



**Будущее
создается**



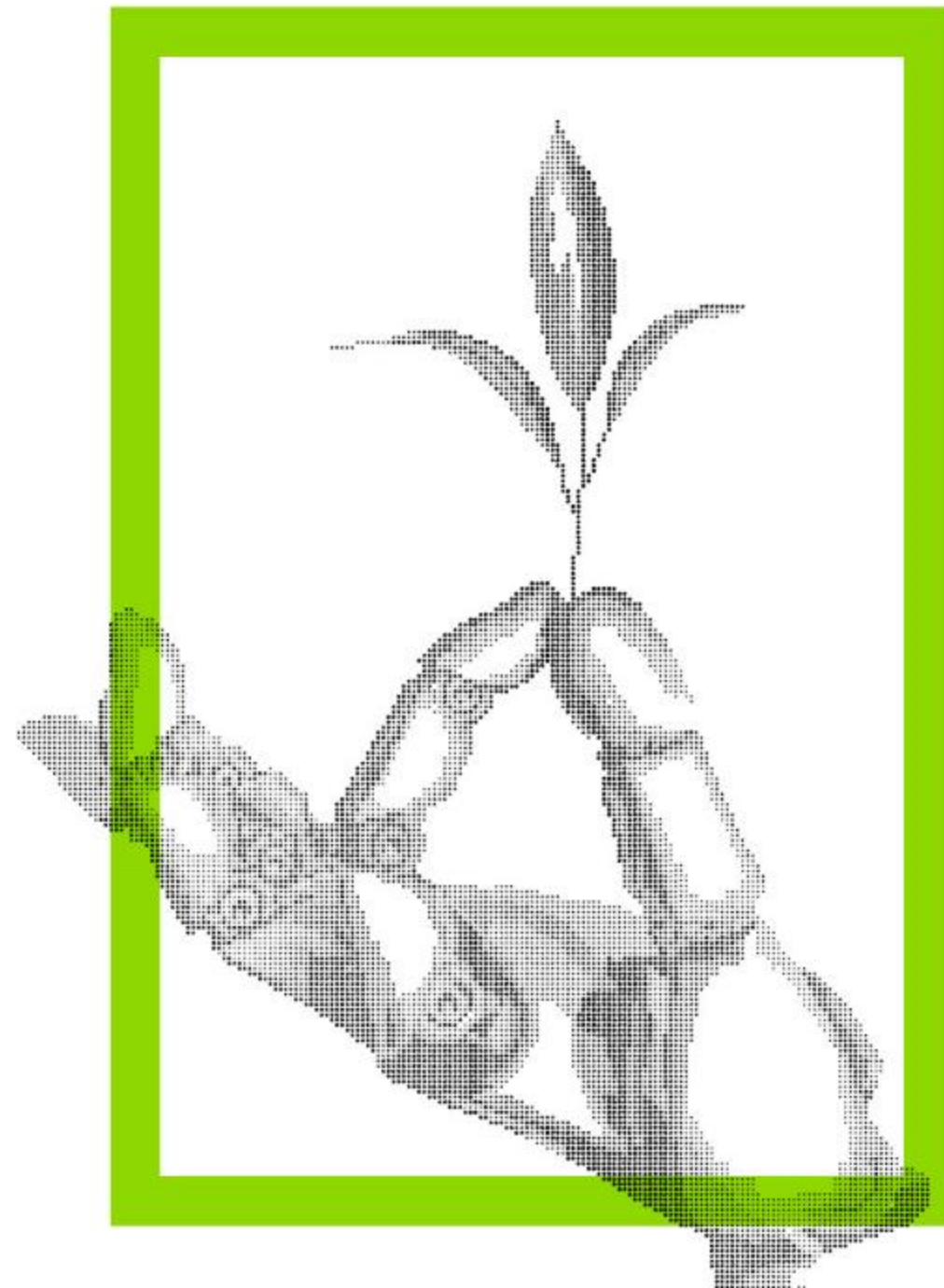
Применение технологии селективного лазерного сплавления в космическом приборостроении

Нисан Антон Вячеславович, к.т.н.

Начальник отдела технической поддержки и разработки
Направление цифровых производственных технологий | Остек-СМТ

Металлообработка-2021

27 мая 2021 г.



О группе компаний Остек

2 500+

реализованных комплексных проектов

29+

лет успешной работы на рынке

520+

первоклассных специалистов в команде

3 000+

клиентов в России и за рубежом

100+

годовой оборот (млн. \$)

50+

сервисных инженеров в штате

35 000+

единиц установленного оборудования

130+

установленных промышленных систем рентгеновского контроля и компьютерной томографии

Лаборатория АТ Остек в числах



3+

лаборатория функционирует с февраля 2018 г.

система селективного лазерного сплавления Renishaw AM400, оборудование для постобработки

60+

ключевые заказчики:

НАМИ, Вектор, ЛЭМЗ, РКС, Исток, НИИ ТП, МАИ, МГУ, МГТУ им. Баумана, МКБ Факел, ИРЭ РАН, ИСС, ОКБ Сухого...

180+

циклы печати

от нескольких часов (в уменьшенной зоне построения) до 10 суток

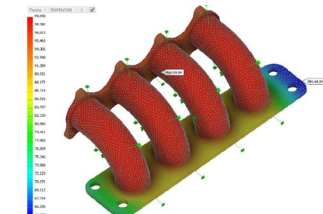
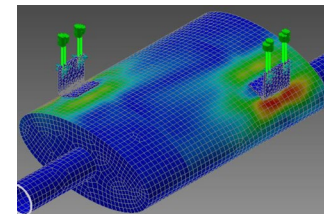
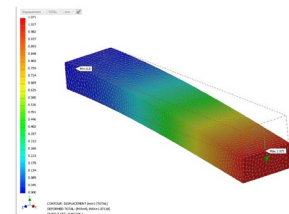
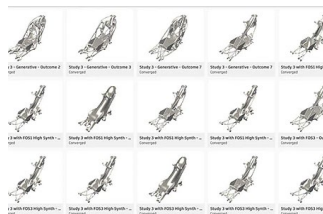
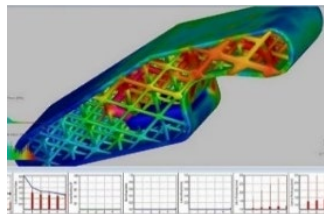
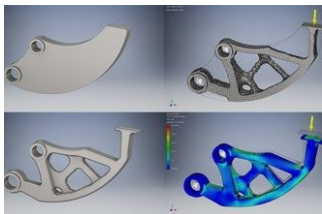
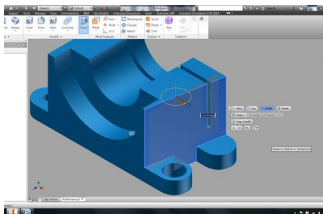
2 290+

изделия, прототипы и образцы

44% – элементы СВЧ трактов
13% – корпуса и кронштейны
10% – образцы для отработки технологии, испытаний

Лаборатория АТ – применяемое ПО Autodesk

- Проектирование с учетом возможностей и преимуществ аддитивного производства



Классическое 3D-моделирование

Оптимизация топологии

Решетчатые структуры

Порождающее проектирование

Базовые прочностные расчеты

Продвинутые прочностные расчеты

Тепловые расчеты

I INVENTOR

I INVENTOR

N NETFABB

F FUSION 360

N INVENTOR NASTRAN

N INVENTOR NASTRAN

N INVENTOR NASTRAN

F FUSION 360

F FUSION 360

N NETFABB

F FUSION 360

I INVENTOR

F FUSION 360

F FUSION 360

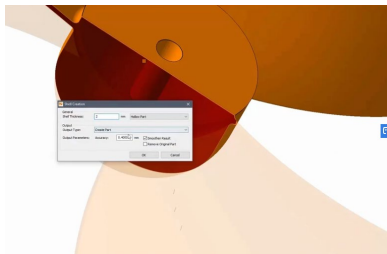
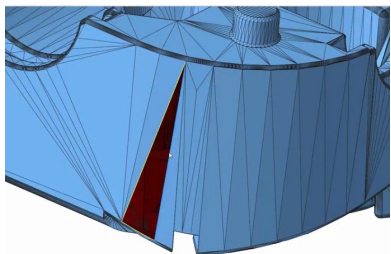
N NETFABB

F FUSION 360

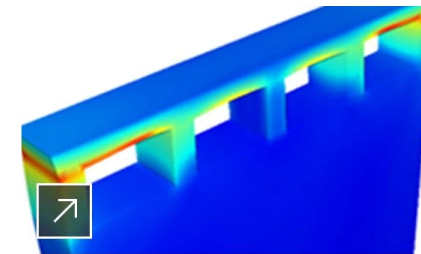
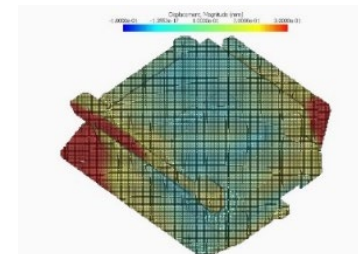
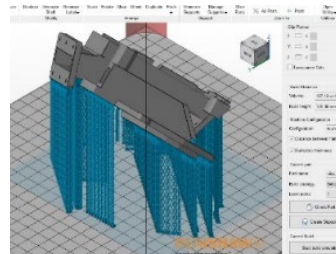
N NETFABB

Лаборатория АТ – применяемое ПО Autodesk

- Аддитивное производство: подготовка рабочих программ и моделирования процесса



Rank	Supported area (cm ²)	Support volume (cm ³)	Outbox volume (cm ³)	Height (mm)	Center of gravity height (mm)
1	22.035	52.480	532...	90.6	43.7
2	17.436	67.2...	532...	90.6	46.8
3	31.711	82.1...	532...	98.1	49.0
4	31.722	82.2...	532...	98.1	49.0
5	80.172	152...	532...	60.0	25.0
6	78.717	187...	532...	60.0	35.0
7	11.960	49.4...	768...	109.6	51.7
8	11.178	44.9...	785...	112.8	53.1
9	15.070	42.7...	791...	112.7	59.8
10	12.707	35.5...	848...	118.1	62.5
11	12.707	35.5...	972...	118.1	62.5



