

ОПТИМИЗАЦИЯ

3D-печать алюминиевым сплавом в радио- электронике: опыт оптимизации, перепроектирования и производства

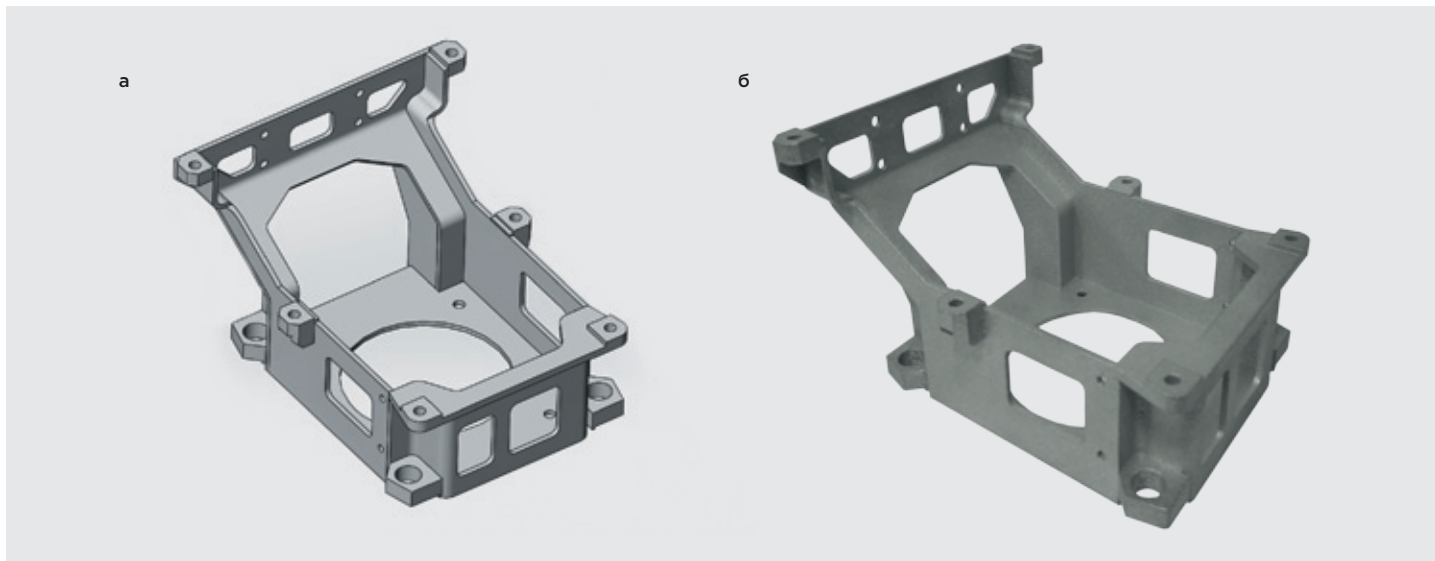


Текст: Антон Нисан



Мы уже рассказывали¹ о примерах аддитивного производства элементов волноводных СВЧ-трактов, антенн, кронштейнов, радиаторов как в нашей лаборатории, так и за рубежом. За время, прошедшее после предыдущих публикаций, мы совместно с заказчиками наработали достаточно интересный опыт перепроектирования, оптимизации и изготовления изделий радиоэлектроники методом селективного лазерного сплавления алюминиевого порошка (3D-печати). О нескольких проектах этого опыта пойдет речь в данной статье.

¹ «Вектор высоких технологий» № 2 (37) 2018, №1 (41) 2019



1 Кронштейн волноводного разветвителя: а) разнесенный вид, б) фотография напечатанного изделия, объем без поддержек 58,8 см³

На примере волноводного разветвителя и кронштейна для его крепления, фильтра, рупорных антенн, корпусов с каналами охлаждения мы покажем, какие технические и экономические преимущества аддитивных технологий достижимы на практике, в особенности при проектировании и оптимизации конструкции изделия, учитывая возможности 3D-печати. Все изделия и опытные образцы, о которых пойдет речь ниже, изготовлены в лаборатории аддитивных технологий Остек-СМТ на установке селективного лазерного сплавления Repishaw из сплава AlSi10Mg производства Русал.

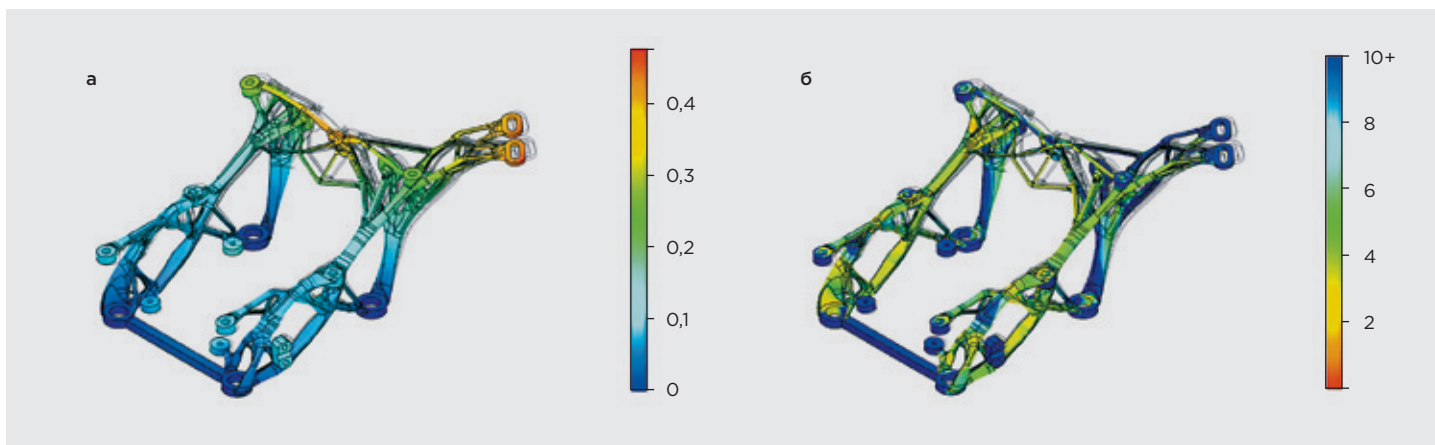
Кронштейн волноводного разветвителя

Оригинальный алюминиевый кронштейн волноводного разветвителя, разработанный АО «НИИ ТП» (рис 1), изготавливался пайкой из 16 деталей, что весьма трудно и требует специальной оснастки для обеспечения требуемых допусков. С помощью аддитивных техноло-

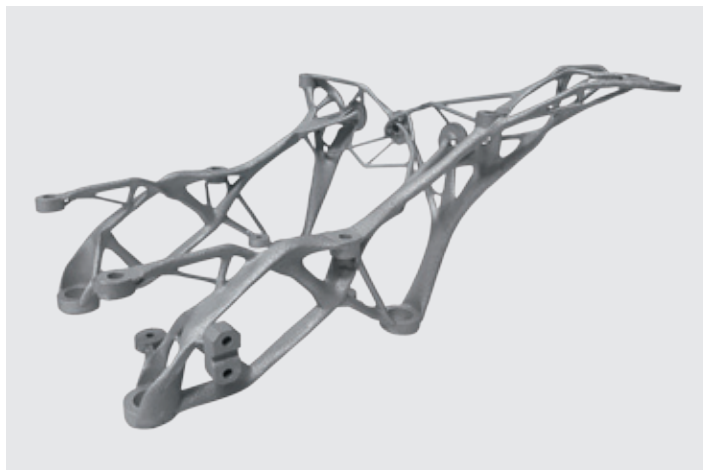
гий кронштейн изготавливается целиком, многократно снижая стоимость и сроки производства – за 49 часов на однолазерной системе печатаются два кронштейна.

