

Применение 3D-печати для изготовления элементов радиоэлектронной аппаратуры космического назначения

А. Е. Тюлин, д. э. н., к. т. н., профессор, contact@spacecorp.ru
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Г. А. Ерохин, к. т. н., contact@spacecorp.ru
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. В. Павлов, pavlov_av@spacecorp.ru
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. А. Горбунов, contact@spacecorp.ru
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Тюлькова, tyulkova_aa@spacecorp.ru
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

О. Н. Смирнова, smirnova_on@spacecorp.ru
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье приводятся сведения о возможных методах и материалах для использования 3D-печати в ракетно-космическом приборостроении. Приводится оценка экономических показателей 3D-печати в сравнении с традиционной технологией. Рассмотрены три возможных направления применения 3D-печати: макетирование (прототипирование), изготовление изделий, печать в условиях космического пространства. Представлены результаты инициативных работ по изготовлению элементов радиоэлектронной аппаратуры из металлических порошков методом 3D-печати, проводимых АО «Российские космические системы». Результаты выполненных работ показали конкурентоспособность напечатанных изделий и необходимость проведения их постобработки. Указаны проблемные вопросы применения 3D-печати и предложены пути их решения.

Ключевые слова: ракетно-космическое приборостроение, радиоэлектронная аппаратура, 3D-печать, аддитивное производство, производство в космосе

The Use of 3D Printing for the Manufacture of Radio Electronic Equipment Elements for Space Application

A. E. Tyulin, *Dr. Sci. (Econ.), Cand. Sci. (Engineering), Prof., contact@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

G. A. Erokhin, *Cand. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. V. Pavlov, *pavlov_av@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

V. A. Gorbunov, *contact@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. A. Tyulkova, *tyulkova_aa@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

O. N. Smirnova, *smirnova_on@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The article provides information about possible methods and materials for the use of 3D printing in the rocket and space device industry. The economic performance of 3D printing in comparison with traditional technology is assessed. Three possible applications of 3D printing are considered: modeling (prototyping), product manufacturing and space printing. The paper presents the results of the initiative efforts on the production of radio electronic equipment elements from metal powders by 3D printing carried out by Joint Stock Company "Russian Space Systems". The results of the work performed showed the competitiveness of the printed items and necessity of their post-processing. The problematic issues of 3D printing application are indicated and ways to solve them are proposed.

Keywords: rocket and space device engineering, radio electronic equipment, 3D printing, additive manufacturing, production in space

Введение

Космическая промышленность является наукоемкой отраслью, в связи с чем развитие ракетно-космического приборостроения (РКП) нуждается в активном освоении прогрессивных производственных процессов, обеспечивающих использование всех преимуществ современных цифровых технологий, к которым относится 3D-печать.

Бортовая и наземная радиоэлектронная аппаратура (РЭА) может включать составные части сложной пространственной конфигурации, которые изготавливаются методами механической обработки заготовок с применением сборочных операций (сварка, пайка, винтовые соединения), что является длительным и трудоемким процессом, а также влияет на точность, что приводит к ухудшению характеристик изделий. В связи с этим 3D-печать обладает рядом ключевых для данной отрасли достоинств:

- уменьшение себестоимости изделий по причине сокращения производственного цикла и низкого расхода материалов;
- уникальность получаемых изделий благодаря новым возможностям конструирования, появившимся за счет снятия ряда ограничений, вносимых стандартной технологией;
- гибкость производства вследствие выпуска малых партий изделий с минимальными затратами времени на переналадку;
- повышение эффективности производства ввиду снижения затрат на сборочно-монтажные операции и упрощения внутрицеховой логистики;
- уменьшение требований к обеспечению условий производства (величины показателей микроклимата, классы чистоты производственных помещений и т. п.);
- сокращение сроков разработки и изготовления новых изделий с одновременным улучшением качества.

Кроме того, предполагается, что внедрение технологий трехмерной печати позволит приблизить внутреннюю организацию предприятий к концепции Индустрии 4.0. Подобный подход к производственной деятельности кардинально изменит способ управления производственными процессами и будет способствовать переходу от тяжелого (а иногда даже вредного) низкоквалифицирован-

ного труда к экологичному («зеленому») производству с привлечением высокопрофессиональных специалистов.

В связи с тем, что в рамках одной статьи не представляется возможным рассмотреть все аспекты применения 3D-печати для изготовления элементов радиоэлектронной аппаратуры, информация будет поделена на несколько частей. Каждая часть будет являться самостоятельной статьей, посвященной определенной теме с приведением результатов практического опыта АО «Российские космические системы» и объединенной с остальными общей тематикой.

Известные методы 3D-печати и их классификация

В соответствии с ГОСТ Р 57558 все методы 3D-печати разделены по типам процессов на 7 категорий. За время действия национального стандарта количество разновидностей методов 3D-печати превысило сотню, причем большинство из них копирует принцип формирования изделия, но изменяет название.

Для изготовления деталей РЭА из металлов могут быть применены методы 3D-печати, относящиеся к двум категориям процессов:

1) «синтез на подложке» — селективное лазерное сплавление, СЛП (Selective Laser Melting, SLM); прямое лазерное плавление металлов, ПЛПМ (Direct Metal Laser Melting, DMLM); прямое лазерное спекание металлов, ПЛСМ (Direct Metal Laser Sintering, DMLS);

2) «прямой подвод энергии и материала» — непосредственное нанесение металла, ННМ (Direct Metal Deposition, DMD); проволочное электронно-лучевое аддитивное производство, ПЭЛАП (Wire-feed Electron-Beam Additive Manufacturing, EBAM); селективное электронно-лучевое сплавление, СЭЛС (Electron Beam Melting, EBM).