Исправление («лечение») моделей

Доработка моделей

Выбор ориентации модели на платформе

Проектирование поддержек

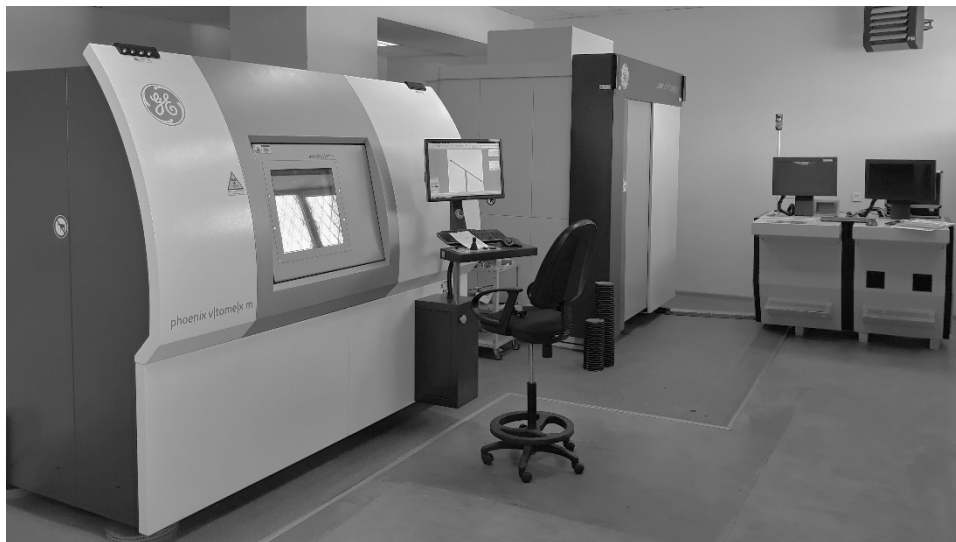
Моделирование процесса печати

Компенсация деформаций



Local Simulation Local Simulation

Лаборатория РКТ Остек в числах



260+

ключевые заказчики:

ОДК-Сатурн, ОКБ Сухого, НАМИ, Концерн Калашников, Транснефть, Газпром, СИБУР, НОВАТЭК, ЦНИИТМАШ, Авиадвигатель, МГТУ им. Баумана...

5 720+

исследуемые объекты:

геологические керны, отливки, темплеты, композиты, изделия, изготовленные по аддитивным технологиям, археологические находки, музейные экспонаты...

7+

лаборатория функционирует с 2014 г.

два метрологических промышленных томографа и одна рентгентелевизионная система

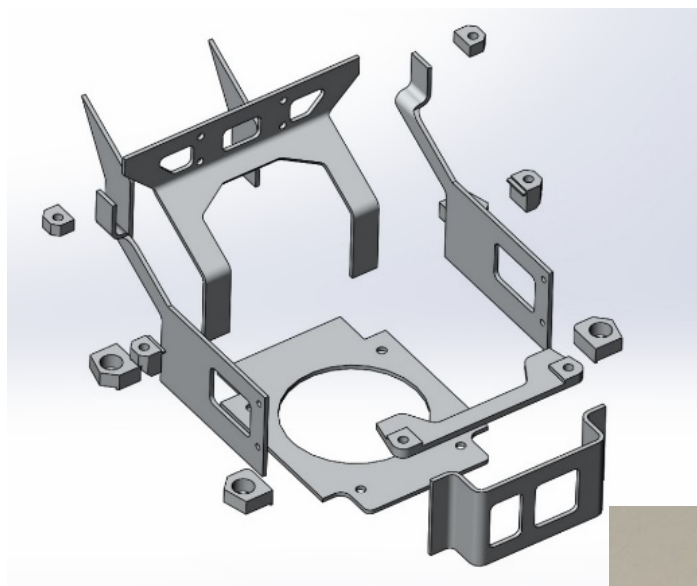
320+

комплексное обучение специалистов :

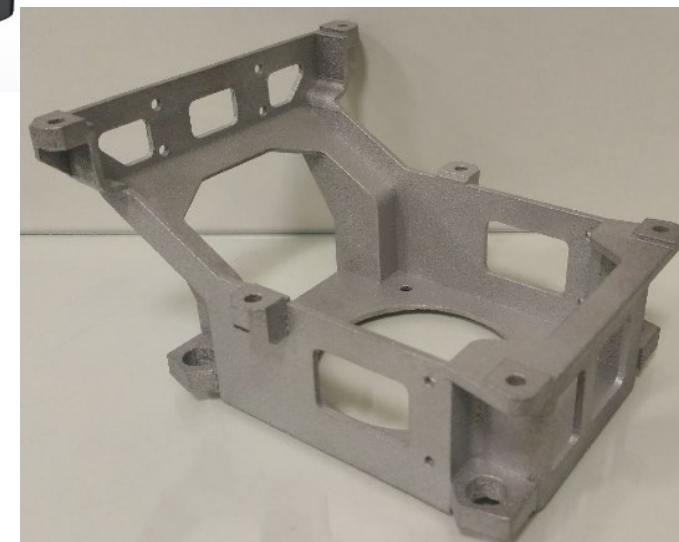
подготовлено более 320 специалистов заказчиков на базе учебного центра лаборатории

Кронштейн

- Заказчик – НИИ ТП, Роскосмос
- Материал – AlSi10Mg, РУСАЛ
- Объем без поддержек – 58,8 куб. см
- Время печати в расчете на 1 изделие
 - Минимальная загрузка (только 1 изделие на платформе) – 31 ч 37 мин
 - Максимальная загрузка (2 изделия на платформе) – 24 ч 35 мин

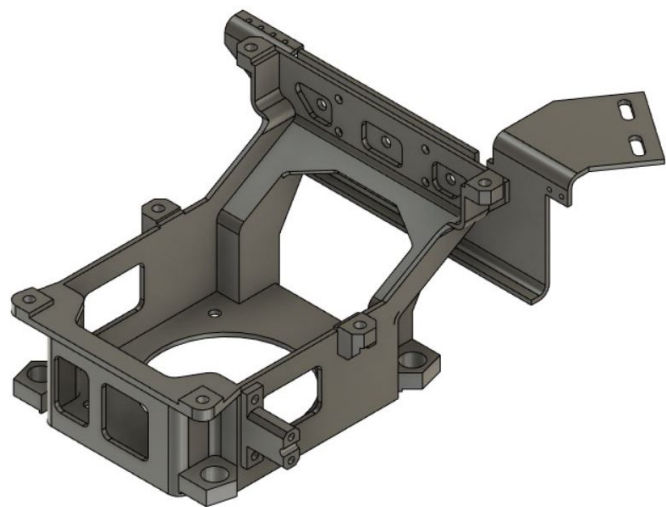


Традиционная технология: 16 деталей, соединяемых пайкой



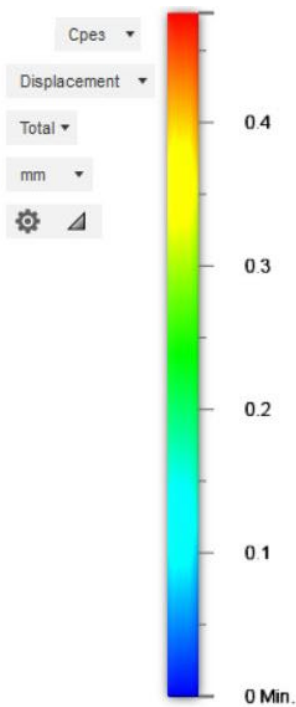
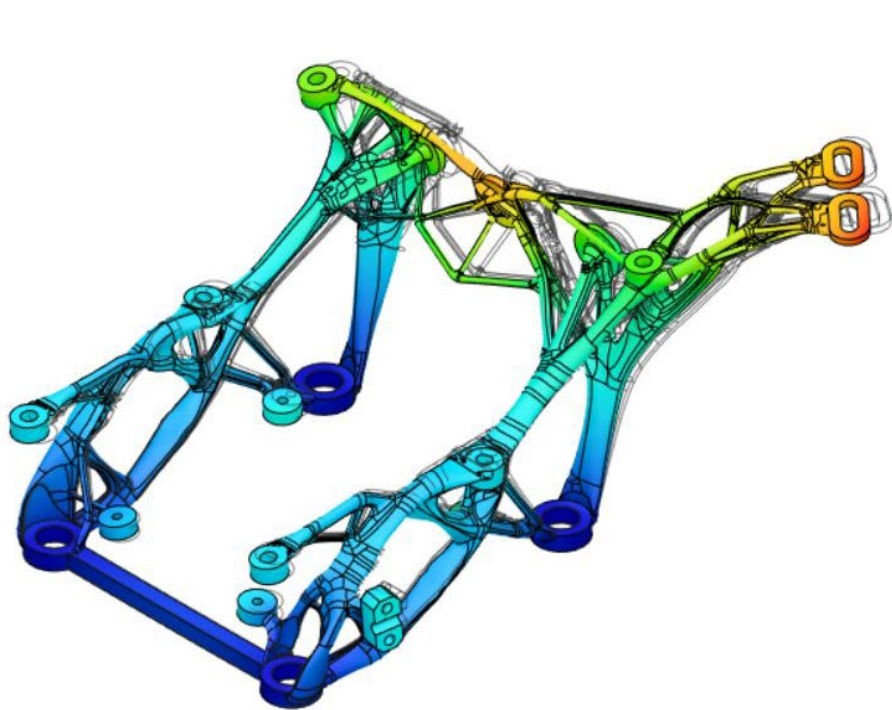
Напечатанный кронштейн