Переход с классической на аддитивную технологию без изменения конструкции уже позволяет почувствовать преимущества 3D-печати, но наиболее полно ее достоинства раскроются при перепроектировании кронштейна с учетом новых технологических возможностей. Для переработки конструкции кронштейна было решено использовать порождающее проектирование.

Порождающее проектирование (generative design) – автоматический поиск (создание) вариантов формы детали в САПР на основе заданных конструктором условий будущего функционирования детали. Конструктор задает объем, в котором системе разрешено производить поиск решения, указывает неприкосновенные для изменения зоны, препятствия, которые необходимо огибать, крепежные и рабочие



2 Результаты расчета напряженно-деформированного состояния кронштейна в Autodesk Fusion 360: а) деформации, б) коэффициент запаса прочности



3

Фотография напечатанного на Renishaw AM400 кронштейна, разработанного с применением порождающего проектирования во Fusion 360

участки детали, а также условия функционирования детали – крепления и нагрузки. Как только система закончит поиск решений, она предоставит пользователю для просмотра и оценки найденные варианты геометрии детали. Конструктору необходимо выбрать наиболее подходящий вариант (по массе, прочности, допустимым деформациям, технологичности и другим критериям) и доработать модель.

3D-модель кронштейна, полученная в результате порождающего проектирования в Autodesk Fusion 360, была доработана (добавлена перемычка, сглажены поверхности), и по ней был выполнен расчет напряженно-деформированного состояния, показавший, что деформации и коэффициент запаса прочности соответ-

ствуют требованиям (рис 2). Фотография напечатанного кронштейна представлена на рис 3.

Сравнение оригинала кронштейна и кронштейнов, полученных с помощью порождающего проектирования (Т1), позволяет сделать вывод, что переработка конструкции во Fusion 360 обеспечила следующие результаты:

- снижение массы кронштейна на 56 %: с 214 до 94 г;
- объединение 19 деталей в одну (кронштейн + держатели кабеля);
- уменьшение объема поддержек при печати в 1,5 раза;
- сокращение времени печати на 28 %;
- снижение стоимости напечатанного изделия в 1,9 раза;
- возможность печати кронштейна вместе с волноводом – объединение 32 деталей в одну;
- расчетный коэффициент запаса прочности >2 при заданных схемах нагружения.

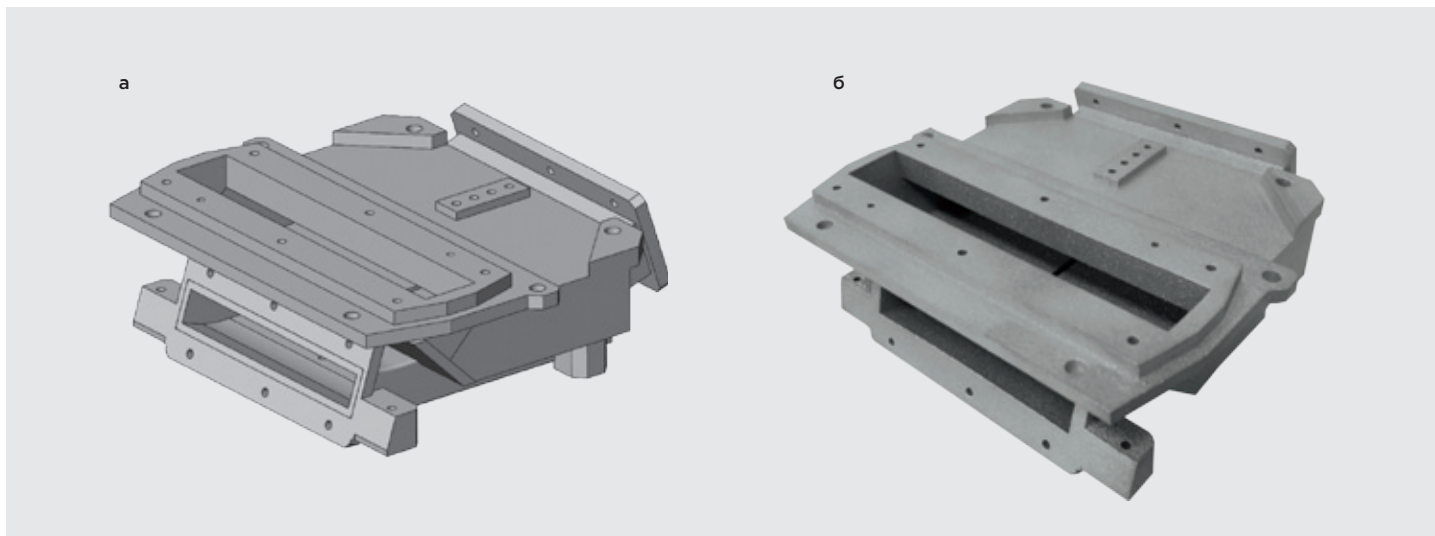
Волноводный разветвитель

Технолог, работающий на аддитивном производстве, при подготовке 3D-модели изделия к печати решает две важные задачи, от которых зависит качество изготовления: ориентирование 3D-модели в камере построения и проектирование поддержек – опорных структур, фиксирующих деталь в процессе построения и обеспечивающих теплоотвод. Несмотря на то, что в ПО для подготовки рабочих программ для 3D-принтеров реализован полезный функционал автоматического поиска оптимальной ориентации и автоматического создания поддержек, процесс подготовки 3D-модели к печати требует активного участия технолога и ручных или автоматизированных операций. Выбираемая ориентация и проектируемые поддержки субъективны и зависят не только от знаний и опыта специалиста, но и от его

Т1

Внешний вид, количество деталей и масса оригинального кронштейна и двух вариантов кронштейна, полученных порождающим проектированием

ПАРАМЕТР	ОРИГИНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ	ПОРОЖДАЮЩЕЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ (С ПЕРЕМЫЧКОЙ)	ПОРОЖДАЮЩЕЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ (БЕЗ ПЕРЕМЫЧКИ)
Скриншот модели			
Технология изготовления	Фрезерование + пайка	3D-печать (селективное лазерное сплавление)	3D-печать (селективное лазерное сплавление)
Кол-во деталей, шт.	19	1	1
Масса, г	214	99	94



4 Волноводный разветвитель (разработка в АО «НИИ ТП»): а) разнесенный вид, б) фотография напечатанного изделия, объем без поддержек 127,1 см³

характера. Так, осторожные люди могут перестраховаться и спроектировать поддержки с запасом, чтобы гарантированно напечатать изделие без дефектов с первого раза. При этом растет расход материалов и увеличиваются сроки изготовления. Люди, склонные к риску, могут спроектировать минимум поддержек, чтобы сократить время печати изделия. Однако при этом будет выше вероятность образования дефектов, а в случае брака расход материалов и времени будет еще выше, чем при осторожной тактике.