Наиболее перспективным методом 3D-печати для изготовления деталей РЭА из металлических материалов, по мнению авторов, является метод СЛП, поскольку применяемые в данном методе 3D-печати порошки металлов производятся несколькими российскими компаниями, не являются дефи-

цитными, а также потому, что данный метод позволяет получить детали с наибольшей точностью размеров и наименьшей шероховатостью поверхности по сравнению с другими методами 3D-печати. В данном методе САD-модель изделия разбивается на слои от 30 до 100 мкм, на платформу построения наносится слой порошка, затем лазерный луч, сфокусированный на слое порошка, расплавляет его частицы, которые при последующей кристаллизации формируют твердую массу, в соответствии с геометрией текущего сечения изделия. Процесс происходит до тех пор, пока не будут изготовлены все слои изделия [1]. В русскоязычной технической литературе можно встретить такие названия описанного метода, как выборочное лазерное сплавление, селективное лазерное плавление, выборочная лазерная плавка; в англоязычной — L-PBF (Laser Powder Bed Fusion), LBM (Laser Beam Melting).

Для изготовления деталей РЭА из полимерных материалов могут быть применены методы 3D-печати, относящиеся к двум категориям процессов:

- 1) «экструзия материала» — послойное наложение филамента, ПНФ (Fused Deposition Modeling, FDM);
- 2) «фотополимеризация в ванне» — лазерная стереография, ЛС (Stereolithography, SLA).

Наиболее перспективным методом 3D-печати для изготовления деталей РЭА из полимерных материалов, по мнению авторов, является метод ПНФ, так как применяемые в данном методе 3D-печати филаменты обладают широким диапазоном характеристик, производятся несколькими российскими компаниями, не являются дефицитными, а также потому что данный метод является самым простым в реализации и наиболее изученным по сравнению с другими методами 3D-печати полимерными материалами. Данный метод представляет собой соединение последовательно наложенных слоев разогретого до вязкотекучего состояния филамента (сырьевого материала в виде нити), который послойно подается через сопло при нагреве в соответствии с управляющей программой 3D-принтера [2]. В русскоязычной технической литературе можно встретить такие названия описанного метода, как послойное наложение филамента, послойный синтез, послойная укладка полимера; в англоязыч-

ной — FFF (Fused Filament Fabrication), FLM (Fused Layer Modeling/Manufacturing), PJP (Plastic Jet Printing).

Для изготовления печатных плат (ПП), т. е. изделий, требующих печати несколькими функциональными материалами, могут быть применены методы двух категорий процессов:

- 1) «экструзия материала» — ПНФ, прямое нанесение материала (Direct Ink Writing, DIW);
- 2) «струйное нанесение материала» — аэрозольное нанесение материала (Aerosol Jet Printing, AJP), капельное нанесение материала (Drop on Demand, DOD).

Подробнее каждый из методов и особенность его применения для изготовления ПП описаны в соответствующих статьях из цикла [3]. Ввиду существующей возможности создания ПП 5 класса точности наиболее перспективным, по мнению авторов, является метод капельного нанесения материала.

Расходные материалы и оборудование

Указанные в предыдущем разделе методы отличаются не только по возможности обеспечения параметров изделия, но и по применяемым материалам.

Для изготовления деталей РЭА из металла наибольший интерес представляет 3D-печать цветными сплавами. Наиболее применяемыми в 3D-печати являются алюминиевый сплав AlSi10Mg и титановый сплав Ti6Al4V, а перспективными — алюминиевые сплавы с содержанием редкоземельных металлов, разрабатываемые в настоящее время как в России, так и за рубежом и имеющие механические характеристики, не уступающие титановым сплавам. Полуфабрикат указанных расходных материалов может иметь вид порошка (для СЛП, ННМ), прутка или проволоки (для ПЭЛАП).

Среди полимерных материалов наибольший интерес представляют высокотемпературные полимеры, такие как полиэфирэфиркетон (РЕЕК) и полиэфиримид (РЕИ). К перспективным можно отнести материалы, в состав которых входит углерод или стекловолокно. Полуфабрикат указанных расходных материалов может иметь вид порошка (для СЛС) или филамента (для ПНФ).

Для изготовления ПП по методам, относящимся к категории процессов «струйная печать», обычно применяются чернила различной вязкости (варьируется в зависимости от метода). Для формирования элементов проводящего рисунка обычно применяют материалы, в состав которых входит серебро или графен (реже), для диэлектрических элементов — специально разработанные составы или керамосодержащие материалы. Для реализации некоторых методов требуется наличие подложки (например, стеклотекстолита FR).

Расходные материалы для изготовления деталей РЭА из металлов или пластиков производят как в России, так и за рубежом; для изготовления ПП — за границей. Стоит отметить, что стоимость материалов для 3D-печати может до 20 раз превышать цену материалов для традиционных технологий.

Для изготовления деталей РЭА из металлов или пластиков применяют промышленные 3D-принтеры, стоимость которых зависит от размера области построения изделия, метода печати и дополнительных опций. 3D-принтеры для печати металлами или пластиками производят как в России, так и за рубежом. Для изготовления ПП существует специализированное оборудование иностранных производителей, имеющее программное обеспечение, разработанное для нужд электроники.

Однако для обеспечения требований, предъявляемых к аппаратуре РКТ, одного 3D-принтера недостаточно. Для элементов РЭА из металлов или пластиков необходим участок постобработки, а для ПП — вакуумная печь или сушильный шкаф (нередко требуется для улучшения проводимости печатных проводников).

Оценка экономических показателей 3D-печати

На стоимость любого изделия влияют такие факторы, как время изготовления и затраты на расходные материалы и оплату труда. В рассматриваемом аспекте одной из особенностей 3D-печати является необходимость формирования на 3D-модели изделия технологических поддержек, выполняющих функции поддерживающих технологических

элементов, на которых строятся сложнопрофильные изделия с нависающими поверхностями, внутренними полостями или тонкими стенками, которые отделяются от изделия после завершения построения. Поддержки нужны не только для того, чтобы предотвратить перекося изделия во время печати, но и в некоторых случаях для обеспечения теплоотвода (актуально для изделий, изготавливаемых методом СЛП). Объем поддержек в зависимости от конфигурации изделия может составлять от 2 до 50% общего объема печати, что, в свою очередь, оказывает значительное влияние на конечную стоимость изделия.

Были разработаны три модели волноводного фильтра X-диапазона (ВФХд). Для каждой модели разработан комплект конструкторской документации (КД), ориентированный на изготовление фильтра с применением традиционных технологий (ТТ) механической обработки, и комплект КД, ориентированный на изготовление фильтра методом 3D-печати (3D).