Кронштейн – Порождающее проектирование во Fusion 360

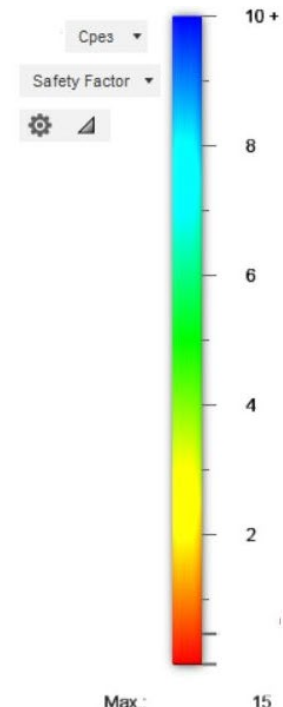
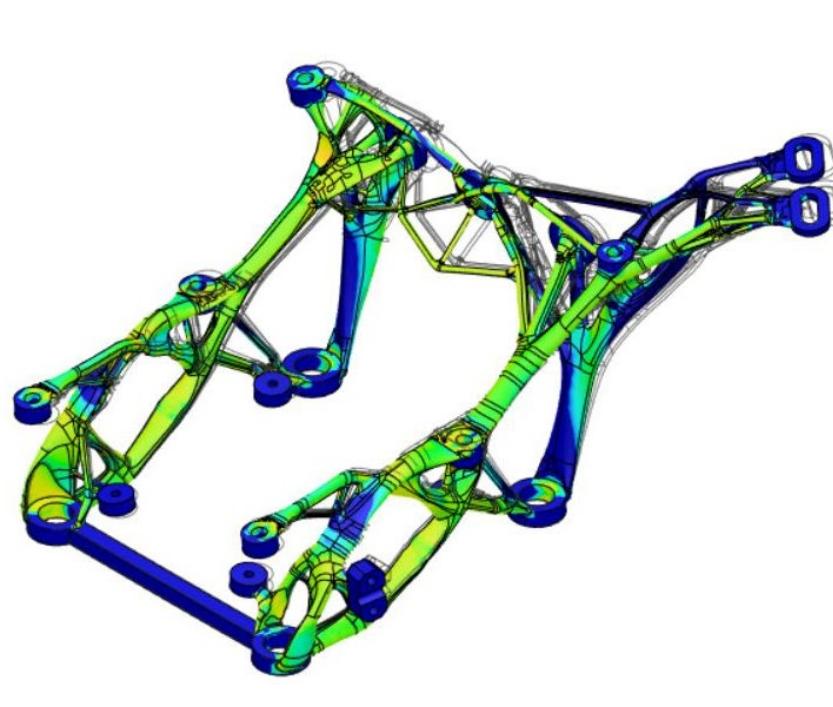


Параметр	Оригинальная модель	Порождающее проектирование (с перемычкой)	Порождающее проектирование (без перемычки)
Технология изготовления	Фрезерование + пайка	3D-печать (селективное лазерное сплавление)	3D-печать (селективное лазерное сплавление)
Кол-во деталей, шт.	19	1	1
Масса, г	214	99	94

Кронштейн – Расчет напряженно-деформированного состояния



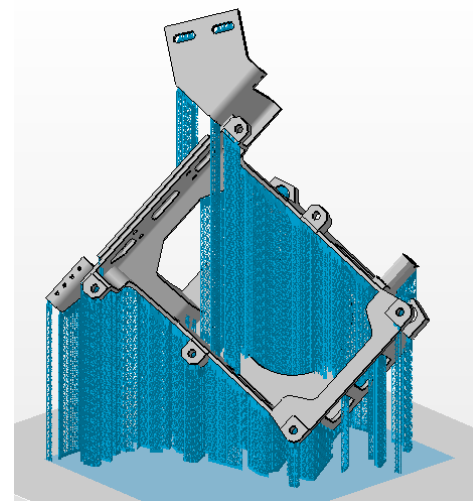
Перемещение при нагружении (схема нагружения – на срез)



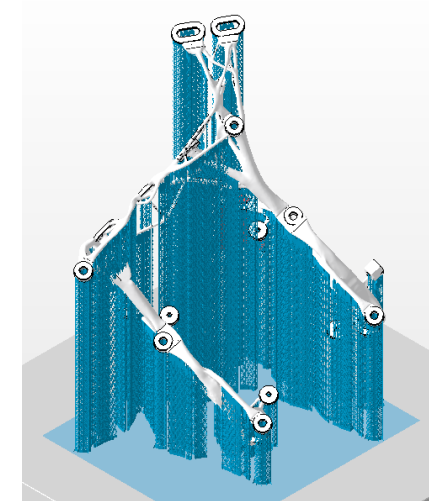
Коэффициент запас прочности (схема нагружения – на срез)

Кронштейн – Результаты порождающего проектирования

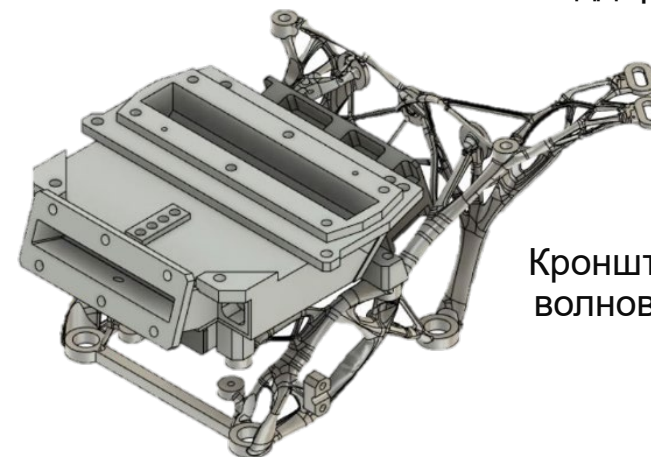
- Снижение массы кронштейна на **56%**
- Объединение **19 деталей в 1** (кронштейн + держатели кабеля)
- Уменьшение объема поддержек в **1,5 раза**
- Сокращение времени печати на **28%**
- Снижение стоимости напечатанного изделия в **1,9 раза**
- Возможность печати кронштейна вместе с волноводом – объединение **32 деталей в 1**
- Коэффициент запаса прочности **>2** при заданных схемах нагружения



Оригинальный кронштейн на поддержках



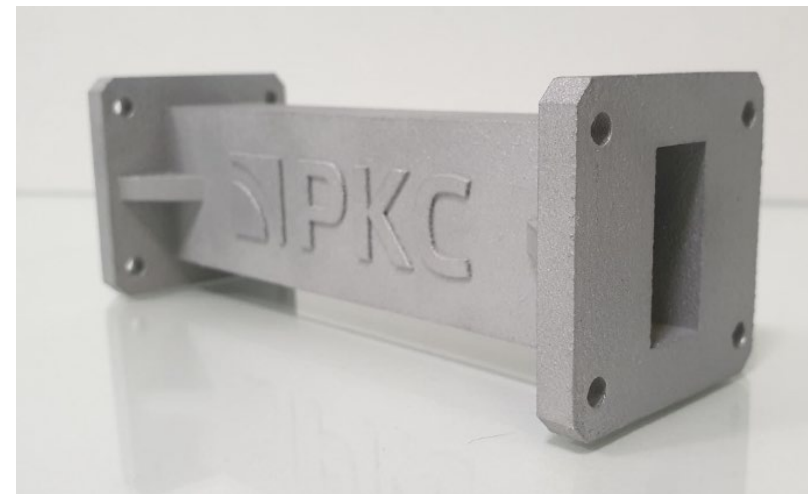
Кронштейн, полученный методами порождающего проектирования, на поддержках



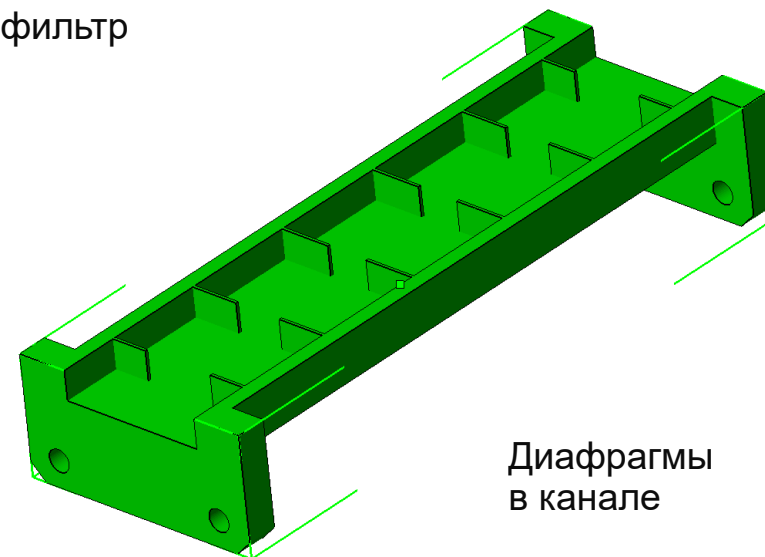
Кронштейн с волноводом

Фильтр

- Заказчик – РКС, Роскосмос
- Частота 8,2 ГГц
- Материал – AlSi10Mg, РУСАЛ
- Объем без поддержек – 57,3 куб. см
- Время печати одного изделия
 - Минимальная загрузка (только 1 изделие на платформе) 19 ч 6 мин
 - Максимальная загрузка (6 изделий на платформе) – 11 ч 8 мин
- Заключение разработчика: «Фильтр, изготовленный по аддитивной технологии, может быть применен в приемной аппаратуре и передающей аппаратуре малой мощности (10 – 20 Вт)»



