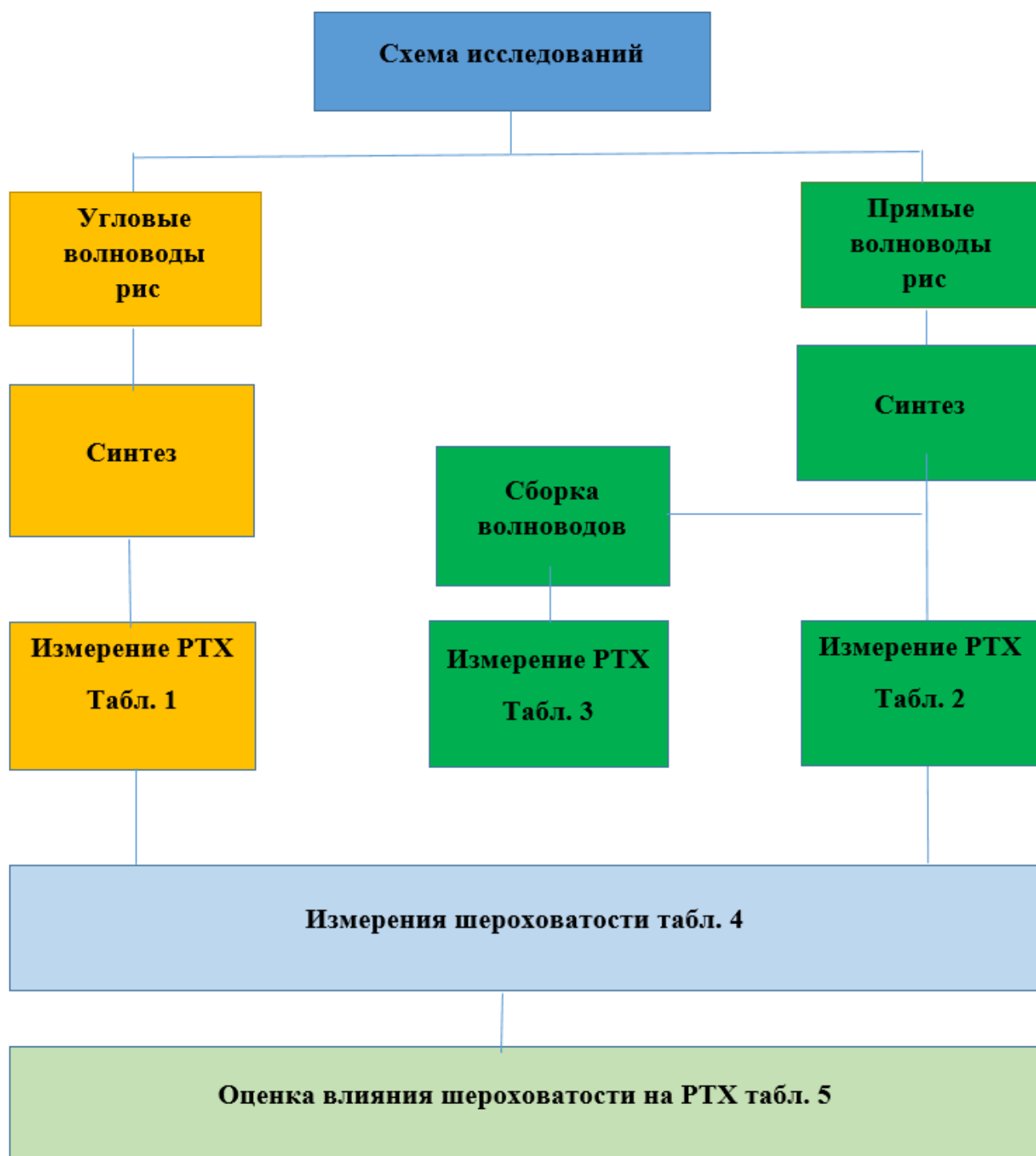


Рисунок 1. Схема проведения исследований волноводов.

Первый этап исследований – изготовление заготовок волноводов из отечественного порошка алюминиевого сплава AlSi10Mg на 3Д принтере SLM 280 NL. Предварительно были отработаны режимы сплавления данного порошка,

обеспечивающие оптимальные физико-механические свойства получаемого материала [11-12], а также проведена его паспортизация для применения в космической отрасли. После 3Д печати была произведена постобработка заготовок: термообработка, удаление технологических поддержек, механическая обработка фланцев.

Второй этап исследования – проведение измерений (сравнительных для 4-х наименований) РТХ (коэффициент стоячей волны и ослабление сигнала) волноводов с размером каналов от 8,6x4,3 до 35x15 мм и перехода с 8,6x4,3 на 10,7x4,3 мм, изготовленных с применением СЛС и по технологии с применением механической обработки. Измерения проводились в диапазоне частот от 4,3 до 28 ГГц, в качестве средства измерения использовался анализатор параметров цепей PNA-X N5242A №МУ52021912 с комплектом тестовых кабелей.

Результаты проведенных исследований РТХ угловых волноводов, приведены в таблице №1.

Таблица №1. РТХ угловых волноводов и перехода.