Минимизировать субъективность, зависимость от человеческого фактора помогает моделирование процесса печати и термообработки в ПО Autodesk Netfabb Local Simulation. В него импортируется 3D-модель сориентированной технологом детали на поддержках, выбираются материалы (порошка и платформы), задаются режимы печати деталей и поддержек, запускается моделирование процесса изготовления. В результате моделирования, в частности, рассчитываются напряжения и деформации как в процессе построения и термообработки, так и после снятия с поддержек. Практическая ценность моделирования процесса изготовления изделий перед их производством заключается в следующем:

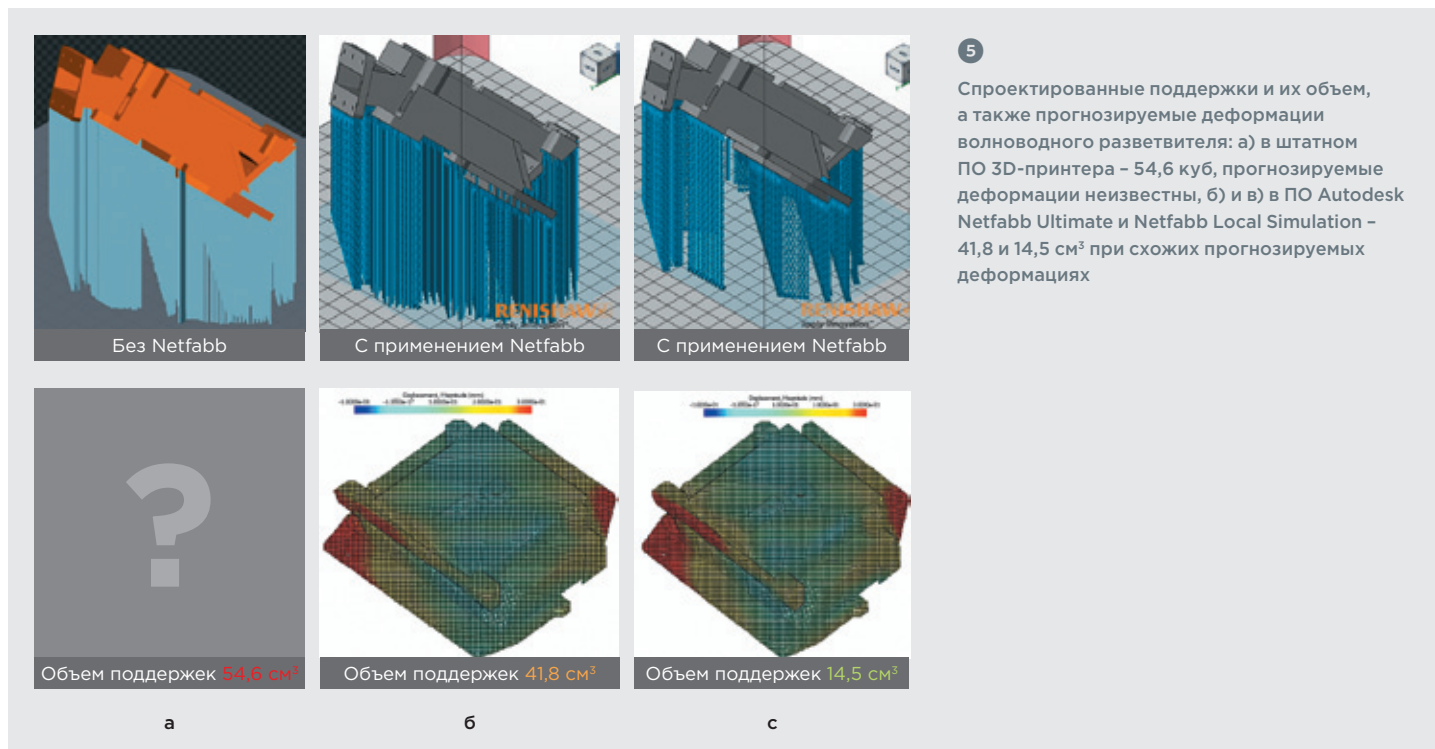
- минимизация объема поддержек, брака, времени и стоимости печати изделия: технолог видит, как спроектированные поддержки влияют на деформации детали, и может убрать практически не влияющие поддержки, оставив их только в тех местах, где они действительно необходимы;
- минимизация деформаций: если расчетная деформация превышает максимально допустимую, то, изменяя ориентацию и/или усиливая поддержки, технолог стремится уменьшить отклонения размеров до приемлемого уровня;
- компенсация деформаций: если изменением ориентации 3D-модели и/или усилением поддержек не получается добиться снижения деформаций до до-

пустимых значений, можно автоматически построить компенсированную 3D-модель, в которой учтены прогнозируемые деформации в процессе производства.

Рассмотрим возможности Netfabb Ultimate и Netfabb Local Simulation на примере подготовки к печати 3D-модели волноводного разветвителя, работающего на частоте 3,3 ГГц. Аналогично кронштейну, волноводный разветвитель состоит из 13 деталей, изготавливаемых механообработкой и соединяемых пайкой, а напечатать разветвитель можно целиком (рис 4).

Изначально поддержки проектировались в ПО, не имеющим функции моделирования процесса печати. Учитывая это, а также понятное желание технолога изготовить разветвитель с первой попытки, поддержек было заложено «с запасом», 54,6 см³ (рис 5а). Похожие поддержки были спроектированы и в Netfabb Ultimate, их объем составил 41,8 см³. Затем за несколько итераций объем поддержек был минимизирован до 14,5 см³: моделировали процесс печати в Netfabb Local Simulation, убирали поддержки, размещенные с точки зрения технолога в некритичных местах (тот самый «запас» для печати с первого раза), снова моделировали процесс печати, удаляли необязательные поддержки и т. д. Это позволило уменьшить объем поддержек с 41,8 см³ до 14,5 см³, т. е. в 2,9 раза без заметного изменения расчетных деформаций (рис 5б, 5в).

Для экспериментальной проверки крайне малой зависимости деформаций от объема поддержек при его снижении, наблюдаемой при моделировании процесса, было напечатано два волноводных разветвителя с максимальным (54,6 см³) и минимальным (14,5 см³) объемом поддержек. Исследование разветвителей, выполненное на рентгеновском компьютерном томографе Phoenix V|tome|x M300, показало, что фактические деформации наружных поверхностей и каналов различаются несущественно, тогда как объем поддержек различается в 3,8 раза (рис 6).