Напечатанный
фильтр



Диафрагмы
в канале

Фильтр – Перепроектирование



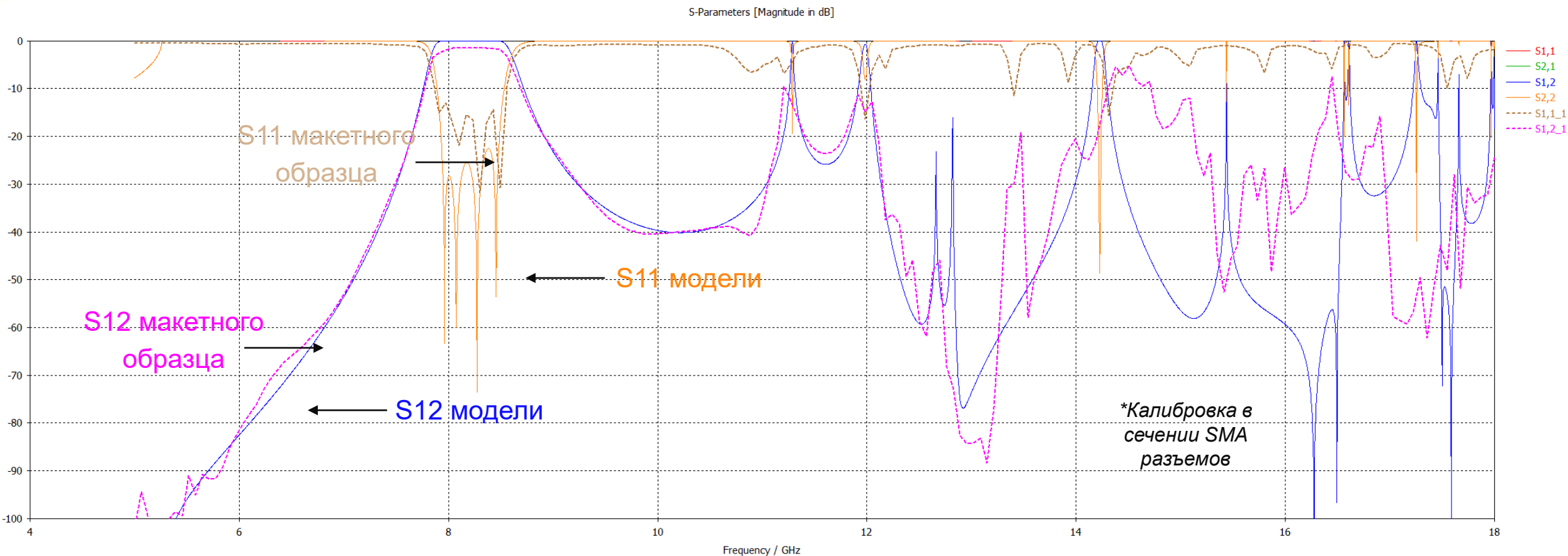
Параметр	Линейный фильтр		Лабиринтный фильтр		Лабиринтный фильтр с решетками	
	Аддитивная технология	Классическая технология	Аддитивная технология	Классическая технология	Аддитивная технология	Классическая технология
Масса, г	155	~ 155	93	~ 93	63	Использование решетчатых структур не представляется возможным из-за технологических ограничений
Время изготовления		~ 1 неделя		~ 1,5 недели		
1 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	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

Специалистами АО «РКС» изменено расположения резонаторов для улучшения электрических параметров (подавления второй полосы пропускания)

Специалистами ООО «Остек-СМТ» спроектированы и оптимизированы решетчатые структуры и уменьшена толщина фланца по результатам прочностного расчета в Netfabb

Фильтр – Электрические характеристики лабиринтного фильтра



- Сплошные линии – расчет, пунктирные – измерения
- Экспериментальные и расчетные характеристики довольно точно совпадают в полосе пропускания
- Потери в сечении фланцев 0,2-0,25 дБ без нанесения серебра
- КСВ не хуже 1,8 при калибровке в сечении SMA разъемов

Фильтр – Результаты перепроектирования

- 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) приемлемы для применения в системах малой мощности
- Испытание на сжатие: нагрузка до **1,5 т** – только упругие деформации

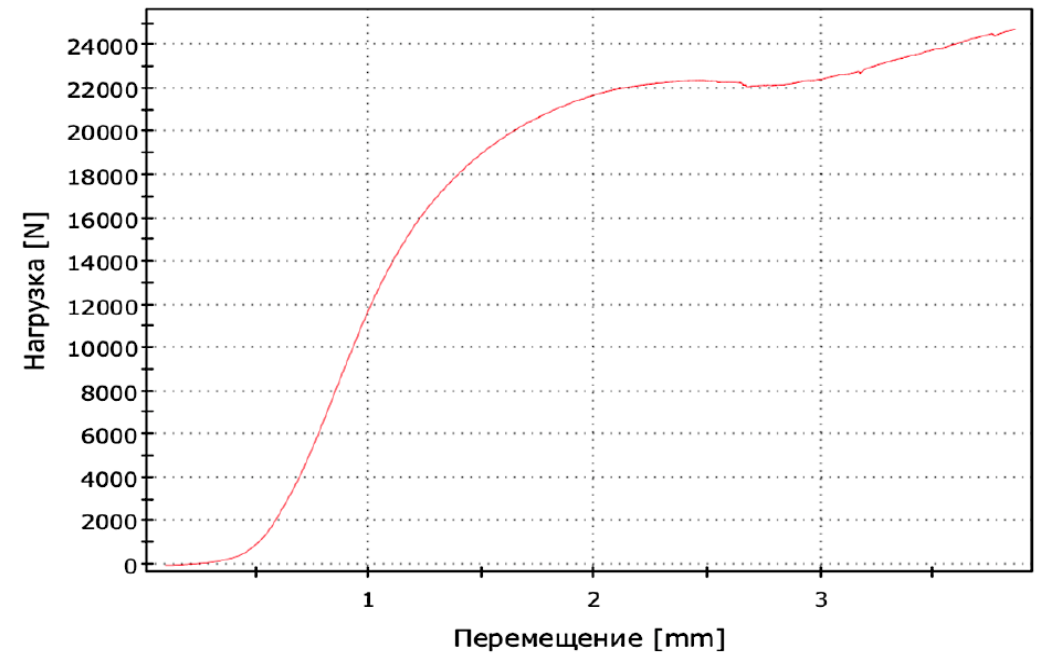
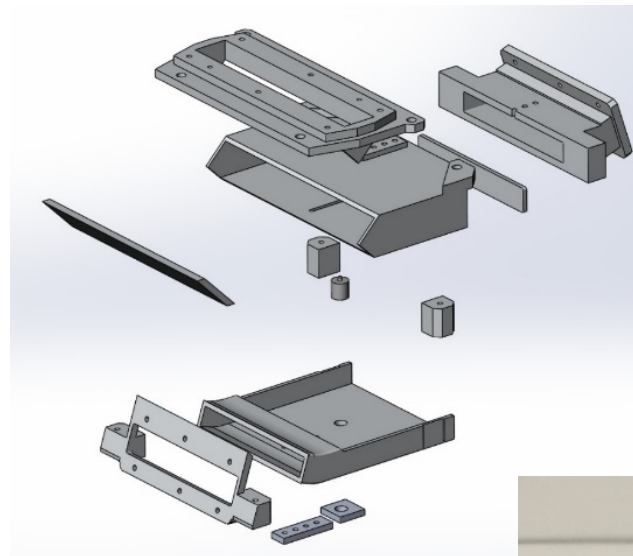


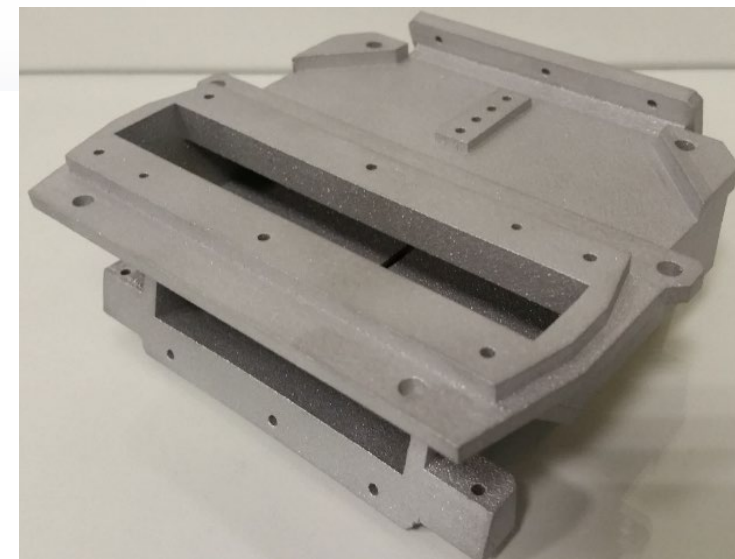
Диаграмма нагрузка- перемещение*

Волноводный разветвитель

- Заказчик – НИИ ТП, Роскосмос
- Частота 3,3 ГГц
- Материал – AlSi10Mg, РУСАЛ
- Объем без поддержек – 127,1 куб. см
- Объем поддержек (спроектированных без использования Netfabb, «с запасом») – 54,6 куб. см
- Время печати в расчете на одно изделие
 - Минимальная загрузка (только 1 изделие на платформе) – 40 ч 30 мин
 - Максимальная загрузка (2 изделия на платформе) – 35 ч 45 мин



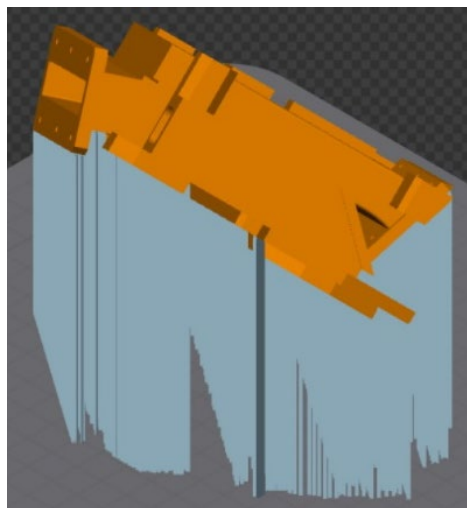
Традиционная технология: 13 деталей, соединяемых пайкой



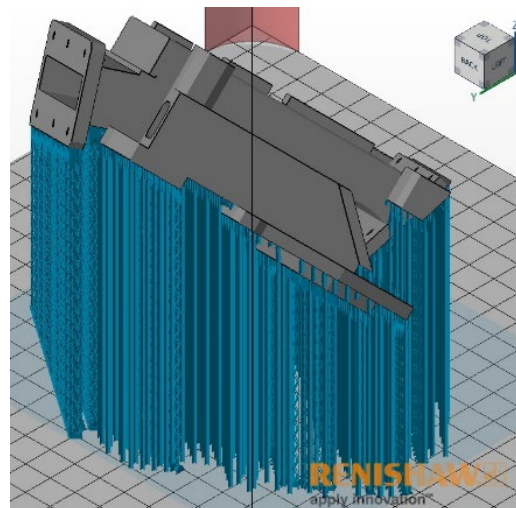
Напечатанный волноводный разветвитель

Волноводные разветвитель – Моделирование процесса печати

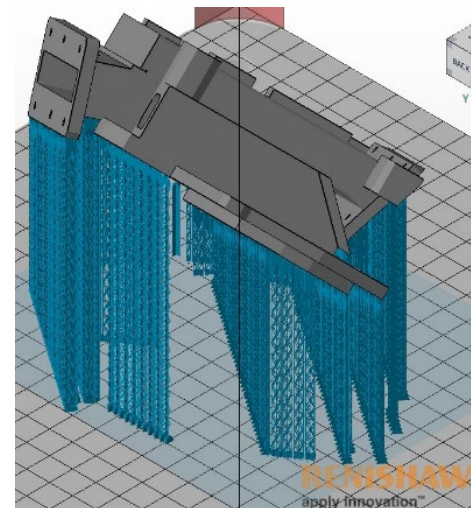
- Объем поддержек уменьшен в **3,8 раза**