Размер канала углового волновода, мм.	Плоскость изгиба	Диапазон частот, ГГц	Длина по средней линии, мм.	Коэффициент стоячей волны (КСВ)		Ослабление сигнала, дБ	
				СЛС	Мехобра ботка	СЛС	Мехобра ботка
35x15	Е	4,3-8,1	106	1,025	-*	0,015	-*
28,5x12,6	Н	7-10	47	1,025	1,015	0,02	0,035

28,5x12,6	Е	7-10	63	1,04	1,035	0,025	0,014
10,7x4.3	Н	22-28	42	1,04	-*	0,025	-*
10,7x4.3	Е	22-28	35	1,035	-*	0,015	-*
8,6x4.3	Н	22-28	103	1,04	1,025	0,145	0,195
8,6x4.3	Е	22-28	57	1,04	1,035	0,14	0,095
Переход с 8,6x4,3 на 10,7x4,3		22-28	55	1,026	-*	0,05	-*

*Сравнительные измерения не проводились.

Анализируя таблицу №1, можно сделать вывод что, ослабление сигнала, при прохождении через волноводы, растет с увеличением частоты и достигает максимального значения 0,145 на частотах 22-28 ГГц, что соответствует техническим требованиям к системам АФС КА. Величина КСВ практически одинакова на указанных частотах и изменяется в размерах близких к погрешности измерения. Угловые волноводы, изготовленные с применением СЛС и механической обработкой - из двух фрезерованных частей, соединенных винтами и гайками, с более низкой шероховатостью, имеют схожие характеристики, что объясняется наличием стыка двух частей у традиционного волновода, который ухудшает РТХ, относительно расчетных значений и нивелирует преимущество по шероховатости канала.

Примеры сравнительных диаграмм частотной зависимости РТХ волноводных уголков сечением 28,5x12,6 мм изогнутых в Н плоскости приведены на рис. 2 и 3.

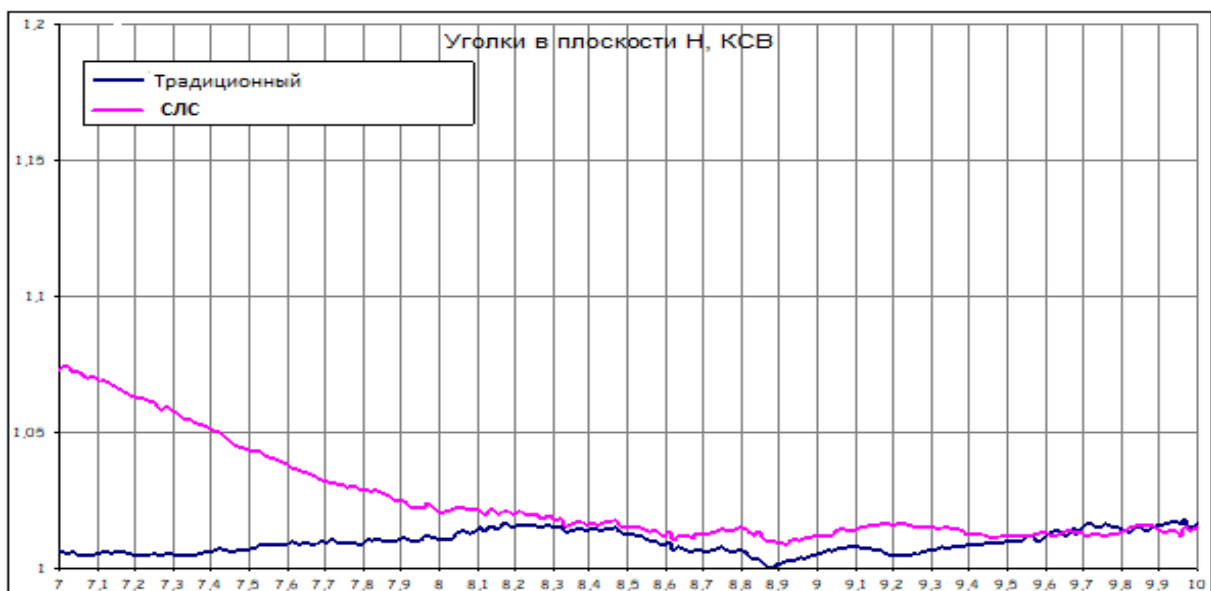


Рис. 2 Частотная зависимость КСВ уголков сечением 28,5x12,6мм, изогнутых в Н плоскости.