Для каждой модели волноводного фильтра и технологии изготовления проведена оценка стоимости и сроков изготовления (табл. 1).

Из таблицы следует, что изготовление деталей РЭА методом 3D-печати заняло меньшее количество времени и потребовало меньшего количества операций по сравнению с изготовлением деталей по традиционным технологиям.

Макетирование (прототипирование)

При модернизации или создании нового изделия у разработчика может возникнуть несколько вариантов будущей конструкции, которые аналитически (с помощью моделирования в программной среде) прошли проверку на выполнение заложенных требований. В такой ситуации для выбора наиболее оптимального варианта приходится прибегать к макетированию (прототипированию) изделия. В основном макеты (прототипы) применяются для демонстрации качества полученных конструкторских решений при выполнении опытно-конструкторских работ, но возможны и другие применения. Например, прототипы корпусов, кронштейнов и элементов систем передачи высокочастотных и сверхвысокочастотных сигналов.

Таблица 1. Сравнение технологий изготовления изделий из металлов

Параметр сравнения	Габаритные размеры прототипа, длина × ширина × высота, мм	Суммарный объем материала прототипа и поддержек для 3D-печати, см ³	Сроки изготовления, ч		Себестоимость изготовления, тыс. руб.		Конструкционная сложность	
			3D	ТТ	3D	ТТ	3D	ТТ
ВФХд	130 × 48 × 48	79,6	~19	~168	~50	~250	1 деталь 1 операция	15 деталей 7 операций
ВФХд с подавлением второй полосы пропускания	69,4 × 48 × 60,9	41,7	~12	~252	~27	~400	1 деталь 1 операция	13 деталей 9 операций
ВФХд с широкой полосой заграждения	76,5 × 48 × 48	156,3	~13	~336	~30	~600	1 деталь 1 операция	25 деталей 18 операций

стотных (ВЧ- и СВЧ-) сигналов позволяют проверить технологичность конструкции и собираемость изделия, а прототип ПП — найти ошибки в схеме.

Отработка новых конструкторских решений, производимая при разработке или модернизации деталей РЭА, занимает большое количество времени, при этом возникают затруднения при изготовлении образцов новых изделий на производстве в связи со сложностью в закупке небольшого количества материалов требуемого сортамента, грузкой производственных мощностей при изготовлении основной продукции.

Применение 3D-печати для изготовления элементов РЭА может решить данные проблемы при условии тщательной отработки технологии.

3D-печать для изготовления деталей РЭА космического применения

Особенностью деталей РЭА являются ограниченные линейные размеры (в основном до 500 мм, согласно отраслевым стандартам), единичное производство и высокая сложность формы деталей. Кроме того, данные изделия должны отвечать требованиям отраслевых стандартов по точности размеров

и шероховатости поверхности (точность размеров от 0,02 до 0,1 мм, допуски расположения поверхностей — от 0,02 мм, шероховатость поверхностей от Ra 0,8 мкм до Ra 6,3 мкм).

За рубежом проведен ряд исследований, посвященных оценке возможности применения 3D-печати для изготовления деталей РЭА. Сведения о некоторых успешно созданных деталях из металлических материалов и многокомпонентных сплавов представлены в табл. 2, деталях из неметаллических материалов — в табл. 3.

Измеренные в работах [4, 17, 20] характеристики деталей РЭА (коэффициент отражения, потери при заданной частоте) хорошо согласуются с их расчетными значениями, что позволяет использовать метод 3D-печати для изготовления соответствующих изделий.

В России также проводятся исследования в данном направлении. Например, Ю.П. Борщев и др. [31] недавно опубликовали данные об изготовлении прототипов элементов антенно-фидерных устройств из алюминиевого сплава AlSi10Mg по технологии СЛП: конической спиральной антенны и волноводных переходов.

А. Нисан [32] представил результаты изготовления методом СЛП волноводного разветвителя, кронштейна, фильтров, корпусов с каналами охлаждения и рупорных антенн.

Таблица 2. Примеры деталей РЭА из металлов, созданных за рубежом

Изделие	Метод 3D-печати	Материал	Источник
Волноводы	ПЛСМ	Нержавеющая сталь 316L	[4]
	СЛП	Алюминиевые порошки	[5]
Линия передачи	СЛП	AlSi10Mg	[6]
Корпус спутника	СЛП	AlSi10Mg	[7]
Кронштейн отражателя	СЛП	Титановый сплав	[8]
Рупорные антенны	СЭЛС	—	[9]
	СЛП	AlSi10Mg	[10, 11]
Рупорная антенна с поляризатором	ПЛСМ	AlSi10Mg	[12]
Поляризаторы	СЛП	AlSi10Mg	[11]
Теплообменники	СЛП	Титановые и никелевые сплавы	[4]
Фильтры	СЛП	AlSi10Mg	[5, 8, 11, 13]
	СЛП	Scalmalloy	[14]
Волноводные фильтры	СЛС	Сталь 17-4PH	[15]
	СЛП	Алюминиевые сплавы, никелевые бронзы с покрытием серебром или никелем	[16]
Щелевые антенны	ПЛПМ	AlSi9	[17]
	ПЛСМ	AlSi10Mg	[18]
	СЛП	AlSi10Mg	[19]
Антенны	СЛП, ННМ, ПЭЛАП	Алюминиевые сплавы	[5]
Антенная решетка	ПЛСМ	AlSi10Mg	[20]
Резонаторы	СЛП	Алюминиевые порошки	[5]
Преобразователи	СЛП	Алюминиевые сплавы, никелевые бронзы с покрытием серебром или никелем	[16]

А. Ермаков с соавт. [2] опубликовали значения характеристик СВЧ-сумматоров и рупорных облучателей, изготовленных методом СЛП.

Кроме того, отечественные исследователи рассматривают возможность изготовления корпусов малых космических аппаратов (КА) из полимерных и композитных материалов с последующим нанесением металлических покрытий гальваническим способом как альтернативу более дорогому и длительному в сравнении с ним процессу 3D-печати

металлами. Н. А. Глушко с соавторами [34] продемонстрировали возможность изготовления корпуса спутника архитектуры CubeSat из композитного материала (углепластика) с применением запатентованной технологии композитного соэкструзионного наплавления нитей (Composite Filament Co-extrusion, CFC). Причем сообщается, что масса изготовленного корпуса была меньше на 34% в сравнении с алюминиевым аналогом, изготовленным по традиционной технологии [34].