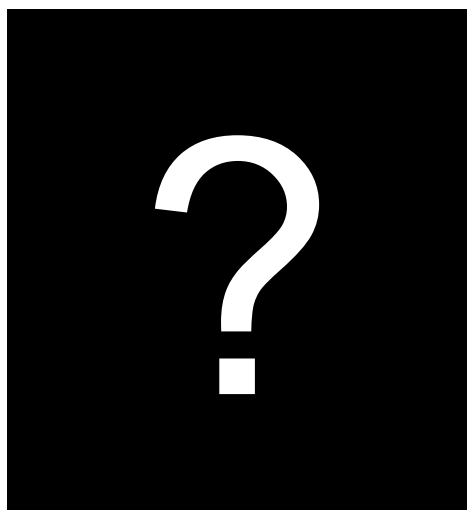
Без
Netfabb



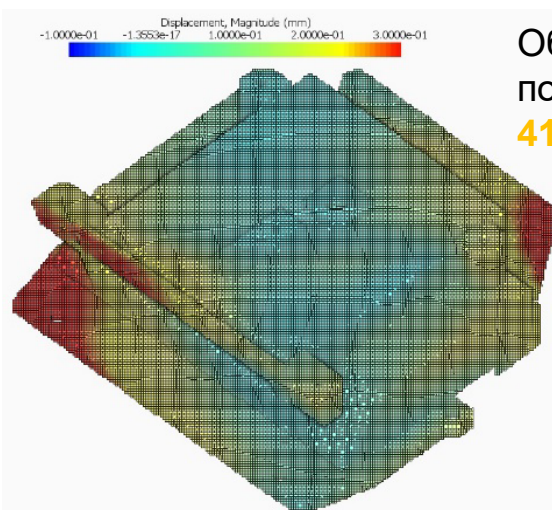
С применением
Netfabb



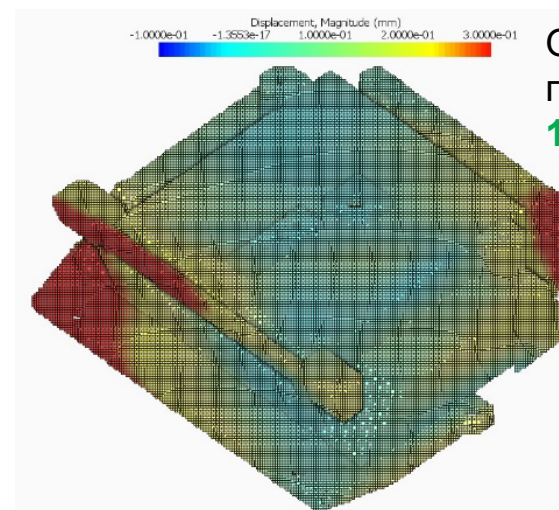
С применением
Netfabb



Объем
поддержек
54,6 см³



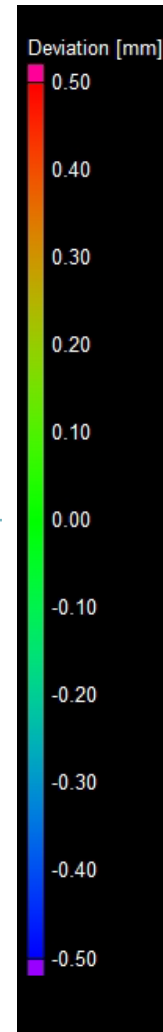
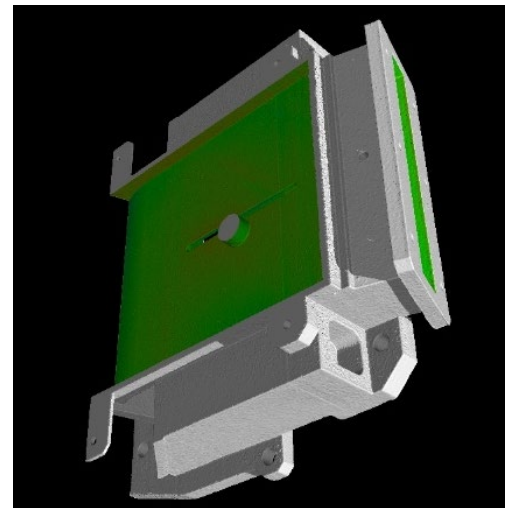
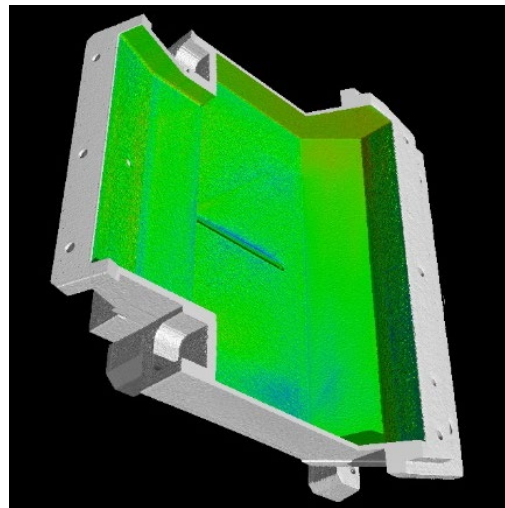
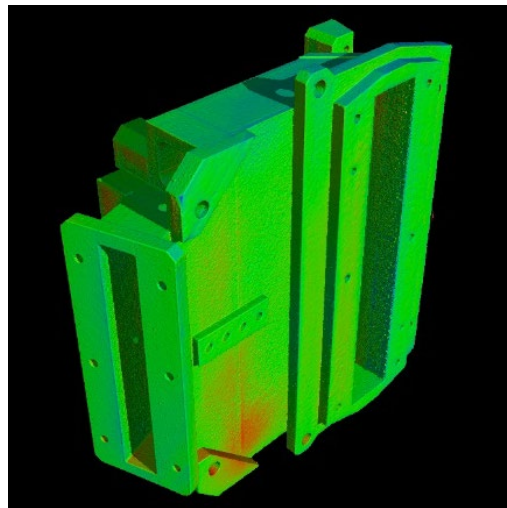
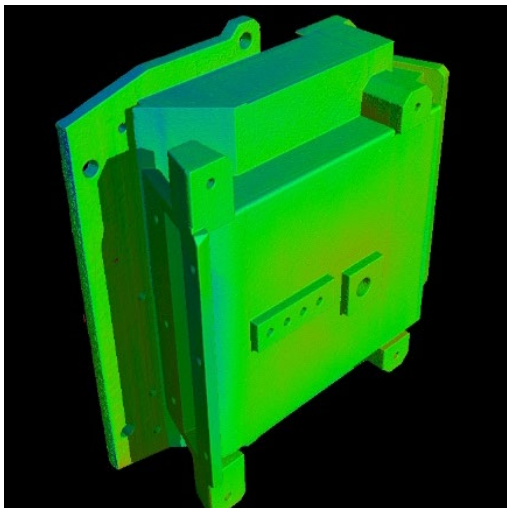
Объем
поддержек
41,8 см³



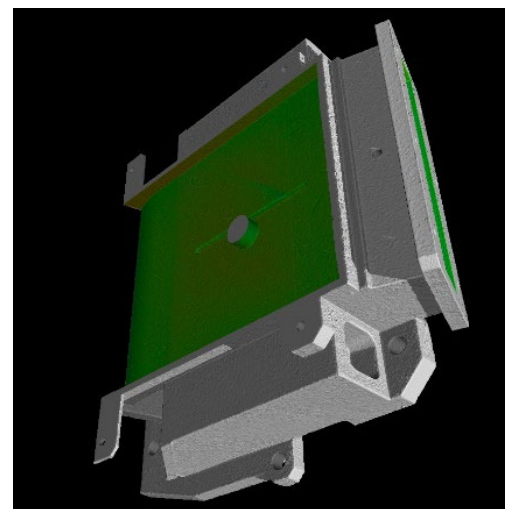
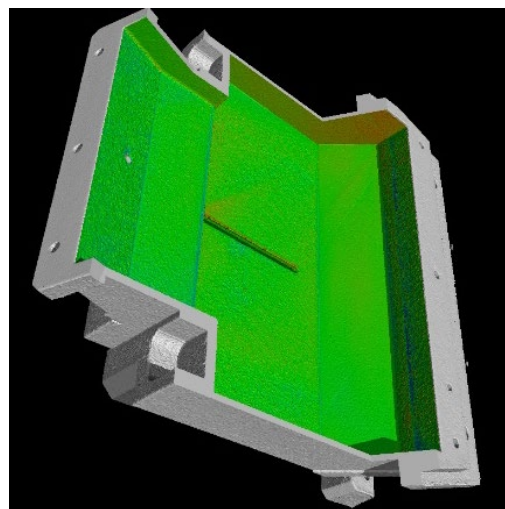
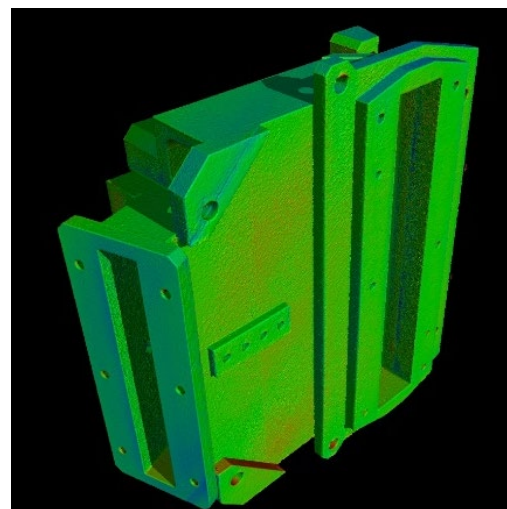
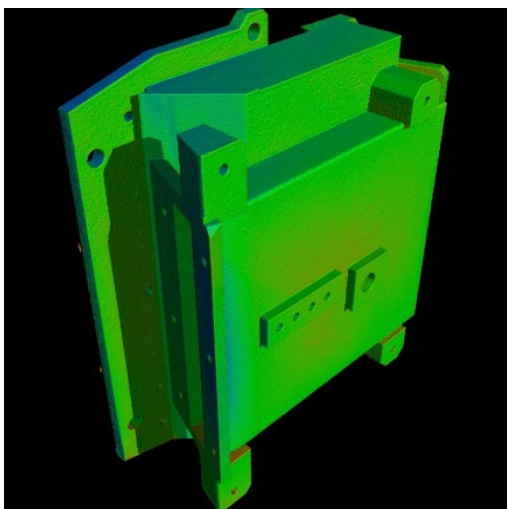
Объем
поддержек
14,5 см³