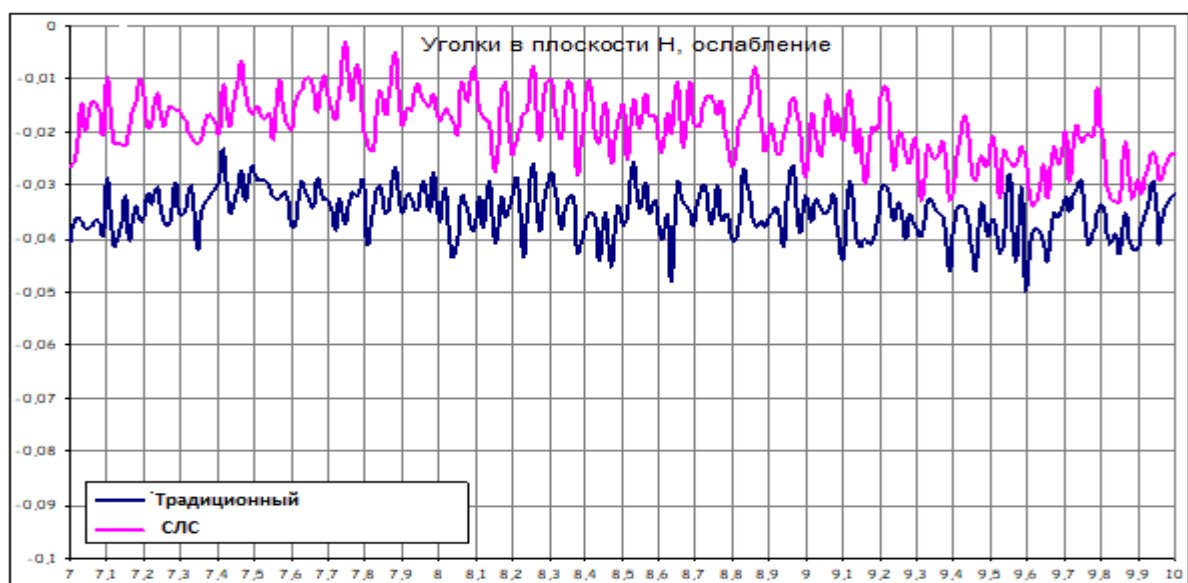


Рис. 3 Частотная зависимость ослабления уголков сечением 28,5x12,6мм, изогнутых в Н плоскости.

Далее проведены измерения РТХ 9 прямых волноводов длиной 200 мм, сечением 28,5x12,6 мм и толщиной стенки 1,5 мм. с целью определения оптимального положения волновода относительно плоскости платформы построения, при котором

РТХ имеют лучшие значения. Заготовки прямых волноводов, при 3Д печати, располагались на платформе построения тремя группами с общим наклоном 45° и с разным расположением «Е» и «Н» плоскостей канала относительно плоскости платформы построения. Схема расположения представлена на рисунке №4.

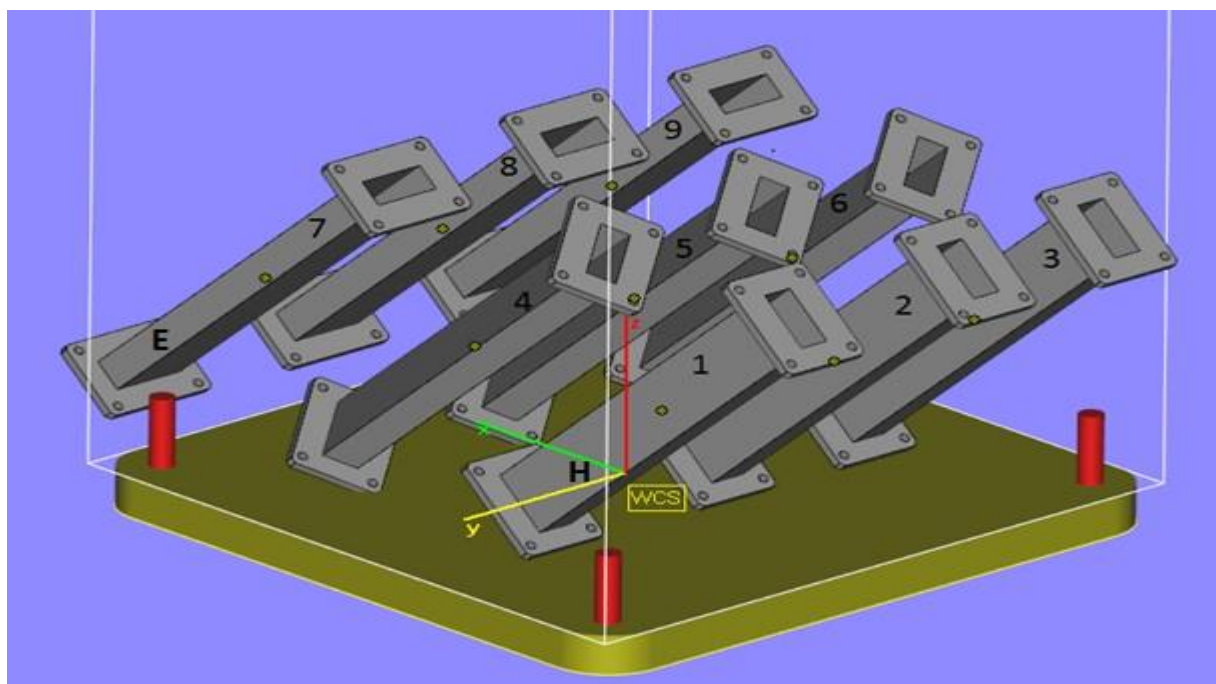


Рисунок №4. Расположение и нумерация образцов прямых волноводов на платформе построения.

Результаты произведенных измерений РТХ представлены в таблице № 2.

Таблица № 2. РТХ прямых волноводов, длина 200 мм.

Номер волновода	КСВ		Ослабление, дБ	
	Волновода	Группы волноводов	Волновода	Группы волноводов
1	1,03		0,044	
2	1,027	1,029	0,048	0,047
3	1,03		0,050	
4	1,05		0,057	
5	1,049	1,047	0,061	0,062
6	1,04		0,069	
7	1,116		0,074	
8	1,101	1,11	0,051	0,070
9	1,098		0,084	

Таким образом из данных, приведенных в таблице № 2 следует, что лучшие показатели РТХ имеют образцы № 1-3, худшие показатели у № 7-9.

Также проведены испытания РТХ трактов, собранных из двух и трех прямых волноводов, что увеличивает общую длину испытываемого тракта и позволяет более точно определить величины РТХ. Результаты показаны в таблице № 3.

Таблица № 3. Значения РТХ волноводных трактов, состоящих из 2-х и 3-х

волноводов.