Таблица 3. Примеры деталей РЭА из неметаллических материалов, созданных за рубежом

Изделие	Метод 3D-печати	Материал	Источник
Волноводы	ПНФ	Полимерные смолы	[5]
	ПНФ	ABS, покрытие — химический никель (3 мкм) и гальваническая медь (27 мкм)	[21]
	ПНФ	ABS, покрытие — серебряные чернила	[22]
	ПНФ	PLA с покрытием	[23]
	ЛС	3DS светоотверждаемая акриловая смола с серебряными чернилами	[24]
	ЛС	Accura Xtreme Resin, покрытие — химический никель (3 мкм) и гальваническая медь (27 мкм)	[21]
Волноводные фильтры	ЛС	Полимеры с рисунком проводящими чернилами или химическим покрытием	[16]
	ПНФ	ABS, покрытие — серебряные чернила	[25]
Фильтр	ЛС	Резина, наполненная керамикой (Smos PerForm), покрытие — медь (10 мкм)	[26]
Волноводная щелевая антенна	ЛС	3DS светоотверждаемая акриловая смола, покрытие — серебряные чернила	[24]
Рупорная антенна	ПНФ	ABS, покрытие — медные либо серебряные чернила	[25, 27, 28]
Антенны	ЛС	Полимерные смолы	[5]
	ПНФ	ABS, покрытие — медные проводящие чернила и гальваническая медь	[29]
	ПНФ	Полимеры (ABS, PLA) с рисунком проводящими чернилами	[16]
Управляемая фазированная антенная решетка	ПНФ	PLA, покрытие — гальваническая медь (20 мкм)	[30]
Рупорные облучатели	ЛС	Полимеры с рисунком, выполненным проводящими чернилами или химическим покрытием	[16]
	ПНФ	Полимеры (ABS, PLA) с рисунком проводящими чернилами	[16]

Таким образом, в сфере космического приборостроения 3D-печать может быть применена для изготовления конструктивных элементов корпусов приборов и космических аппаратов, деталей систем передачи ВЧ- и СВЧ-сигналов. Однако в настоящее время в рассматриваемой области зарубежные и отечественные компании не осуществляют серийный выпуск изделий, а в основном занимаются поисковыми работами в данной области и изготовлением макетных образцов и прототипов.

Опыт применения 3D-печати металлами в АО «Российские космические системы»

В АО «Российские космические системы» в рамках инициативных работ были разработаны конструкции и совместно с ООО «Остек-СМТ» изготовлены около 20 прототипов элементов СВЧ-трактов и деталей корпусов приборов, некоторые из которых представлены на рисунке.

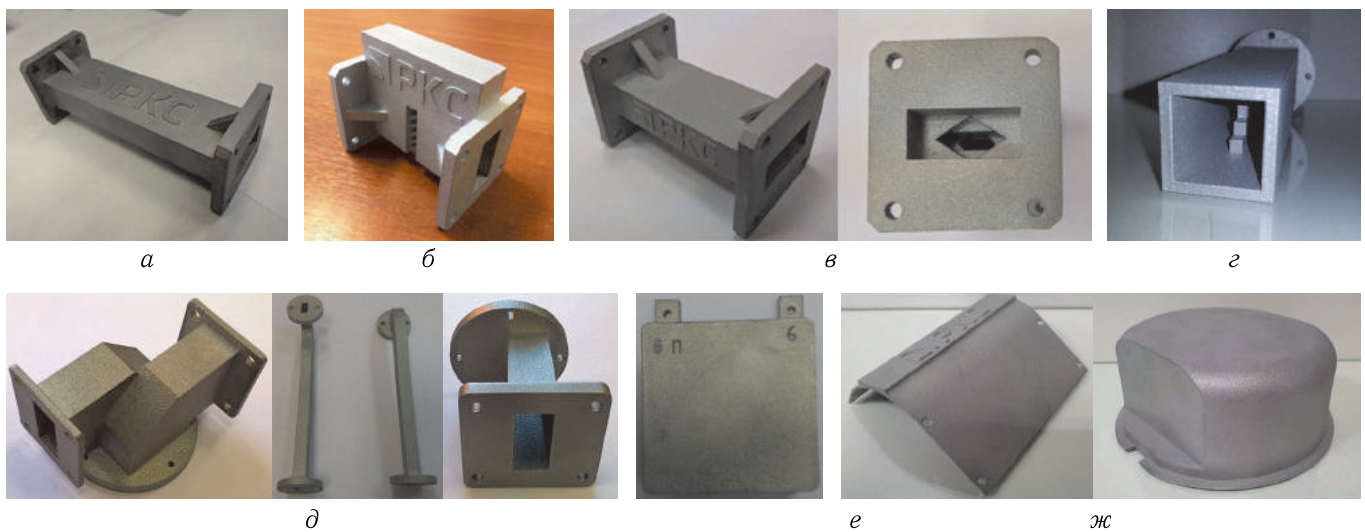


Рисунок. Примеры прототипов деталей РЭА, изготовленных методом 3D-печати для АО «Российские космические системы»: а — ВФХд, б — ВФХд с подавлением второй полосы пропускания, в — ВФХд с широкой полосой заграждения, г — двухканальный облучатель X-диапазона, д — волноводы, е — корпус, ж — крышки наноспутников

Для реализации процесса печати был выбран метод СЛП. В качестве расходного материала применялся порошок алюминиевого сплава AlSi10Mg.

После изготовления были проведены контрольные измерения, часть результатов которых представлена в табл. 4. Несоответствие полученных значений требованиям КД свидетельствует о необходимости постобработки напечатанных изделий.

Измеренные электрические характеристики макетных образцов ВФХд, ВФХд с подавлением второй полосы пропускания, ВФХд с широкой полосой

задержания, работающих при частоте 8,2 ГГц и изготовленных методом 3D-печати, хорошо согласуются с результатами, полученными в системе электродинамического моделирования.

Результаты измерений и моделирования характеристик макетного образца ВФХд представлены в табл. 5.