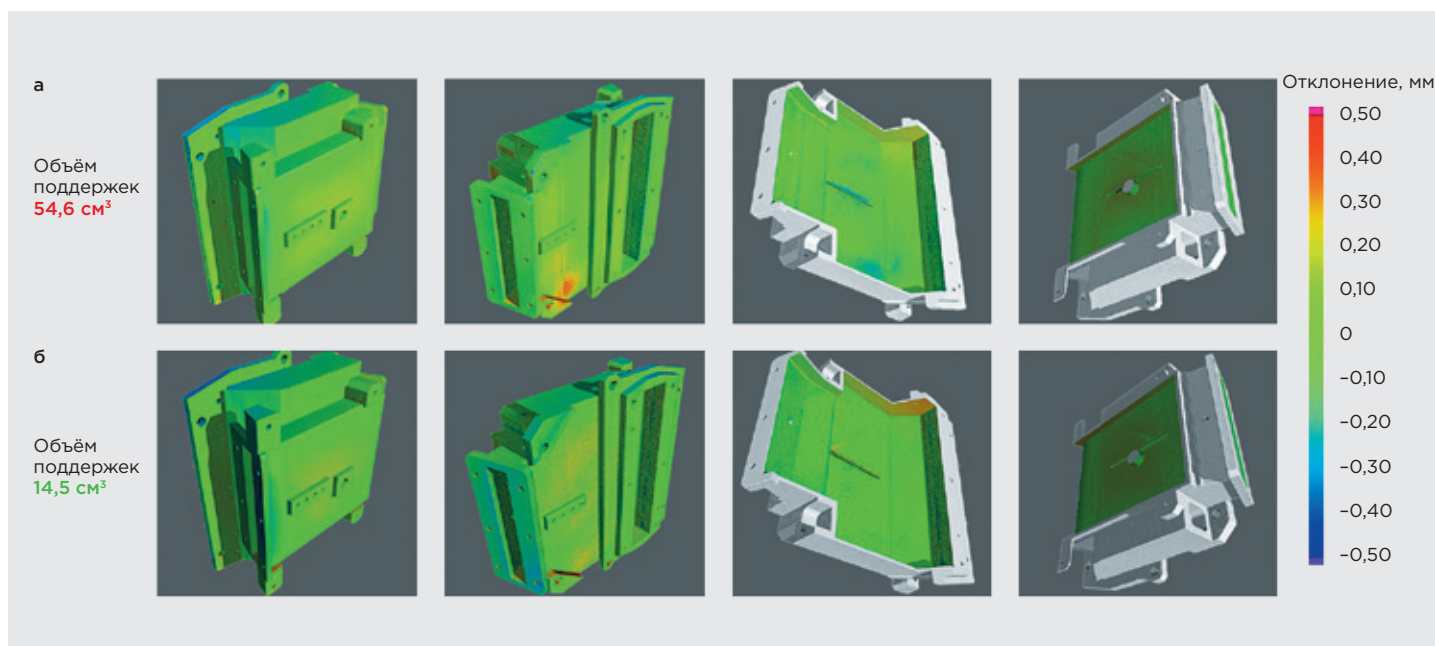


Для повышения точности изготовления была сгенерирована 3D-модель, компенсирующая деформации, возникающие в процессе аддитивного производства. Напечатанная по скомпенсированной 3D-модели деталь тоже исследовалась на томографе Phoenix V|tome|x M300. Результаты исследования показывают, что деформации в каналах разветвителя были уменьшены на 30-40 мкм (рис 7). Смещение распределения отклонений в сторону отрицательных значений (рис 7В) свидетельствует об избыточной компенсации, поэтому, уменьшив коэффи-

циент компенсации деформаций, можно добиться еще большего повышения точности изготовления.

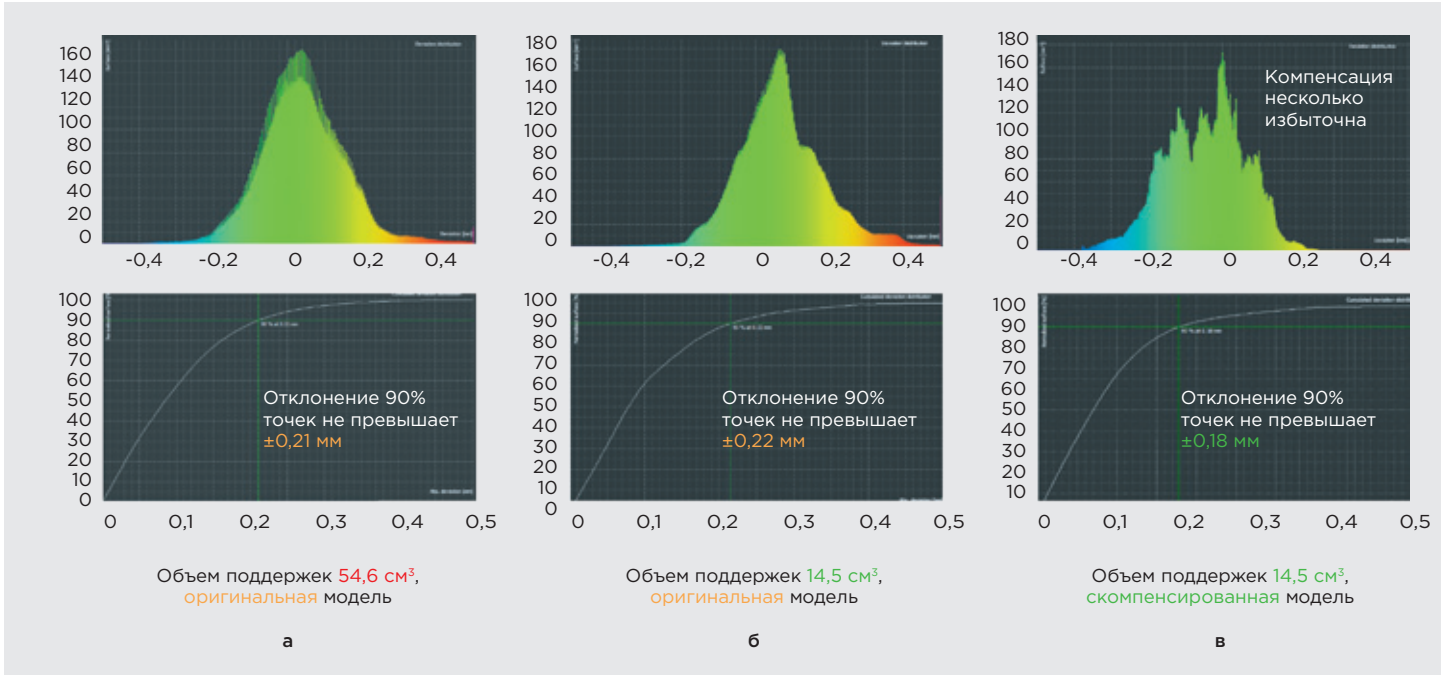
Подытожим достигнутые в данном примере преимущества, обеспечиваемые моделированием печати в Netfabb Local Simulation:

- уменьшение объема поддержек в 3,8 раза;
- снижение стоимости печати на 22 %;
- сокращение времени печати на 20 %;
- уменьшение трудоемкости постобработки и объема отходов;



6

Карты отклонения наружных поверхностей и внутренних каналов, построенные по результатам томографии напечатанных волноводных разветвителей с 54,6 см³ (а) и 14,5 см³ (б) поддержек. 3D-модель оригинальная без компенсации деформаций