Номер по порядку волновода	Коэффициент стоячей волны КСВ	Ослабление
1	1,03	-0,044
4	1,05	-0,057
1+4	1,035	-0,1
7	1,12	0,074
1+7	1,075	-0,1
1+4+7	1,08	-0,15

Результаты замеров РТХ, приведенных в таблице № 3, показывают, что коэффициент ослабления сигнала прямо пропорционален длине тракта, а КСВ зависит от средней шероховатости входящих в сборку волноводов.

На третьем этапе с помощью сканирующего микроскопа KEYENCE VK-X100 Series и профилометра Surftest SJ 210 «Mithutoyo», в соответствии с ГОСТ 2789-73, проведены замеры исходной шероховатости нависающих, вертикальных и нижних плоскостей каналов изготовленных волноводов. Результаты замеров шероховатости поверхностей прямых волноводов, изготовленных с применением технологии СЛС, приведены на рисунках 3а, б, в, г, д. Шероховатость фрезерованной поверхности приведена на рис.3е.

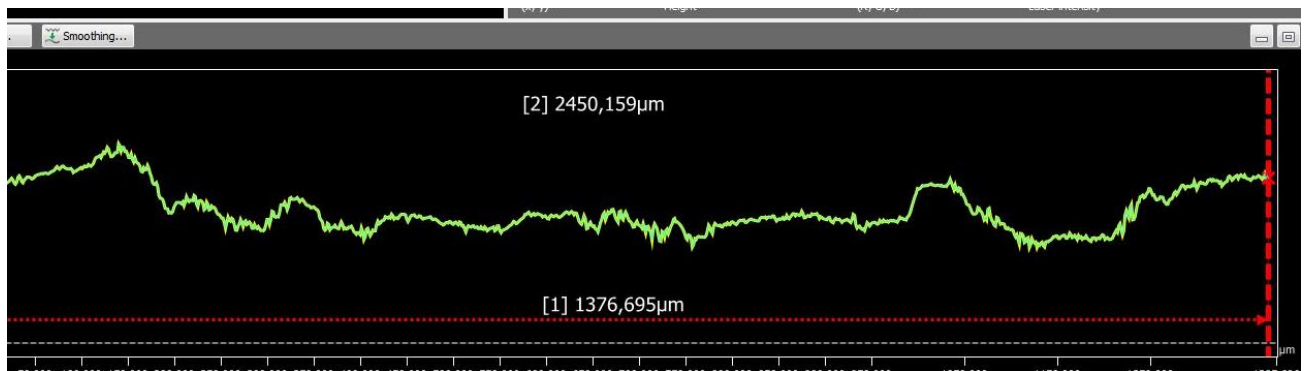


Рисунок 3а. Нависающая прямая поверхность 1-3 и 7-9 групп волноводов, шероховатость $R_a = 21,6$ мкм.

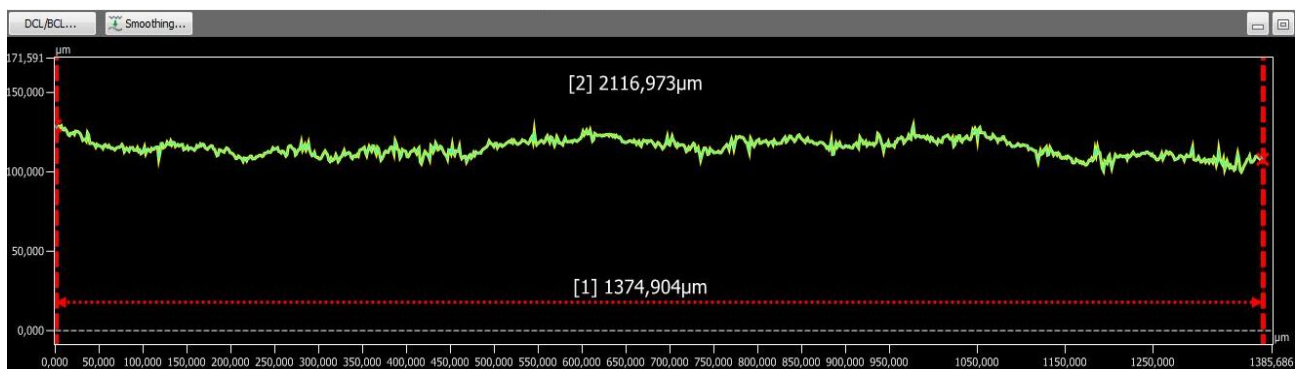


Рисунок 3б. Нижняя прямая поверхность 1-3 и 7-9 групп волноводов, шероховатость $R_a = 6,27$ мкм.