У макетного образца ВФХд с подавлением второй полосы пропускания были обнаружены паразитные полосы пропускания, которые не наблюдались в расчетной модели, что объясняется прохождением высших типов колебаний (моды),

Таблица 4. Значение некоторых параметров изготовленных волноводов

Параметр	Диапазон значений	Требование КД
Точность размеров (без постобработки), мм	0,1–0,2	0,02–0,1
Допуски расположения поверхностей, мм	от 0,1	от 0,03
Шероховатость поверхностей, в том числе внутренних (т. е. по которым непосредственно проходит СВЧ-сигнал)	от Ra 9,5 мкм до Ra 14,37 мкм	от Ra 0,8 мкм до Ra 6,3 мкм

Таблица 5. Значение электрических характеристик макетного образца ВФХд

Параметр	Измеренные значения характеристик	Результаты моделирования характеристик
Потери в полосе пропускания: – в сечении фланцев	–0,3–0,5 дБ	–0,4 дБ
Значение КСВ в полосе пропускания (при калибровке в сечении выходов КВП)	не хуже 1,8	не более 1,8

вызванных наличием коаксиально-волнового перехода (КВП). Для улучшения характеристик необходимо провести доработку резонаторов.

Характеристики ВФХд с широкой полосой задержания составили следующие значения: коэффициент стоячей волны (КСВ) не более 2, потери не более $-0,5$; однако было выявлено смещение полосы пропускания на 30–50 МГц. Таким образом, было установлено, что для попадания в расчетную характеристику требуется отработка режимов печати (например, скорости построения изделия и т. д.) и уточнение исходных размеров элементов модели с учетом особенностей технологии печати.

Дальнейшими направлениями исследований являются минимизация потерь в полосе пропускания сигнала за счет уменьшения шероховатости и увеличения электрической проводимости внутренних поверхностей, проработка новых конструкций фильтров.

В результате проделанной инициативной работы специалисты АО «Российские космические системы» выявили, что характеристики прототипов деталей, изготовленных методом 3D-печати, значительно уступают характеристикам деталей, изготовленных традиционными методами. Предполагается, что это связано с отсутствием проведения операций постобработки и нанесения СВЧ-покрытия. Полученные характеристики макетного образца ВФХд показали возможность его применения в приемной аппаратуре и передающей аппаратуре малой мощности (10–20 Вт).

3D-печать в космическом пространстве

За рубежом работы по исследованию возможностей применения трехмерной печати в космосе ведутся с 1993 г. Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства (КП) — NASA (National Aeronautics and Space Administration). В 1999 г. К. Купер (К. Cooper), тестируя 3D-принтер, работающий в горизонтальном положении по методу ПНФ, обнаружил, что технология, основанная на экструзии, может работать без гравитации, действующей в типичном направлении [35]. В более поздних исследова-

ниях он совместно с М. Гриффином (M. Griffin) продемонстрировал работоспособность данной технологии в условиях микрогравитации в ходе серии параболических полетов [36]. М. П. Снайдер (M. P. Snyder) с соавт. [35] провели похожие исследования в условиях моделирования микрогравитации и подтвердили результаты работы [36], а также определили, что для обеспечения работоспособности коммерческих 3D-принтеров в данных условиях необходимо провести некоторые модификации их конструкции.

На основании данных исследований в 2014 г. NASA совместно с американской корпорацией «Made in Space» (MIS) разработал 3D-принтер для реализации программы «3D Printing in Zero-G» («3D-печать в невесомости»). Тестируемое оборудование, включающее в себя 3D-принтер (метод печати — ПНФ, рабочая область $600 \times 1200 \times 600$ мм, расходный материал — пластик акрилонитрил-бутадиен-стирол [АБС] [37]), и блок электроники были размещены в перчаточном ящике для исследований в условиях микрогравитации на МКС. Полученные результаты были опубликованы в статьях [38–41]. Проанализировав данные, исследователи [37, 42] пришли к выводу, что микрогравитация не оказывает существенного влияния на механические и теплофизические свойства образцов, изготовленных на МКС, по сравнению с образцами, изготовленными на Земле.

Наиболее приемлемым для изготовления изделий в космосе НАСА определило такие материалы, как АБС-пластик и полиэфиримид Ultem 9085 [43]. На основе данных, полученных в ходе численного моделирования процесса 3D-печати, теоретическая возможность изготовления изделий из полиэфиримида методом ПНФ в условиях космического вакуума была подтверждена В. А. Беспаловым с соавт. [44].

Кроме того, сейчас некоторые зарубежные исследования направлены на оценку возможностей применения других методов 3D-печати в условиях микрогравитации. Например, В. Ли (W. Li) с соавт. [45] на основе анализа рабочих принципов метода прямого нанесения материала предположили возможность реализации процесса в условиях КП за счет регулировки смачиваемости сопла и подложки. А. Зокка (A. Zosca) с соавт. [46]

предложили вариант реализации метода СЛП в условиях КП за счет введения газового потока для имитации гравитации и удержания порошка в рабочей зоне и особой конструкции устройства подачи порошка для нанесения нового слоя. Сообщается, что разработанная конструкция 3D-принтера успешно прошла испытания в ходе серии параболических полетов.

Проблемные вопросы применения технологии 3D-печати в создании радиоэлектронной космической аппаратуры

В связи с тем, что 3D-печать является новой технологией, существует ряд перспективных направлений деятельности, ориентированных на приобретение новых знаний и опыта, улучшение характеристик изделий и ускорение внедрения 3D-печати на предприятиях РКП.

Для того чтобы подтвердить целесообразность применения технологии 3D-печати на предприятиях РКП, необходимо провести сравнительные испытания изделий, изготовленных по технологии 3D-печати, с изделиями, изготавливаемыми по традиционным технологиям.

С целью применения 3D-печати в качестве технологии прототипирования необходимо разработать методику пересчета результатов испытаний прототипов на соответствие заданным в техническом задании на изделие требованиям, поскольку результаты испытаний прототипов не гарантируют получение таких же результатов для изготовленного по традиционной технологии изделия.