7

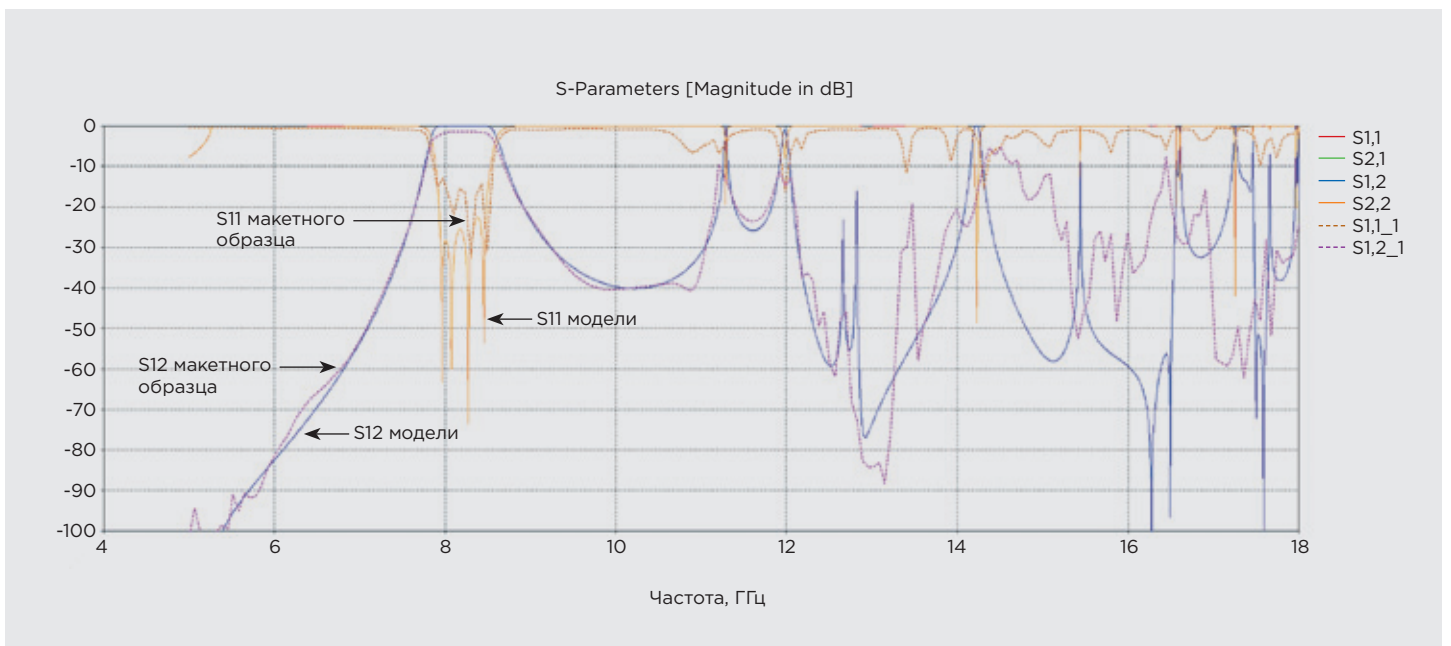
Распределения отклонений поверхности внутренних каналов от номинальных, построенные по результатам томографии волноводных разветвителей, напечатанных по оригинальной 3D-модели с 54,6 см³ (а) и 14,5 см³ (б) поддержек и по скомпенсированной 3D-модели с 14,5 см³ поддержек (в)

- снижение отклонения напечатанной детали от CAD-модели на ~18 % (может быть еще улучшено подбором коэффициента деформации).

Отметим, что 25 % снижение стоимости и времени печати может не играть важной роли при изготовлении одного изделия, но станет существенным при серийном производстве.

СФЧ-фильтр

Коллеги из АО «РКС» обратились к нам с просьбой напечатать полосовой СВЧ-фильтр с центральной частотой 8,2 ГГц, чтобы измерить его электрические характеристики и определить возможность применения в ракетно-космическом приборостроении. Первым опытным образцом был выбран линейный фильтр, представляющий собой трубу прямоугольного сечения с диафрагмами. На следующей




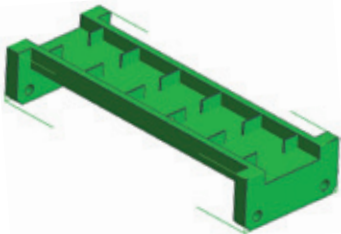
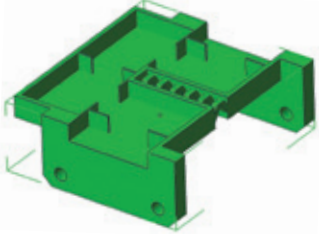


8

Электрические характеристики лабиринтного фильтра: расчетные (сплошные линии) и измеренные (пунктирные линии) S-параметры (при калибровке в сечении SMA-разъемов)

Т 2

Сравнение стоимости, сроков изготовления линейного и лабиринтных фильтров

ПАРАМЕТР	ЛИНЕЙНЫЙ ФИЛЬТР		ЛАБИРИНТНЫЙ ФИЛЬТР		ЛАБИРИНТНЫЙ ФИЛЬТР С РЕШЕТКАМИ	
Фотография						
Расположение резонаторов						
Технология изготовления	Аддитивная технология	Классическая технология	Аддитивная технология	Классическая технология	Аддитивная технология	Классическая технология
Масса, г	155	155	93	93	63	Использование решетчатых структур не представляется возможным из-за технологических ограничений
Время изготовления:		~ 1 неделя		~ 1,5 недели		
• одна деталь на платформе	19 ч 6 мин		12 ч 0 мин		9 ч 14 мин	
• макс. заполнение платформы	11 ч 8 мин		7 ч 33 мин		5 ч 15 мин	
Количество деталей, шт.	1	15	1	13	1	
Себестоимость 1 шт., руб.	51 700*	~ 250 000	27 100*	~ 400 000	16 500*	

* Без учета механической обработки фланцев и отверстий

итерации специалистами АО «РКС», учитывая возможности аддитивных технологий, изменено расположение резонаторов фильтра для улучшения электрических параметров (подавления второй полосы пропускания), после чего в ООО «Остек-СМТ» спроектированы и оптимизированы решетчатые структуры и уменьшена толщина фланца по результатам прочностного расчета в Netfabb (Т 2).

Электрические характеристики фильтров измерялись без обработки каналов и без нанесения покрытий. Потери линейного фильтра в полосе пропускания в сечении фланцев составили минус 0,3–0,5 дБ, лабиринтного фильтра – минус 0,2–0,25 дБ, КСВ обоих фильтров в полосе пропускания – не хуже 1,8 при калибровке в сечении SMA-разъемов (рис 8). Результаты изме-

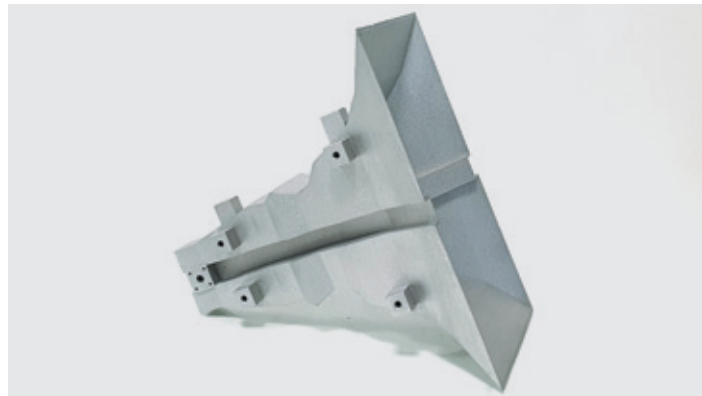
рений электрических характеристик линейного и лабиринтного фильтра свидетельствуют о возможности их применения в приемной и передающей аппаратуре малой мощности (10–20 Вт).