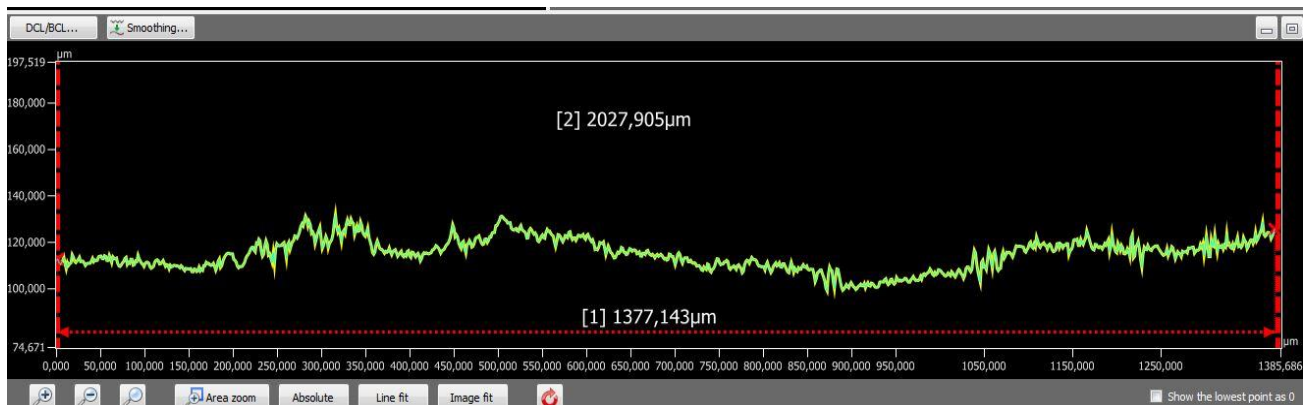


Рисунок 3в. Вертикальная прямая поверхность 1-3 и 7-9 групп волноводов, шероховатость $R_a = 6,5$ мкм.

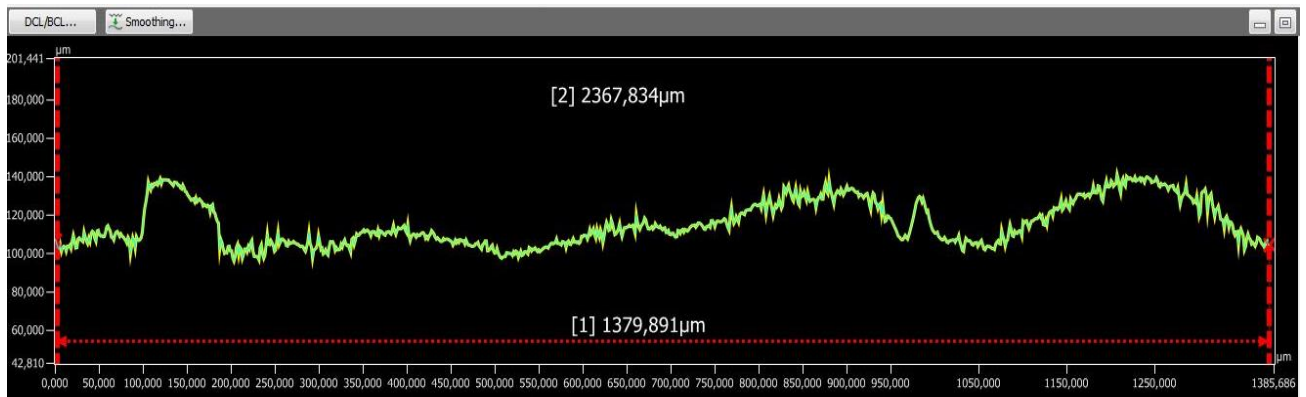


Рисунок 3г. Нависающая поверхность 4-6 группа волноводов, шероховатость $R_a = 11,3 \mu\text{мкм}$.

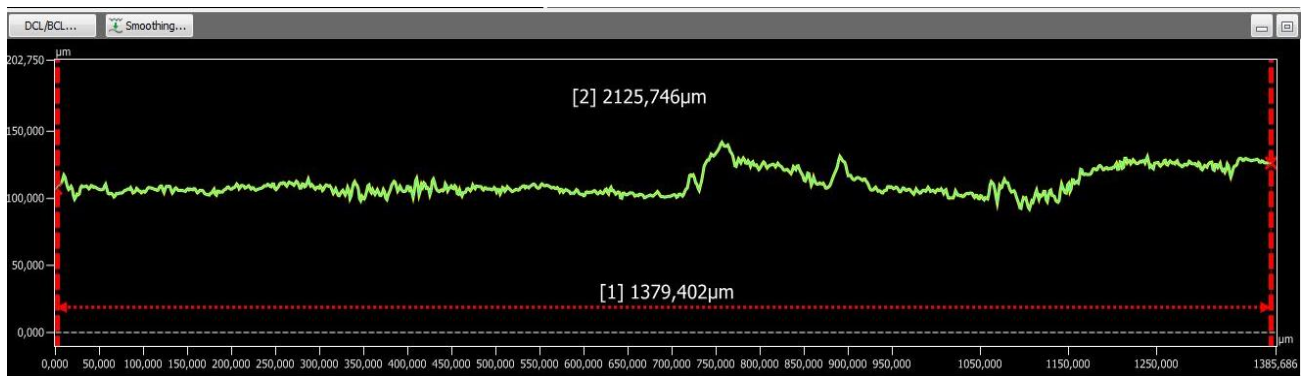


Рисунок 3д. Нижняя поверхность 4-6 группа волноводов, шероховатость $R_a = 7,29 \mu\text{мкм}$.