Шероховатость поверхности изделий, полученных методом 3D-печати, существенно больше шероховатости поверхности изделий РЭА, которая требуется по конструкторской документации, что может влиять на характеристики изделий. Однако, как следует из рассмотренных источников и проведенных авторами исследований, функциональные характеристики СВЧ-фильтров, полученных методом 3D-печати без постобработки, для X-диапазона частот и ниже, незначительно уступают ха-

рактеристикам СВЧ-фильтров, изготовленных традиционными методами.

С ростом рабочей частоты шероховатость поверхности все более существенно влияет на характеристики изделия. С учетом того, что в РКП начинается массовое освоение Ka-, V- и Q-диапазонов частот, задача уменьшения шероховатости поверхности изделий, изготовленных методом 3D-печати, становится все более актуальной.

Таким образом, с целью повышения функциональных характеристик изделий, полученных методом 3D-печати, а также для обеспечения возможности макетирования изделий РЭА необходимо определить методы и отработать технологические режимы постобработки.

Кроме того, для перехода к печати в космическом пространстве требуется освоение технологий 3D-печати на Земле.

В связи с тем, что существующая нормативно-техническая документация (НТД) охватывает небольшое количество способов 3D-печати и применяемых материалов и пока не обеспечивает решение отраслевых задач, для внедрения и легитимного применения технологии 3D-печати на предприятиях РКП необходима разработка НТД, которая описывает типовые технологические процессы изготовления изделий; перечни контролируемых характеристик материалов до и после 3D-печати и методы их контроля; перечни возможных дефектов изделий; правила проектирования и критерии приемки изделий; а также необходимы ограничительные перечни материалов, рекомендованных к применению в составе изделий.

Подобное стремительное развитие 3D-печати должно сопровождаться корректировкой и актуализацией НТД. Несмотря на то, что большинство действующих стандартов носят общий характер, в них иногда содержатся уже неактуальные данные. Например, применяемая терминология, заимствованная из иностранных стандартов и дословно переведенная, не учитывает терминологию, принятую в стандартах Российской Федерации, что хорошо видно по использованию в другом значении терминов «аддитивный процесс изготовления ПП» (ГОСТ Р 53386) и «аддитивная печать» (ГОСТ ISO/TS 80004-8). Другим примером является весьма упрощенная классификация,

приведенная в ГОСТ Р 57589, которая не позволяет отличить методы-аналоги от методов, использующих новые принципы формирования слоев.

3D-печать для изготовления космических аппаратов

Спрос на услуги космической связи, вещания, передачи данных, навигации, мониторинга Земли и атмосферы в режиме реального времени постоянно растет, а на орбите, не считая группировки Starlink и OneWeb, не так много похожих друг на друга КА. Снижение стоимости и увеличение объема перечисленных услуг, а также повышение оперативности создания космических систем (КС) возможно при условии перехода ракетно-космической индустрии от единичного и опытно-серийного производства КА и КС к их мелкосерийному производству. Для этих целей будут активно использовать кластеры малоразмерных (микро-, нано-, пико-) спутников [47].

Кроме того, снижение стоимости создания КА может быть достигнуто путем применения новых технологий (робототехники, 3D-печати, «индустриального интернета») [48]. Уже сейчас некоторые компании — производители спутников (например, Thales Alenia, Boeing, Made in Space, Airbus [49, 50]) активно внедряют 3D-печать в свои технологические процессы и с каждым годом увеличивают количество напечатанных деталей в своих изделиях.

Одним из текущих общепризнанных трендов является создание мегагруппировок КА (например, глобальный Интернет Starlink компании SpaceX или OneWeb одноименной корпорации, глобальное оперативное наблюдение компании Planet), насчитывающих уже сотни, а в перспективе и тысячи объектов. Такая тенденция связана с тем, что с повышением потенциала КС возрастает и генерируемая ценность заказываемых услуг [51].

Создание подобных систем требует применения стандартных (унифицированных) конструкций спутников, изготовление которых будет дешевым и массовым. В отношении массового производства внедрение 3D-печати может иметь определенные плюсы, связанные с возможностью применения биониче-

ского дизайна и отсутствием сборочных операций. Кроме того, в случае применения методов 3D-печати, в которых расходный материал размещается в резервуаре (например, СЛП), мультипликация изделий в рабочем поле 3D-принтера снизит количество необходимых поддержек, а значит, уменьшит конечную стоимость напечатанного изделия. Однако для методов 3D-печати, в которых расходный материал подается через сопло или специальный внешний механизм, может возникнуть экономический барьер, обусловленный низкой производительностью 3D-принтера и высокой стоимостью сырья.

Стоит отметить, что в отсутствие НТД для применения 3D-печати в производстве для каждого изделия требуется разрабатывать и утверждать программы и методики испытаний, в результате чего увеличится время и стоимость изготовления.

Заключение

3D-печать может оказать ключевое влияние на развитие космической отрасли, так как предоставляет новые возможности при изготовлении изделий РКТ. Уже сейчас она находит свое применение при изготовлении изделий РЭА, таких как волноводы различной конфигурации, элементы антенной техники, СВЧ-фильтры, корпуса приборов, печатные платы и другие.

Опыт применения 3D-печати в АО «Российские космические системы» показывает, что изделия, изготовленные методами 3D-печати, могут конкурировать с изделиями, изготовленными по традиционным технологиям. Результаты проведенных исследований показали необходимость проведения постобработки изделий, изготовленных методом 3D-печати.

Предполагается, что дальнейшее развитие 3D-печати будет сопряжено с проведением ряда научно-исследовательских и опытно-технологических работ, в результате проведения которых будет разработана необходимая НТД.