В результате перепроектирования обеспечены следующие преимущества применения аддитивных технологий:

- снижение стоимости изготовления в ~10 раз (при переходе с классической технологии на аддитивную);
- снижение количества деталей в 15 раз;
- снижение массы в 2,5 раза;
- электрические характеристики (даже без дополнительной постобработки каналов) при-



9 Один из заказов на рупорные антенны в 2020 г.



11 Напечатанная рупорная антенна, электрические характеристики которой приведены на рис. 12

емлемы для применения в системах малой мощности;

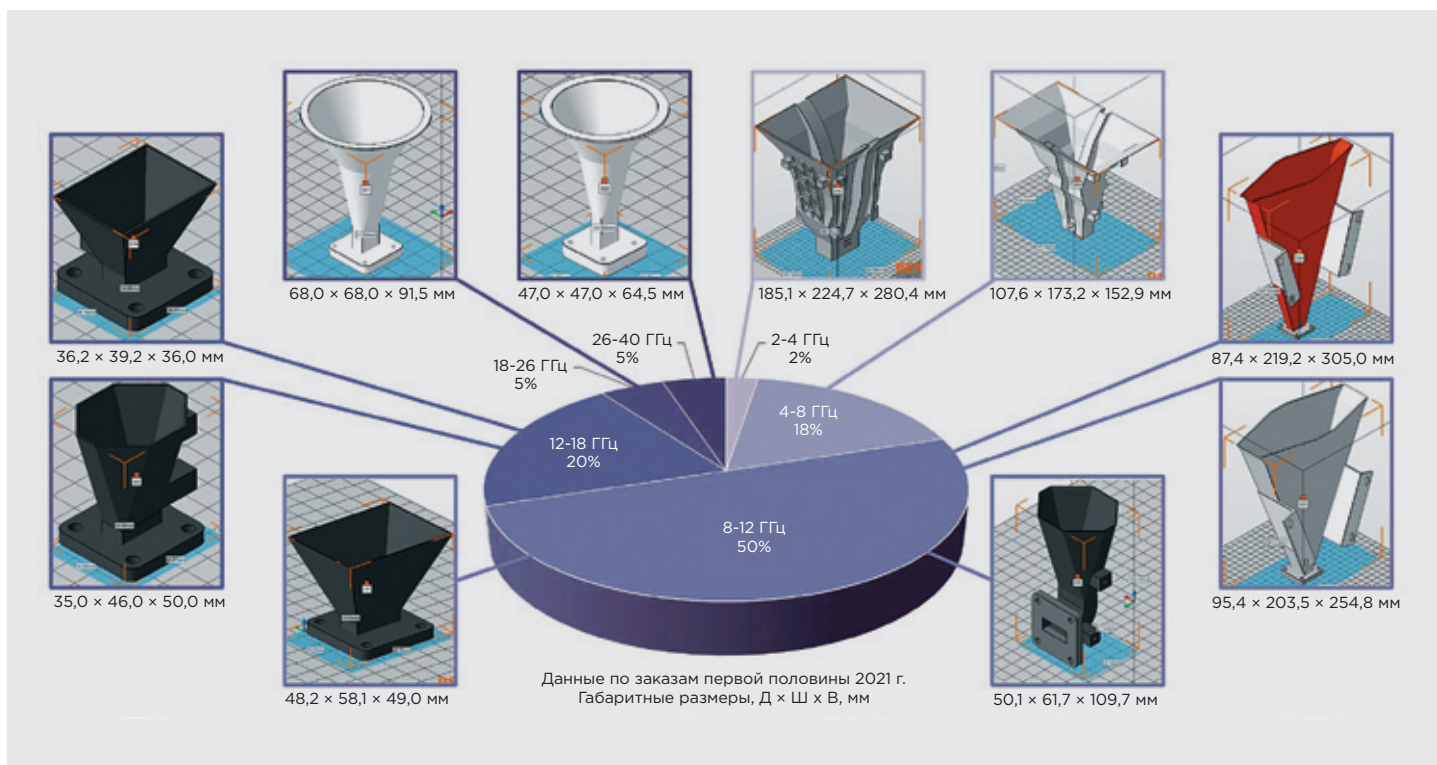
- испытание на сжатие: при нагрузке до 1,5 т – только упругие деформации.

Рупорные антенны

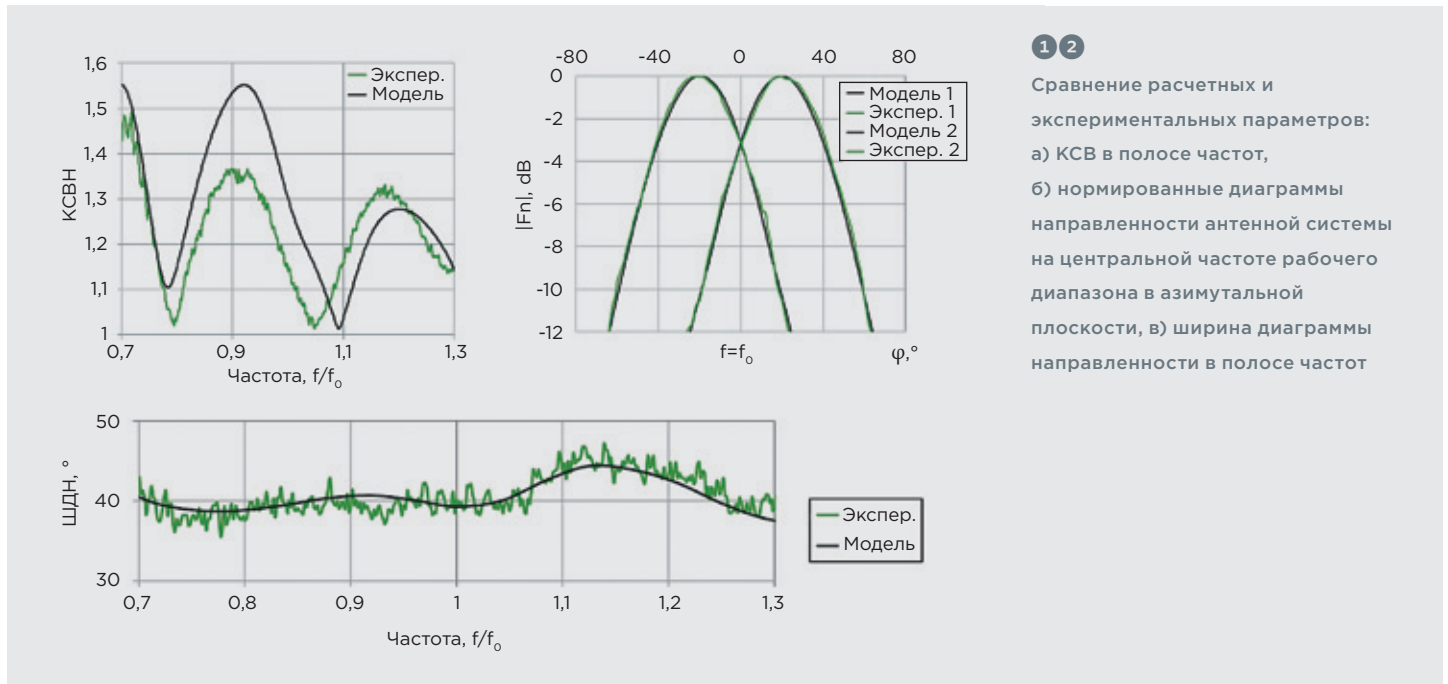
В 2019 году были напечатаны первые опытные образцы рупорных антенн для АО «НИИ «Вектор». Испытания антенн подтвердили, что они удовлетворяют требованиям по электрическим характеристикам и стойкости к внешним воздействующим факторам (ГОСТ РВ 20.39.304-98, группа 2.1.3) и пригодны для эксплуатации в составе комплексов радиотехнического мониторинга морского базиро-