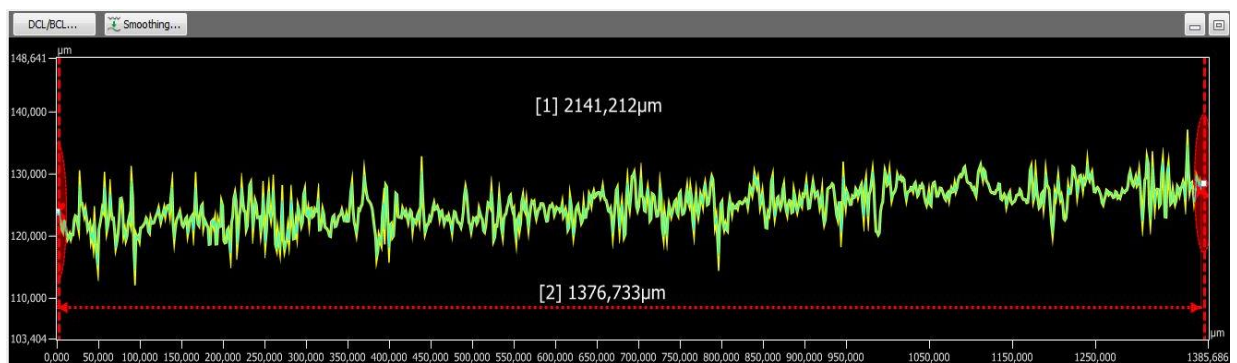


Рисунок 3е. Шероховатость уголка волноводного, фрезерованная поверхность - $R_a = 1,8 \mu\text{мкм}$.

На рисунках № 4 и 5 приведены примеры вырезанных образцов для замера шероховатости.



Рисунок 4. Пример образцов для замера шероховатости прямого волновода №7

На рисунке указаны части прямого волновода № 7: №1- нависающая поверхность, № 2 и 3 – вертикальная поверхность, № 4 – нижняя поверхность.



Рисунок № 5. Примеры вырезанных образцов угловых волноводов.

1 – волноводный уголок 8,6x4,3; 2 – волноводный уголок 10,7x4,3; 3 – волноводный уголок, изготовленный механическим способом (в разобранном виде).

Измеренные шероховатости каналов угловых и прямых волноводов, изготовленных, на одинаковых режимах, с применением технологии СЛС, имеют одинаковые значения. Таким образом на основании замеров установлено, что для волноводов № 1-3 и № 7-8 значения шероховатости поверхностей составляет: нависающая - $R_a = 21,6$ мкм, вертикальная - $R_a = 6,5$ мкм, нижняя - $R_a = 6,27$ мкм; для волноводов № 4-6 значения шероховатости поверхностей составляет: нависающая - $R_a = 11,3$ мкм, нижняя - $R_a = 7,29$ мкм.

На основании данных по шероховатости поверхностей каналов прямых волноводов и длин сторон сечения канала посчитана средняя шероховатость по группам волноводов, результаты приведены в таблице №4.

Таблица №4. Средняя шероховатость внутренних поверхностей каналов прямых волноводов после 3Д печати.

№ группы волноводов	Шероховатость поверхностей - Ra мкм. / длина стороны сечения канала мм.			
	Нависящая поверхность	Вертикальная поверхность	Нижняя поверхность	Средняя шероховатость канала
1 -3	21,63 / 12,6	6,5 / 28,5x2	6,27 / 12,6	8,8
4-6	11,3 /12.6+28,5	-	7,29 / 12,6+28,5	9,3
7-9	21,63 /28,5	6,5/12,6x2	6,27/28,5	11,7

Далее на основании данных табл.№2 и №4 составлена таблица №5, в которой приведены показатели РТХ групп прямых волноводов и их средней шероховатости.

Таблица № 5. Сводная таблица значений РТХ волноводов и средней шероховатости поверхностей их каналов.

Группа волноводов	Средняя шероховатость каналов, Ra мкм.	КСВ	Ослабление, дБ
1-3	8,8	1,029	0,047

4-6	9,3	1,047	0,062
7-9	11,7	1,11	0,070

Сводная таблица демонстрирует ухудшение значений РТХ разных групп волноводов при увеличении шероховатости канала, которая, в свою очередь зависит от расположения заготовок на платформе построения, схема которых расположения показана на рис. №2. Из вышеуказанного следует вывод, что, оптимальным положением при 3Д печати заготовок волноводов, является положение группы 1-3, которая имеет наименьшую площадь нависающей поверхности и наименьшую среднюю шероховатость. Наглядно эти зависимости представлены на диаграмме-рисунке №6.