Волноводные разветвитель – Компьютерная томография

Объем
поддержек
54,6 см³



Объем
поддержек
14,5 см³

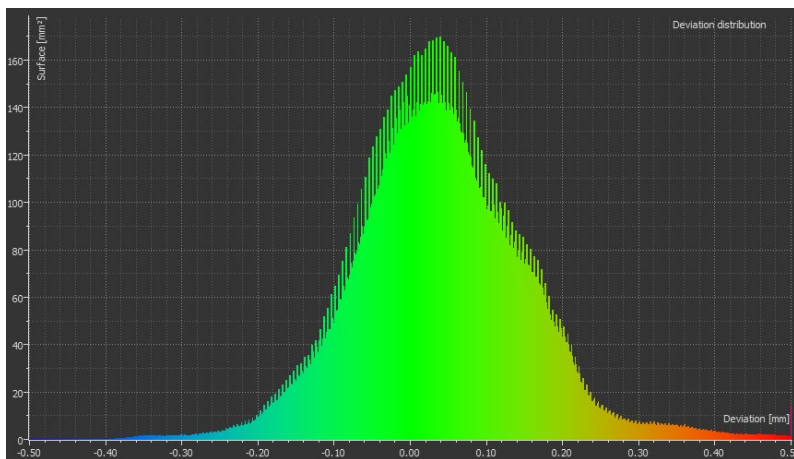


Волноводные разветвитель – Компьютерная томография

- Гистограммы отклонений только для каналов

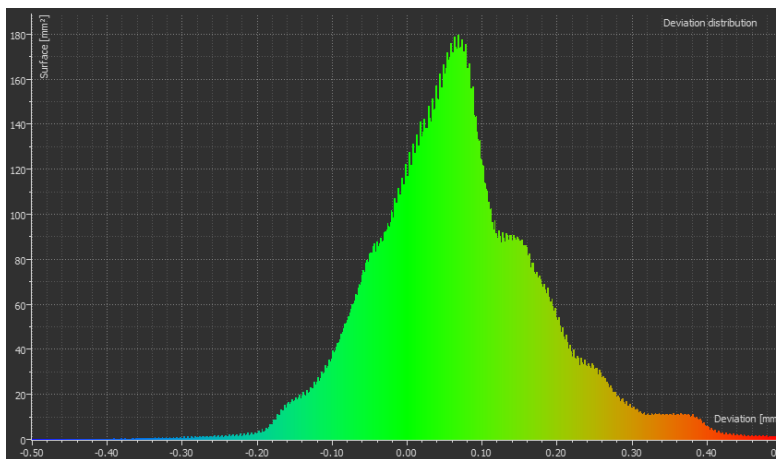
Объем поддержек **54,6 см³**

Оригинальная модель



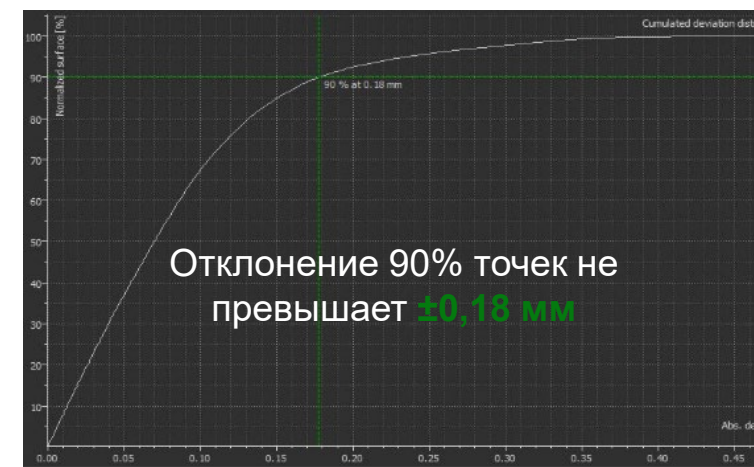
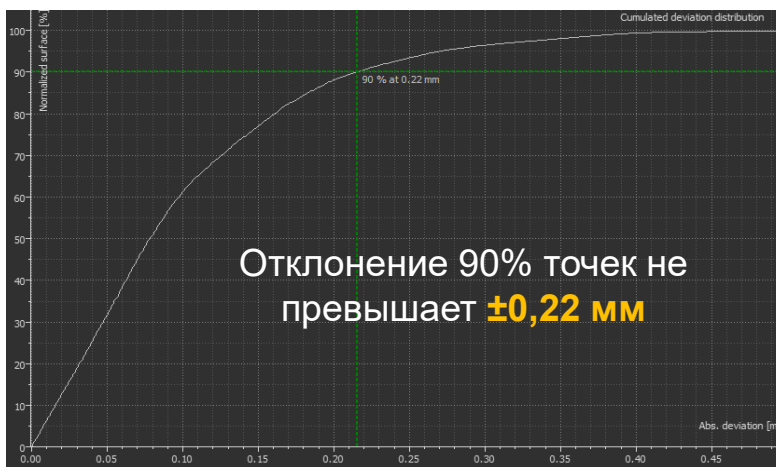
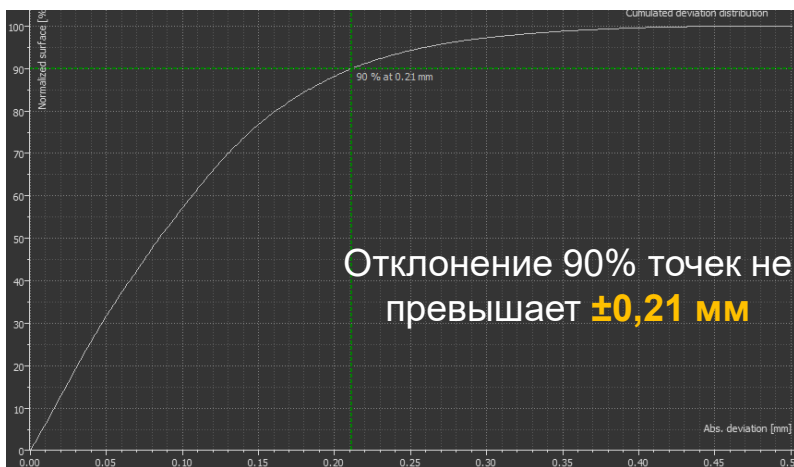
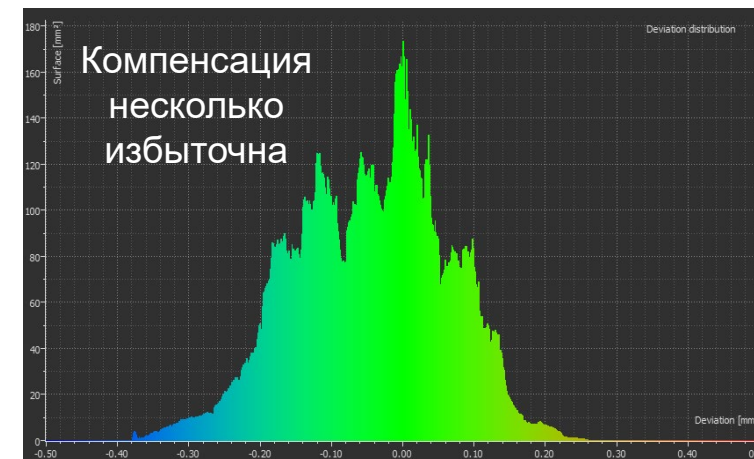
Объем поддержек **14,5 см³**

Оригинальная модель



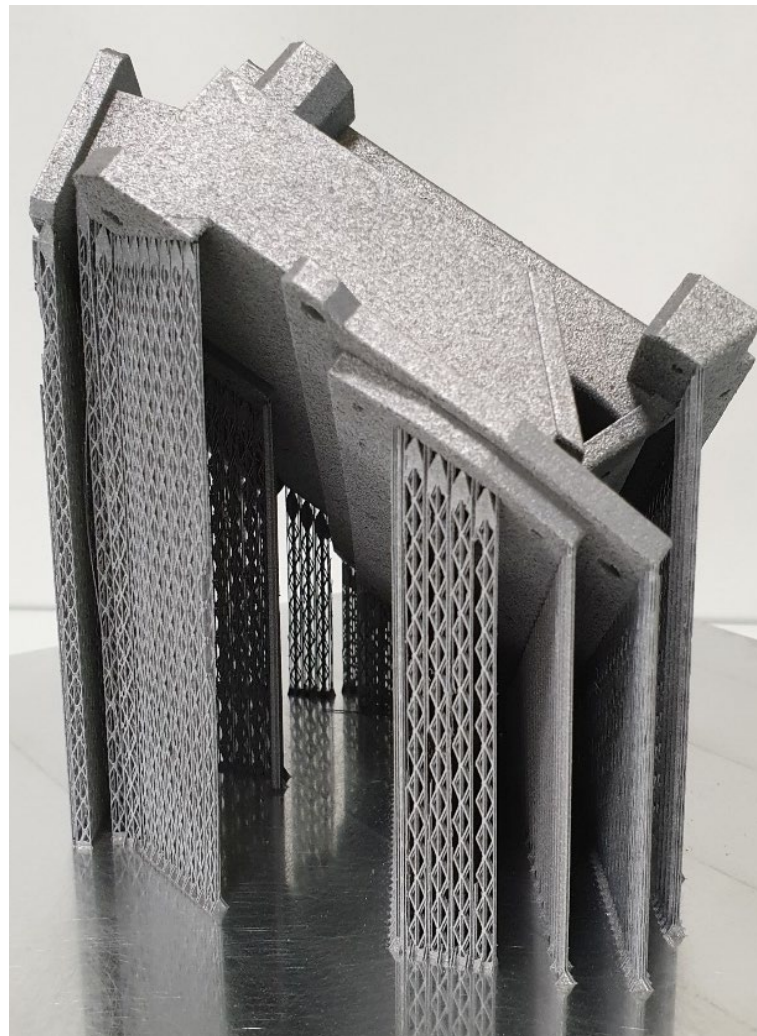
Объем поддержек **14,5 см³**

Скомпенсированная модель



Волноводные разветвитель – Результаты моделирования процесса печати в Netfabb Local Simulation