Список литературы

1. *Чемодуров А.Н.* Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения // Известия ТулГУ. Технические науки, 2016, вып. 8, ч. 2. С. 210–217.
2. ГОСТ Р 59100-2020. Пластмассы. Филаменты для аддитивных технологий. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2020. С. 12.
3. *Смирнова О.Н., Боброва Ю.С., Мусеев К.М.* Анализ методов 3D-печати для изготовления печатных плат: Общие положения. Часть 1 // Технологии в электронной промышленности, 2020, № 8. С. 20–25.
4. *Holmberg M.* On surface losses in Direct Metal Laser Sintering printed millimeter and submillimeter waveguides / Dr. Dancila, A. Rydberg, B. Hjärvarsson, U. Jansson, J.J. Marattukalam, N. Johansson, J. Andersson // Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2018, № 39. P. 535–545.
5. *Liu G.* Additive manufacturing of structural materials / X. Zhang, X. Chen, Y. He, L. Cheng, M. Huo, J. Yin, F. Hao, S. Chen, P. Wang, S. Yi, L. Wan, Z. Mao, Z. Chen, X. Wang, Z. Cao, J. Lu // Materials Science and Engineering: R: Reports, 2021, vol. 145. 67 с.
6. *Addamo G.* 3D Printing of a monolithic K/Ka-band dual-circular polarization antenna-feeding network / M. Lumia, Fl. Calignano, F. Paonessa, G. Virone, D. Manfredi, L. Iuliano, O.A. Peverini // IEEE Access. 2021, vol. 9. P. 88243-88255.
7. *Becedas J., Caparrys A.* Additive manufacturing applied to the design of small satellite structure for space debris reduction // Applications of Design for Manufacturing and Assembly. Chapter 5. London: IntechOpen, 2018. P. 59–76.
8. *Blakey-Milner B.* Metal additive manufacturing in aerospace: A review / P. Gradl, Gl. Snedden, M. Brooks, J. Pitot, E. Lope, M. Leary, F. Berto, A. Plessis // Materials & Design, 2021, vol. 209. 110008.
9. *Garcia C.R.* Effects of extreme surface roughness on 3D printed horn antenna / R. C. Rumpf, H. H. Tsang, J. H. Barton // Electronics letters, 2013, vol. 49 (12). P. 734–736.
10. *Addamo G.* 3D Printing of high-performance feed horns from Ku to V bands / O. A. Peverini, Fl. Calignano D. Manfredi, F. Paonessa, G. Virone, G. Dassano // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, vol. 17. P. 2036–2040.
11. *Addamo G.* Integration of microwave components through Selective Laser Melting / M. Lumia, Fl. Calignano, G. Virone, D. Manfredi, O. A. Peverini // International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), 2019. P. 1356–1358.
12. *Kotze K., Gilmore J.* SLM 3D-Printed horn antenna for satellite communications at X-band // 2019 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC) (Granada, 9–13 September, 2019), 2019. P. 148–153.
13. First Air-Worthy Metal 3D Printed RF Filter Ready for Take-Off. <https://www.3dsystems.com/customer-stories/firstair-worthy-metal-printed-rf-filter-ready-take> (Дата обращения 01.03.2022).
14. *Booth P., Lluch E.V.* Enhancing the performance of waveguide filters using additive manufacturing // Proceedings of the IEEE, 2017, vol. 105. P. 613–619.
15. *Salek M.* 3-D printed microwave and terahertz passive components: dissertation for the degree of doctor of philosophy. The University of Birmingham. June 2019. P. 189. <https://core.ac.uk/download/pdf/341793525.pdf> (Дата обращения 01.03.2022).
16. *Addamo G.* Additive Manufacturing of Waveguide Low-pass Filters by Selective Laser Melting: Lessons Learned // 46th European Microwave Conference, 2016. P. 53–67. <https://intranet.birmingham.ac.uk/ac.uk/eps/documents/public/emuw2/WM03.pdf> (Дата обращения 01.03.2022).
17. *Sabri M.W., Murad N.A., Rahim M.K.A.* Highly directive 3D-printed dual-beam waveguide slotted antennas for millimeter-wave applications // Microwave and optical technology letters, 2019. P. 1–8.
18. *Guennou-Martin A. et al.* Design and manufacturing of a 3-D conformal slotted waveguide antenna array in Ku-band based on Direct Metal Laser Sintering // 2016 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), 2016. P. 1–4. DOI: 10.1109/CAMA.2016.7815802.
19. *Byers K., Brown L.* Additive manufactured 60 GHz slot array antenna // 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting (Boston, 8–13 July, 2018), 2018. P. 1877–1878.
20. *Huang G.-L.* Fabrication of a high-efficiency waveguide antenna array via Direct Metal Laser Sintering / S.-G. Zhou, T.-H. Chio, T.-S. Yeo // IEEE antennas and wireless propagation letters, 2016, vol. 15. P. 622–625.