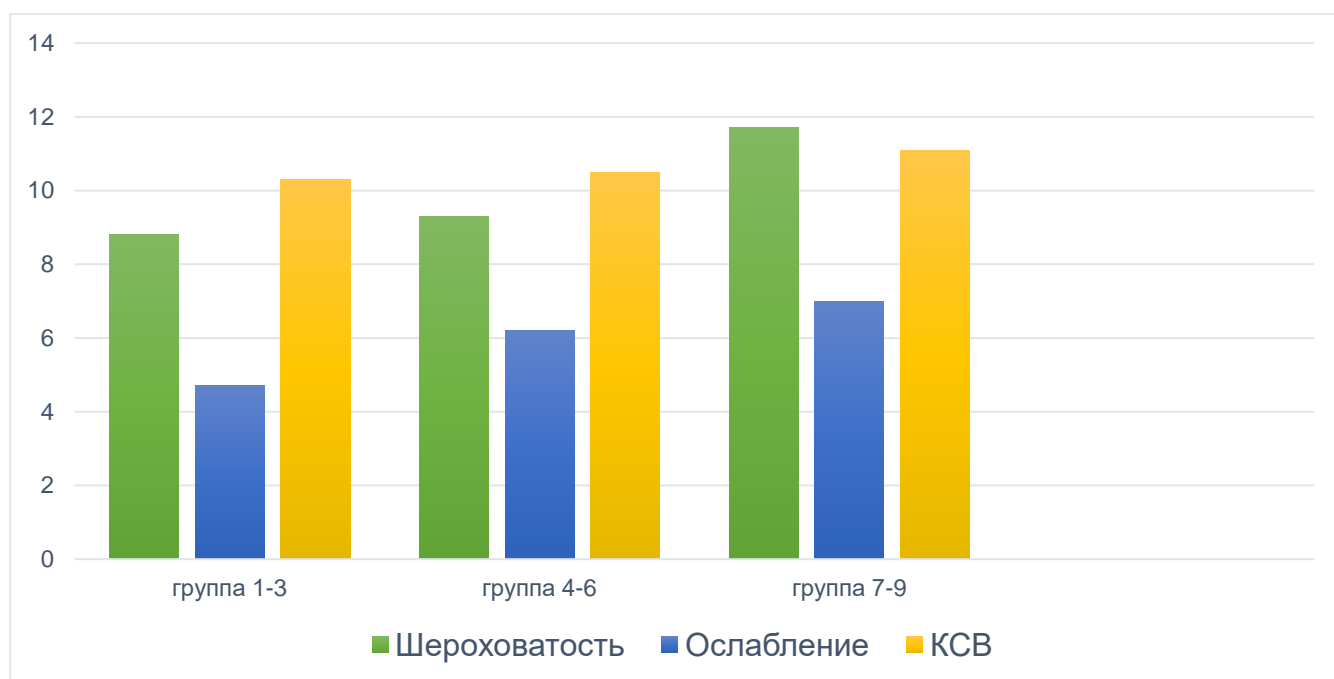


Рисунок №6. Диаграмма зависимости РТХ от шероховатости канала волновода.

Заключение

Результаты проведенных, статистическим методом, исследований показали, что изготовленные, с применением технологии СЛС, волноводы сантиметрового диапазона от 4,3 до 28 ГГц с размерами каналов от 8,6x4,3 до 35x15 мм, из отечественного порошка алюминиевого сплава AlSi10Mg, имеют удовлетворительные РТХ в пределах технических требований конструкторской документации, что дает основание рекомендовать применение технологии СЛС при изготовлении волноводов АФС КА сантиметрового диапазона, без дополнительной обработки поверхностей каналов. При этом, по возможности, в разрабатываемой стратегии построения волноводов необходимо выбирать расположение заготовки относительно платформы построения, с минимальной площадью нависающей поверхности. Всего с применением технологии СЛС были изготовлены и испытаны с положительным результатом более 45 единиц элементов АФС и антенн.

Список источников

1. Воробьев Е.А. Расчет производственных допусков устройств СВЧ. - Л.: Судостроение, 1980. - 148 с.
2. Якимов А.Н., Назаров С.В. Оценка допустимой шероховатости обработки токонесущих поверхностей на СВЧ // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2008. Т. 2. С. 112–114.
3. Бремен С., Майнерс В., Дятлов А. Селективное лазерное плавление. Технология производства будущего // Журнал лазерной техники. 2012. Т. 9. № 2. С. 33-38.

4. Серкомб Т.Б., Ли С. Селективное лазерное плавление алюминия и композитов с металлической алюминиевой матрицей // Технология материалов. 2016. Т. 31. № 2. С. 77-85.
5. Дынин Н.В., Иванова А.О., Хасиков Д.В., Оглодков М.С. Селективное лазерное сплавление алюминиевых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. 2017. № 8 (56). С. 12-23.
6. Балякин А.В., Скуратов Д. Л., Хаймович А. И., Олейник М.А. Применение прямого лазерного сплавления порошковых материалов из жаропрочных сплавов в двигателестроении // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 3. С. 202-217.
7. Борщев Ю.П., Сысоев В.К., Юдин А.Д. Анализ применения технологии селективного лазерного сплавления для изготовления структурных конструкций наноспутников CubeSat // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 3. С. 219-228.
8. Харалгин С.В., Куликов Г.В., Котельников А.Б., Снастин М.В., Добычина Е.М. Прототипирование СВЧ-устройств с заданными электродинамическими характеристиками по технологиям 3D – печати // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 1. С. 80-101. DOI: [10.32362/2500-316X-2019-7-1-80-101](https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-1-80-101)
9. Ермаков А.С., Калиничев В., Нисан А., Потапов Е., Фролова А. Опыт 3D-печати элементов волноводных СВЧ - трактов и рупорных антенн с частотой 8,5-31 ГГц // Вектор высоких технологий. 2019. № 1 (41). С. 8-19.
10. 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. № 9. С 1-14.

11. Ананьев А.И., Борщев Ю.П., Квардаков М.Ю., Куркин С.Э. и др. Формирование сложно-профильных деталей космических аппаратов методом селективного лазерного сплавления // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. 2017. № 1 (35). С. 87-92.
12. Ананьев А.И., Борщев Ю.П., Шибалов М.В., Севастьянов А.С., Курков А.А., Севастьянов А.С. Инновационные технологии – в космическую отрасль // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. 2017. № 4 (38). С. 134-137.
13. Балякин А.В., Жученко Е.И., Смирнов Г.В., Проничев Н.Д. Исследование проблем появления негативной технологической наследственности при изготовлении деталей ГТД // Известия Самарского научного центра РАН. 2019. Т. 21. № 1. С. 61-70.
14. Сухов Д.И., Неруш С.В., Беляков С.В., Мазалов П.Б. Исследование параметров шероховатости поверхностного слоя и точности изготовления изделий аддитивного производства // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 9. С. 73-84. DOI [10.18698/0536-1044-2017-9-73-84](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2017-9-73-84)
15. Сапрыкина Н.А. Анализ, моделирование и прогнозирование шероховатости поверхности меди, полученной методом селективного лазерного плавления // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. № 3 (76). С. 6-16.
16. Вернигора Л.В., Сысоев В.К., Казмерчук П.В., Дмитриев А.О. Концепция высокоточных траекторных измерений с помощью связанной системы бортового оптического дугомера-интерферометра и оптических лазерных маяков // Труды МАИ. 2021. № 121. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=162662>. DOI: [10.34759/trd-2021-121-15](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-15)