вания. В 2020 и первой половине 2021 годов в нашей лаборатории было изготовлено более 100 шт. серийных рупорных антенн. Половина антенн, изготовленных в 2021 г., работает в частотном диапазоне 8-12 ГГц, 20 % – 12-18 ГГц, 18 % – 4-8 ГГц, по 5 % – 18-26 и 26-40 ГГц и 2 % – 2-4 ГГц (рис 10).

Сравним расчетные и измеренные электрические характеристики на примере рупора сложной формы с гребнями (рис 11, рис 12). Макет антенной системы представляет собой два излучателя, разнесенных на 40° относительно друг друга. Измерения излучения производятся каждой антенной независимо в азимутальной плоскости. На рис 12а приведены результаты измерения КСВ излучателя и КСВ модели излучателя в пакете



10 Распределение серийных рупорных антенн, напечатанных для АО «НИИ «Вектор» в первой половине 2021 г, по частотным диапазонам



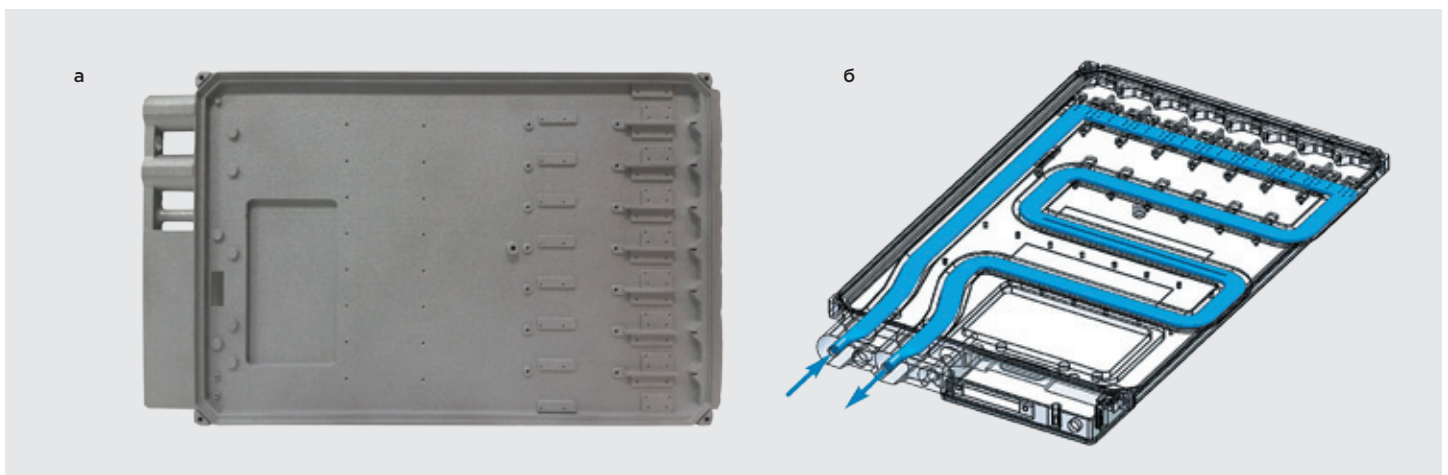
моделирования, где проводящий материал представляет собой идеальный проводник. Диаграммы направленности макета и модели антенной системы на центральной частоте диапазона показаны на рис 1 2 б. А на рис 1 2 в представлены результаты измерения ширины диаграммы направленности (ШДН) в полосе частот. Результаты измерений показывают хорошую корреляцию с теоретическими расчетами и подтверждают соответствие требований к электрическим характеристикам.

Корпуса с каналами охлаждения

В условиях повышения плотности компоновки, уменьшения габаритов элементной базы и электронных модулей обостряется проблема отвода тепла. В таких случаях для обеспечения требуемых тепловых режимов могут применяться жидкостные системы охлаждения.

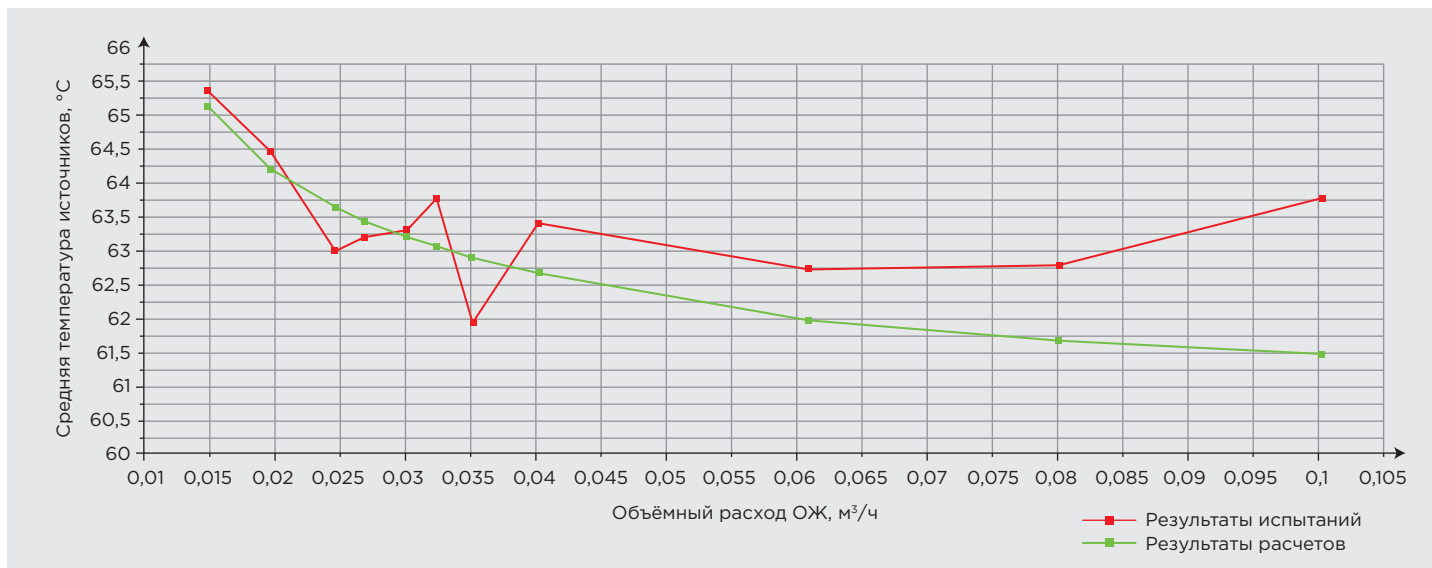
А полноценно используя возможности 3D-печати, каналы для циркуляции охлаждающей жидкости можно выполнить непосредственно в корпусе модуля, оптимизируя их форму и размещение с учетом расположения теплонагруженных элементов и требуемого теплового режима.