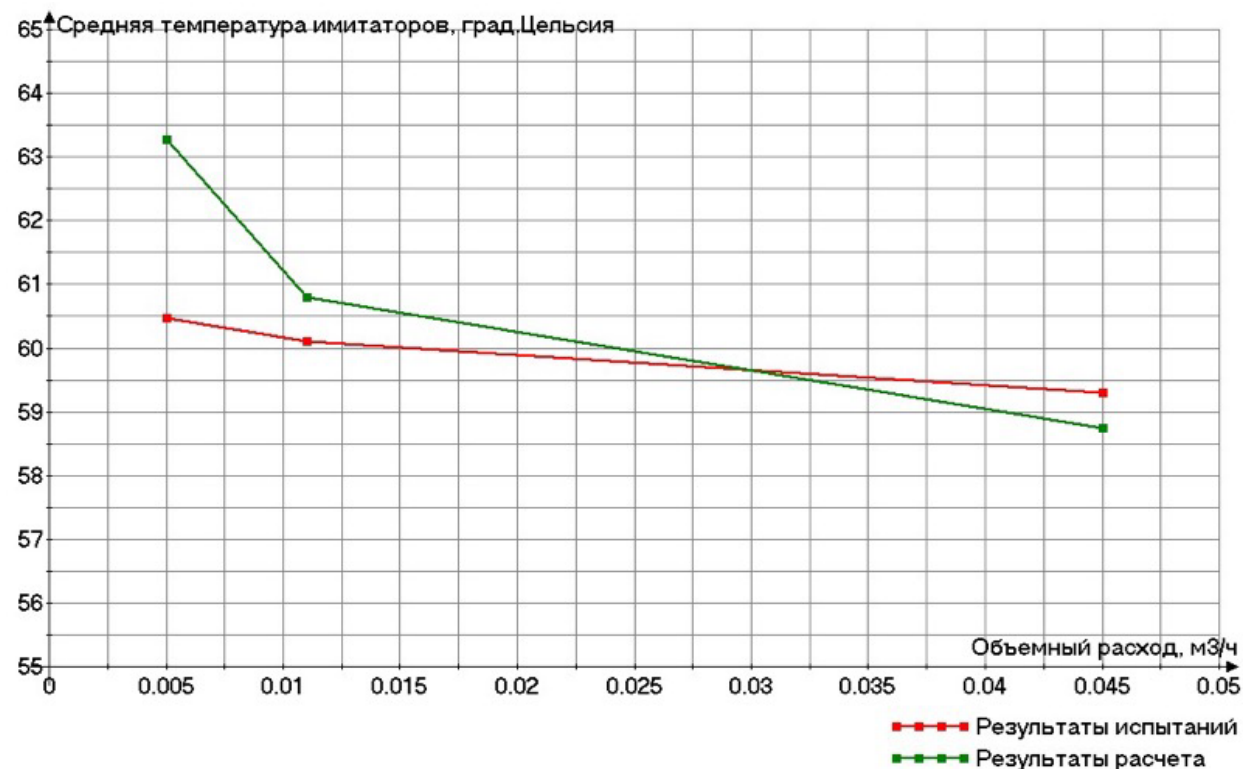
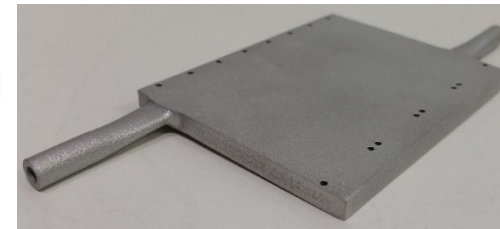
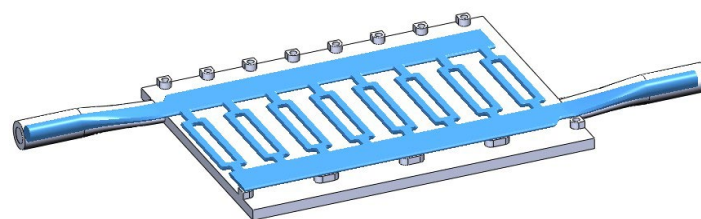
- Уменьшение объема поддержек в **3,8 раза**
- Снижение стоимости печати на **22%**
- Сокращение времени печати на **20%**
- Уменьшение трудоемкости постобработки и объема отходов
- Снижение отклонения напечатанной детали от CAD-модели на **~18%** (может быть еще улучшено подбором коэффициента деформации)



Объем поддержек **11,4%** от объема детали

Корпуса с каналами охлаждения

- Охлаждаемый корпус приемо-передающего модуля АФАР Ка-диапазона
- Заказчик – МАИ
- Материал – AlSi10Mg
- Габаритные размеры 156x65x7 мм
- Сечение каналов в узких местах 1,0x2,4 мм
- Объем без поддержек – 30,4 куб. см
- Время печати в расчете на 1 изделие
 - Минимальная загрузка (только 1 деталь на платформе) – 25 ч 53 мин
 - Максимальная загрузка (6 деталей на платформе) – 7 ч 6 мин
- **Получены приемлемые параметры охлаждения**

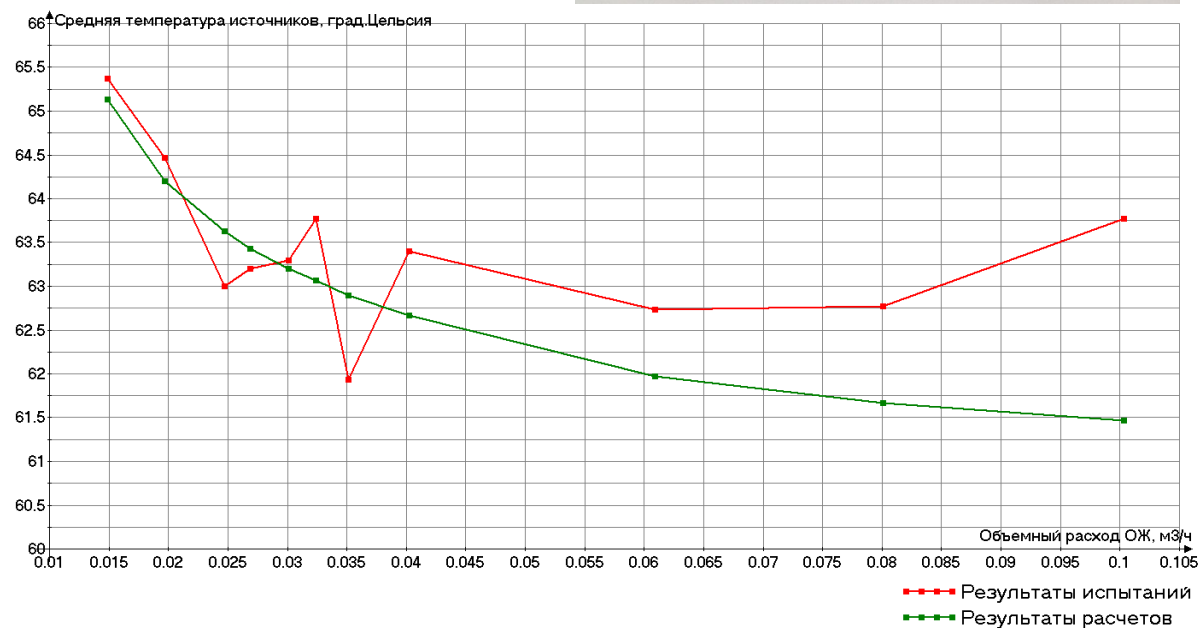
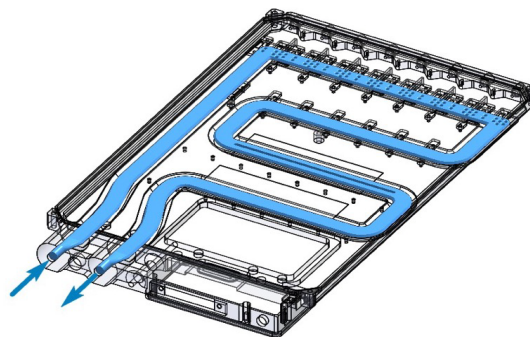


Зависимость средней температуры имитаторов от
объемного расхода охлаждающей жидкости
(Источник: Ю.Соляев, МАИ)

●●●●●●●●
Будущее
создается

Корпуса с каналами охлаждения

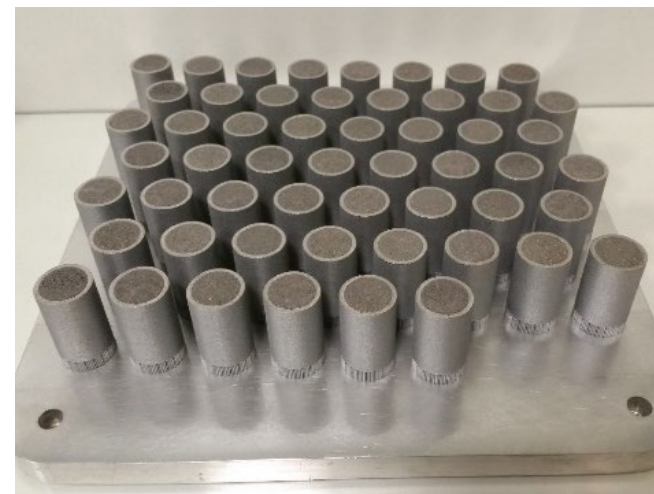
- Охлаждаемый корпус приемо-передающего модуля АФАР X-диапазона
- Заказчик – МАИ
- Материал – AlSi10Mg
- Габаритные размеры 272 x 166 x 17 мм
- Сечение каналов в узких местах 2x4 мм
- Объем без поддержек – 192,6 куб. см
- Объем поддержек – 127,5 куб. см
- Время печати 84 ч
- **Получены приемлемые параметры охлаждения**



Зависимость средней температуры имитаторов от
объемного расхода охлаждающей жидкости
(Источник: Ю.Соляев, МАИ)

Корпуса с тепловыми трубами

- Получены прототипы структур со связной пористостью
- Сплошные структуры – сплавление, пористые – спекание
- Спеченные пористые структуры не требуют удаления порошка (в отличие от сетчатых)
- Коэффициент проницаемости от $\sim 10^{-15}$ до $\sim 10^{-12}$ м² (рассчитан по закону Дарси) в зависимости от режима спекания