17. Вернигора Л.В., Пичхадзе К.М., Сысоев В.К. Анализ параметров излучателя оптического маяка для системы навигации космических аппаратов // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=84553>
18. Вернигора Л.В., Казмерчук П.В., Сысоев В.К., Дмитриев А.О. Методика измерения координат лунных посадочных станций с помощью оптических телевизионных средств космических аппаратов // Труды МАИ. 2020. № 114. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118986>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-12](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-12)
19. Багров А.В., Дмитриев А.О., Леонов В.А., Москатиньев И.В., Сысоев В.К. Двухволновая оптическая лунная навигационная система // Труды МАИ. 2020. № 112. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=116356>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-13](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-13)
20. Азаров А.В., Латышев А.Е., Рожков С.С., Семернин М.А., Славянский А.О., Караваев М.Н. Сравнительный анализ вариантов построения антенной решетки бортовой аппаратуры высокоскоростной радиолинии // Труды МАИ. 2023. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171392>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-10](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-10)

References

1. Vorob'ev E.A. *Raschet proizvodstvennykh dopuskov ustroystv SVCh* (Calculation of production tolerances of microwave devices), Leningrad, Sudostroenie, 1980, 148 p.
2. Yakimov A.N., Nazarov S.V. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»*, 2008, vol. 2, pp. 112–114.
3. Bremen S., Mainers V., Dyatlov A. *Zhurnal lazernoi tekhniki*, 2012, vol. 9, no. 2, pp. 33-38.
4. Serkomb T.B., Li S. *Tekhnologiya materialov*, 2016, vol. 31, no. 2, pp. 77-85.

5. Dynin N.V., Ivanova A.O., Khasikov D.V., Oglochkov M.S. *Trudy VIAM*, 2017, № 8 (56), pp. 12-23.
6. Balyakin A.V., Skuratov D. L., Khaimovich A. I., Oleinik M.A. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 3, pp. 202-217.
7. Borshchev Yu.P., Sysoev V.K., Yudin A.D. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 3. pp. 219-228.
8. Kharalgin S.V., Kulikov G.V., Kotel'nikov A.B., Snastin M.V., Dobychina E.M. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 80-101. DOI: [10.32362/2500-316X-2019-7-1-80-101](https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-1-80-101)
9. Ermakov A.S., Kalinichev V., Nisan A., Potapov E., Frolova A. *Vektor vysokikh tekhnologii*, 2019, no. 1 (41), pp. 8-19.
10. Borshchev Yu.P., Anan'ev A.I., Kamyshanov I.V., Telelyaev E.N. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2020, no. 9, pp 1-14.
11. Anan'ev A.I., Borshchev Yu.P., Kvardakov M.Yu., Kurkin S.E. et al. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina*, 2017, no. 1 (35), pp. 87-92.
12. Anan'ev A.I., Borshchev Yu.P., Shibalov M.V., Sevast'yanov A.S., Kurkov A.A., Sevast'yanov A.S. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina*, 2017, no. 4 (38), pp. 134-137.
13. Balyakin A.V., Zhuchenko E.I., Smirnov G.V., Pronichev N.D. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 61-70.
14. Sukhov D.I., Nerush S.V., Belyakov S.V., Mazalov P.B. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 2017, no. 9, pp. 73-84. DOI [10.18698/0536-1044-2017-9-73-84](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2017-9-73-84)
15. Saprykina N.A. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*, 2017,

no. 3 (76), pp. 6-16.

16. Vernigora L.V., Sysoev V.K., Kazmerchuk P.V., Dmitriev A.O. *Trudy MAI*, 2021, no.

121. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=162662>. DOI: [10.34759/trd-2021-121-15](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-15)

17. Vernigora L.V., Pichkhadze K.M., Sysoev V.K. *Trudy MAI*, 2017, no. 95. URL:

<https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84553>

18. Vernigora L.V., Kazmerchuk P.V., Sysoev V.K., Dmitriev A.O. *Trudy MAI*. 2020. №

114. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118986>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-12](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-12)

19. Bagrov A.V., Dmitriev A.O., Leonov V.A., Moskatin'ev I.V., Sysoev V.K. *Trudy MAI*,

2020, no. 112. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=116356>. DOI:

[10.34759/trd-2020-112-13](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-13)

20. Azarov A.V., Latyshev A.E., Rozhkov S.S., Semernin M.A., Slavyanskii A.O.,

Karavaev M.N. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. URL:

<https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171392>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-10](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-10)

Статья поступила в редакцию 22.09.2023

Одобрена после рецензирования 29.09.2023

Принята к публикации 27.10.2023

The article was submitted on 22.09.2023; approved after reviewing on 29.09.2023; accepted for publication on 27.10.2023