Такая задача, в частности, актуальна для производства активных фазированных антенных решеток (АФАР) радаров. Повышение частотных диапазонов радиолокационных систем дает более высокую разрешающую способность и точность обнаружения целей, но приводит к увеличению плотности тепловых потоков в приеме-передающих модулях АФАР (из-за уменьшения размеров модулей при почти неизменном тепловыделении). В свою очередь, перегрев СВЧ-элементов приводит к сокращению их срока службы и ухудшению радиотехнических параметров АФАР.



1 3

Корпус модуля X-диапазона: а) фотография напечатанного макета, б) расположение каналов охлаждения



1 4

Результаты испытаний макета корпуса для X-диапазона: зависимость средней температуры имитаторов (источников нагрева) от объемного расхода охлаждающей жидкости (источник: Ю.О. Соляев, МАИ)

С целью экспериментальной проверки встраивания в корпус системы жидкостного охлаждения в МАИ были спроектированы макеты корпусов приемо-передающих модулей АФАР S-, X- и Ka-диапазона (2–4, 8–12 и 27–40 ГГц соответственно), рис 1 3. Два последних были изготовлены в нашей лаборатории. Результаты испытаний макетов корпусов (рис 1 4) показывают приемлемые параметры охлаждения и подтверждают применимость 3D-печати корпусов со встроенными каналами жидкостного охлаждения для АФАР.

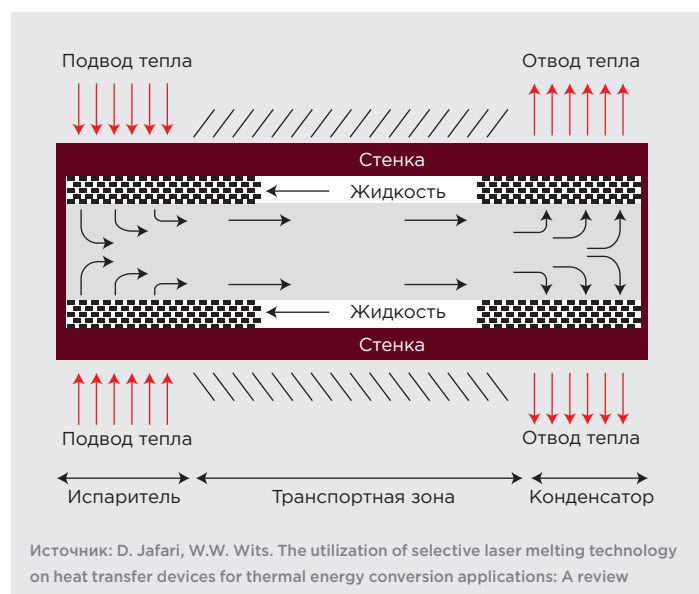
Корпуса с тепловыми трубами

Логическим продолжением и дальнейшим развитием корпусов со встроенными каналами жидкостного охлаждения являются корпуса с тепловыми трубами. Эффективная теплопроводность тепловых труб может достигать 100 кВт/(м·К), что в сотни раз превышает теплопроводность меди.

Простейшая тепловая труба представляет собой герметичный корпус, внутренние стенки которого покрыты капиллярно-пористой структурой (фитилем)². Трубы вакуумируются до остаточного давления 10⁻⁵–10⁻⁴ мм рт. ст. и заполняются рабочей жидкостью (например, водой, аммиаком) так, чтобы фитиль был полностью насыщен ею, а в остальном внутреннем пространстве был ее насыщенный пар. Принцип работы тепловой трубы состоит в следующем (рис 1 5). При подводе тепла к испарителю жидкость испаряется из фитиля, поглощая тепло. Давление пара в трубе увеличивается, нарушается динамическое равновесие системы пар-жидкость в остальной части трубы, вызывая конденсацию пара

на поверхности фитиля. При конденсации пара тепло отдается фитилю, отводится в конденсаторе, а жидкость возвращается по фитилю в испаритель за счет капиллярных сил.

Отработка режимов печати капиллярно-пористой структуры делает возможным выращивание корпусов со встроенными тепловыми трубами в одном цикле построения. В результате выполненных в нашей лаборатории начальных экспериментов, направленных на оценку возможности печати капиллярно-пористой структуры, были получены такие структуры с проницаемостью 10⁻¹⁵–10⁻¹² м². Эксперимент подтвердил возможность построения капиллярно-пористых структур и требует



1 5

Схема идеальной одномерной модели тепловой трубы

² Алексеев В.А. Основы проектирования тепловых аккумуляторов космических аппаратов. Монография. – Курск: Наукком, 2016. – 248 с., ил.



Система селективного лазерного сплавления Renishaw AM400 в лаборатории аддитивного производства Остек-СМТ

Лаборатория аддитивных технологий

В феврале 2018 года лаборатория аддитивных технологий Остек-СМТ была оснащена 3D-принтером Renishaw AM400 и оборудованием для постобработки. За 3,5 года в лаборатории было выполнено свыше 200 циклов печати и изготовлено 2360 изделий и образцов для 60 заказчиков. 47 % объема производства лаборатории составляют элементы СВЧ-трактов, еще 12 % – кронштейны и корпуса.



дальнейшего продолжения для отработки технологии получения структуры с требуемыми свойствами. Мы открыты к сотрудничеству в данном направлении!

Заключение

За 3,5 года работы лаборатории аддитивных технологий мы увидели, как меняется отношение к 3D-печати металлом в радиоэлектронной промышленности. Изначальный скепсис и восприятие систем печати как «игрушки», годной, в лучшем случае, для изготовления макета, сменяются осторожной заинтересованностью сделать и испытать опытные образцы. Результаты испытаний опытных образцов положительно удивляют, стимулируют конструкторскую мысль перепроектировать и оптимизировать для еще большего использования потенциала аддитивных технологий. А дальше наступает этап «легализации» применения 3D-печати для производства конечных изделий. У кого-то он проходит сравнительно быстро (например, у АО «НИИ «Вектор»), и мы переходим к серийному производству изделий; у кого-то он затягивается из-за административных сложностей (хотя техническая состоятельность решения уже

доказана). Важно, что интерес к технологии заметно вырос, восприятие ее стало серьезнее, опытные образцы удовлетворяют требованиям и подтверждают применимость 3D-печати, а примеры серийного производства множатся.

Благодарим наших коллег из АО «НИИ ТП», АО «РКС», АО «НИИ «Вектор», МАИ за совместную работу над проектами и предоставленные результаты измерений электрических характеристик.

Заявку на посещение лаборатории можно отправить по электронной почте 3D@ostec-group.ru или считав QR-код. Будем рады продемонстрировать вам примеры изделий и оборудование и обсудить возможности применения 3D-печати металлами для решения ваших задач.