21. *Venanzoni G., Dionigi M., Tomassoni C., Sorrentino R.* Design of a Compact 3D Printed Coaxial Filter // 48th European Microwave Conference (EuMC), 2018. P. 280–283.
22. *Khan S., Vahabisani N., Daneshmand M.* A Fully 3-D Printed Waveguide and Its Application as Microfluidically Controlled Waveguide Switch // IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2016, vol. 7. P. 70–80.
23. *Chan K.Y., Ramer R., Sorrentino R.* Low-cost Ku-band waveguide devices using 3-D Printing and liquid metal filling // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, vol. 66. P. 3993–4001.
24. *McKerricher G., Nafe A., Shamim A.* Lightweight 3D Printed Microwave Waveguides and Waveguide Slot Antenna // 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2015. P. 1322–1323. DOI: 10.1109/APS.2015.7305050
25. *Perigaud A.* 3D printing of microwave passive components by different additive manufacturing technologies / S. Bila, O. Tantot, N. Delhote, S. Verdeyme // 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting (19–24 July, 2015), 2015. P. 1322–1323.
26. *Shang X., Guo Ch., Lancaster M.J.* 3-D Printed Circuits for RF and Microwave Applications. https://www.armms.org/media/uploads/13_shang_3-d-printed-circuits-for-rf-and-microwave.pdf (Дата обращения 01.03.2022).
27. *Yao H.* Ka band 3D Printed horn antennas / Sh. Sharma, R. Henderson, S. Ashrafi, D. MacFarlane // 2017 Texas Symposium on Wireless and Microwave Circuits and Systems (WMCS), 2017. P. 1–4.
28. *Yao H., Fang L., Henderson R.* Evaluating conductive paint performance on 3-D printed horn Antennas // 2018 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), 2018. P. 191–193.
29. *Naushahi Sh.H., Rasilainen K., Viikari V.* Realization of RFID Tag Antenna with 3D Printing Technology // 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2016. P. 1–4.
30. *Shin S.-H.* Polymer-based 3-D Printed Ku-band steerable phased-array antenna subsystem / D. Alyasiri, M. D'Auria, W.J. Otter, C.W. Myant, D. Stokes, Z. Tian, N.M. Ridler, S. Lucyszyn // IEEE Access, 2019, vol. 7. P. 106662–106673.
31. *Борщев Ю.П.* Применение метода 3D-печати при изготовлении элементов антенно-фидерных устройств космических аппаратов / А.И. Ананьев, И.В. Камышанов, Е.Н. Телелеяев // Инженерный журнал: наука и инновации, 2020, № 9 (105). С. 14.
32. *Нисан А.* 3D-печать алюминиевым сплавом в радиоэлектронике: опыт оптимизации, перепроектирования и производства // Современная электроника, 2021, № 7. С. 6–13.
33. *Ермаков А.* Опыт 3D-печати элементов волноводных СВЧ-трактов и рупорных антенн диапазона 8,5–31 ГГц / В. Калиничев, А. Нисан, Г. Потапов, Е. Фролова // Вектор высоких технологий, 2019, № 1 (41). С. 8–19.
34. *Глушко Н.А.* Разработка композитного сетчатого корпуса малого космического аппарата, изготавливаемого методом трехмерной печати / А.В. Азаров, А.Р. Хазиев, В.А. Колесников // Аддитивные технологии: Настоящее и будущее. Материалы Международной конференции (г. Москва, 8–9 октября 2020 г.), 2020. С. 37–44.
35. *Snyder M.P., Dunn J.J., Gonzalez E.G.* Effects of Microgravity on Extrusion based Additive Manufacturing // AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition (San Diego, 10-12 september, 2013). 2013. 6 p.
36. *Cooper K.G., Griffin M.R.* Microgravity manufacturing via fused deposition. Huntsville: Marshall Space Flight Center, 2003. 17 p.
37. *Prater T.* 3D Printing in Zero G Technology Demonstration Mission: complete experimental results and summary of related material modeling efforts / N. Werkheiser, F. Ledbetter, D. Timucin, K. Wheeler, M. Snyder // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, vol. 101. P. 391–417.
38. *Prater T.J.* Summary report on phase I results from the 3D Printing in Zero-G Technology Demonstration Mission, Volume 1 / Q. A. Bean, R. D. Beshears, T. D. Rolin, N. J. Werkheiser, E. A. Ordonez, R. M. Ryan, F. E. Ledbetter III. Huntsville: Marshall Space Flight Center, 2016. 156 p.
39. *Prater T., Bean Q, Werkheiser N., Ledbetter F., Ryan R.* NASA's In-Space Manufacturing initiative: initial results from International Space Station Technology Demonstration and Future Plans // NASA Technical Report Server. 2016. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20160009726> (Дата обращения 28.02.2022).
40. *Prate T., Werkheiser N., Ledbetter F.* Summary report on phase I and phase II results from the 3D

- Printing in Zero-G Technology Demonstration Mission, Volume II. Huntsville: Marshall Space Flight Center, 2018. 120 p.
41. *Prater T.J.* A ground-based study on extruder stand-off distance for the 3D Printing in Zero Gravity Technology Demonstration Mission / Q. A. Bean, R. D. Beshears, T. D. Rolin, E. M. Rabenberg, H. A. Soohoo, F. E. Ledbetter III, S. C. Bell. Huntsville: Marshall Space Flight Center, 2017. 94 p.
 42. *Prater T.* Analysis of specimens from phase I of the 3D Printing in Zero G Technology Demonstration Mission / Q. Bean, N. Werkheiser, R. Grguel, R. Beshears, T. Rolin, T. Huff, R. Ryan, F. Ledbetter, E. Ordonez // *Rapid Prototyping Journal*, 2017, vol. 23(6). P. 1212–1225.
 43. *Johnston M.M., Werkheiser M.J.* 3D Printing in Zero-G ISS Technology Demonstration // AIAA SPACE 2014 Conference and Exposition (San Diego, 4–7 August 2014). 2014. 5 p.
 44. *Беспалов В.А.* О возможности 3D-печати крупногабаритных конструкций в космосе / Т. И. Беспалова, А. В. Погребной, В. В. Хартов // *Космонавтика и ракетостроение*, 2021, № 2 (119). С. 119–129.
 45. *Li W., Lan D., Wang Y.* Exploration of Direct-Ink-Write 3D Printing in Space: Droplet Dynamics and Patterns Formation in Microgravity // *Microgravity Science and Technology*, 2020, vol. 32. P. 935–940.
 46. *Zocca A.* Enabling the 3D Printing of Metal Components in μ -Gravity / J. Luchtenborg, T. Mühler, J. Wilbig, G. Mohr, T. Villatte, F. Léonard, G. Nolze, M. Sparenberg, J. Melcher, K. Hilgenberg, J. Günster // *Advanced Materials Technologies*, 2019, vol. 4. 11 p.
 47. Глобальные технологические тренды. Трендлеттер №17 / 2015. [https://hse.ru/data/2015/12/14/1134499993/08_12_15_Космос\(разворот\).pdf](https://hse.ru/data/2015/12/14/1134499993/08_12_15_Космос(разворот).pdf) (Дата обращения 04.05.2022).
 48. Технологическое будущее российской экономики: Доклад к XIX Апрельской Междунар. научн. конф. по проблемам развития экономики и общества, Москва, 10–13 апр. 2018 г. / Гл. ред. Л. М. Гохберг; НИУ «Высшая школа экономики». М.: ИД Высшей школы экономики, 2018. 193 с., [1]. ISBN 978-5-7598-1752-9 (в обл.). ISBN 978-5-7598-1810-6 (e-book).
 49. <https://satellitoday.com/innovations/2017/06/27/3d-printing-future-satellite-manufacturing> (Дата обращения 05.05.2022).
 50. Industry 4.0 and the Future of UK Space Manufacturing. Final Report // London Economics January, 2019.
 51. *Потюпки А.Ю., Волков С.А., Тимофеев Ю.А.* Перспективные сервисы многоспутниковых космических систем // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2021, т. 8, вып. 1. С. 59–68.