Образцы для отработки режимов получения капиллярно-пористой структуры



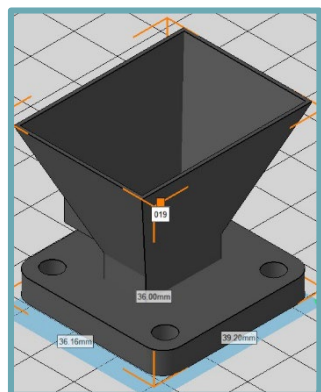
Измерение проницаемости

Рупорные антенны – Серийное производство

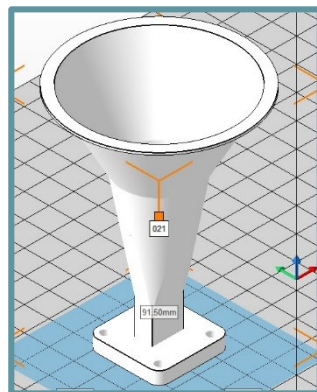
- Заказчик – АО «НИИ «Вектор», Санкт-Петербург
- Рупорные антенны комплексов радиотехнического мониторинга морского базирования (от 2 до 40 ГГц)
- 2019 г. – изготовлены и испытаны опытные образцы
- 2020-21 гг. – изготовлено **~100 шт. серийных рупоров**
- Механическая обработка фланцев и отверстий, нанесение покрытия олово-висмут
- Испытания на стойкость к ВВФ пройдены в составе антенной системы для ГОСТ РВ 20.39.304-98, группа 2.1.3 (аппаратура, устанавливаемая на открытых палубах вне помещений)
- Электрические характеристики соответствуют требованиям



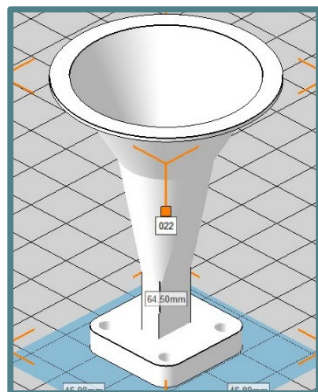
Рупорные антенны – Распределение по частотным диапазонам



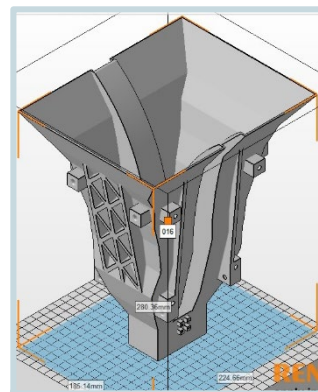
36,2 x 39,2 x 36,0 мм



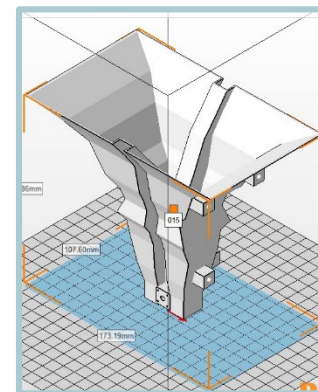
68,0 x 68,0 x 91,5 мм



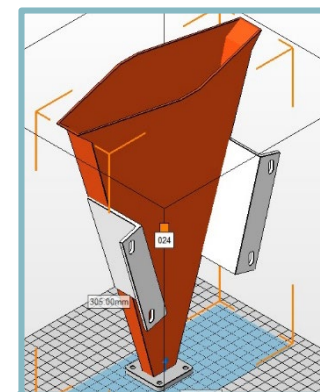
47,0 x 47,0 x 64,5 мм



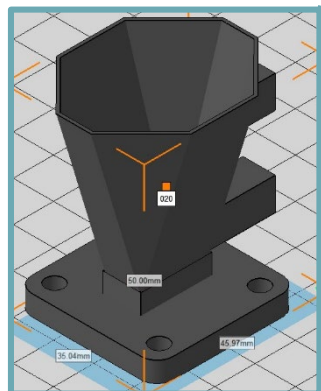
185,1 x 224,7 x 280,4 мм



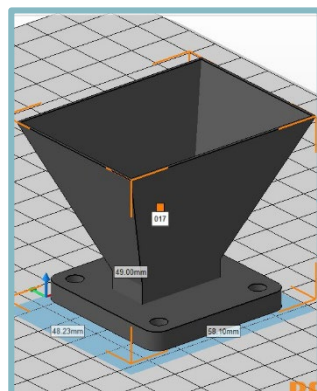
107,6 x 173,2 x 152,9 мм



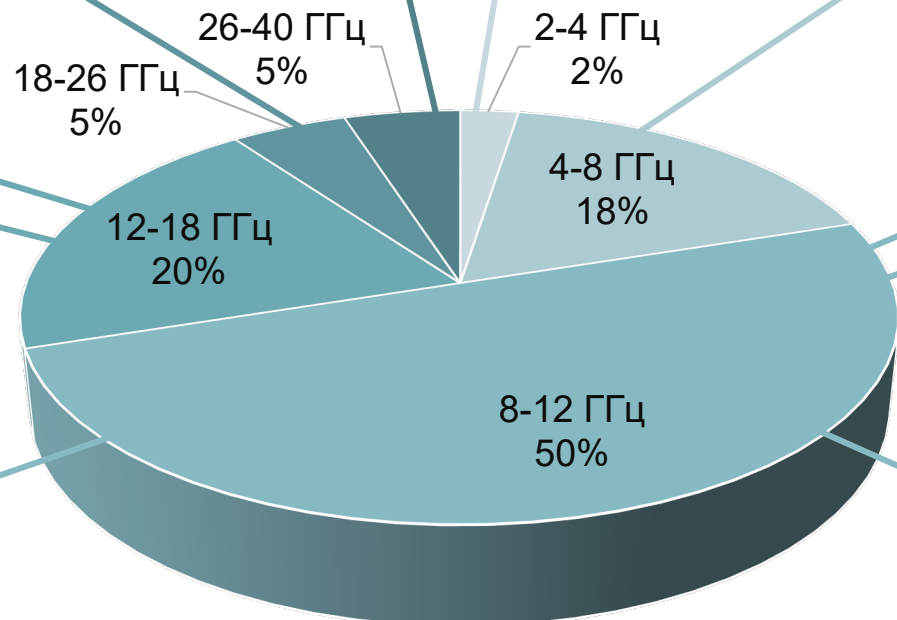
87,4 x 219,0 x 305,0 мм



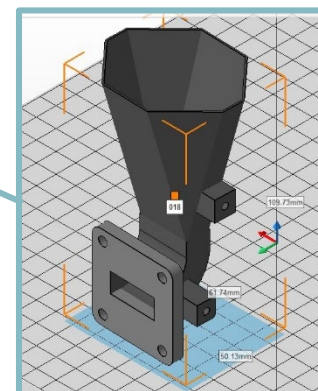
35,0 x 46,0 x 50,0 мм



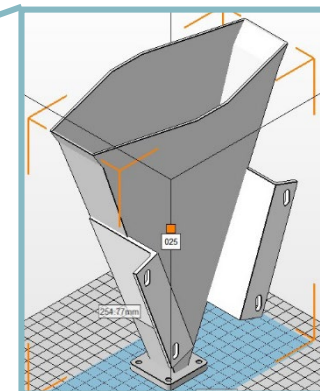
48,2 x 58,1 x 49,0 мм



Данные по заказам первой половины 2021 г.
Габаритные размеры, Д x Ш x В, мм

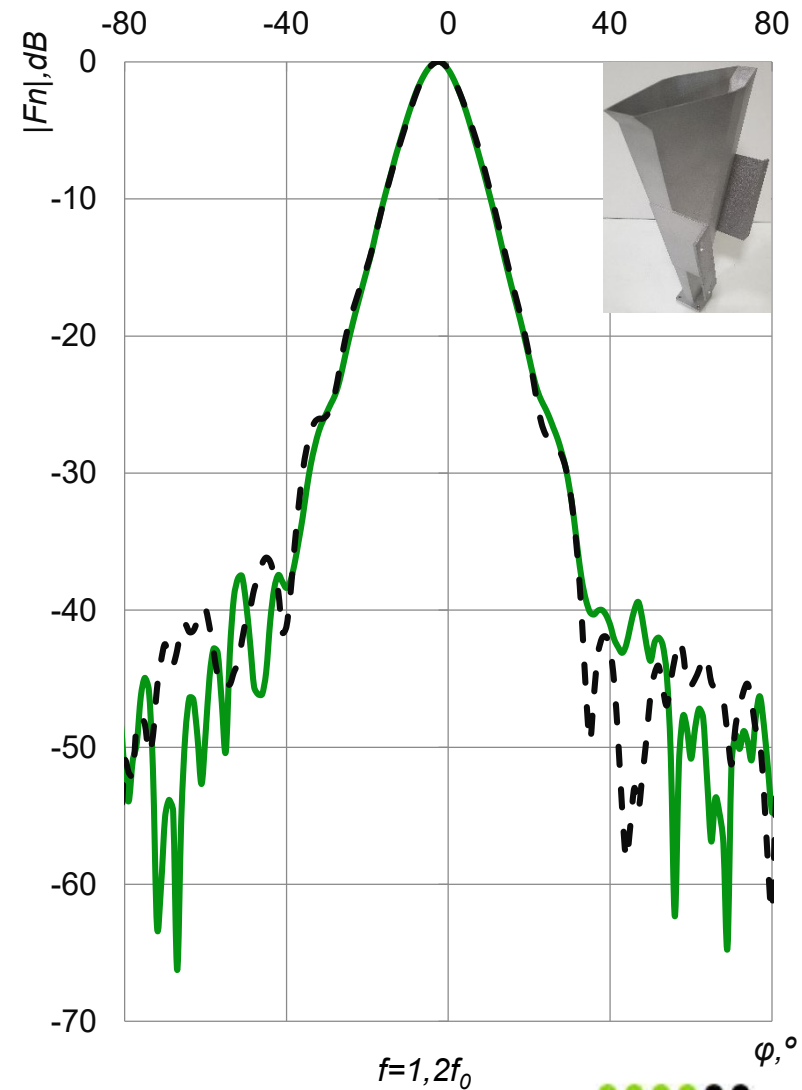
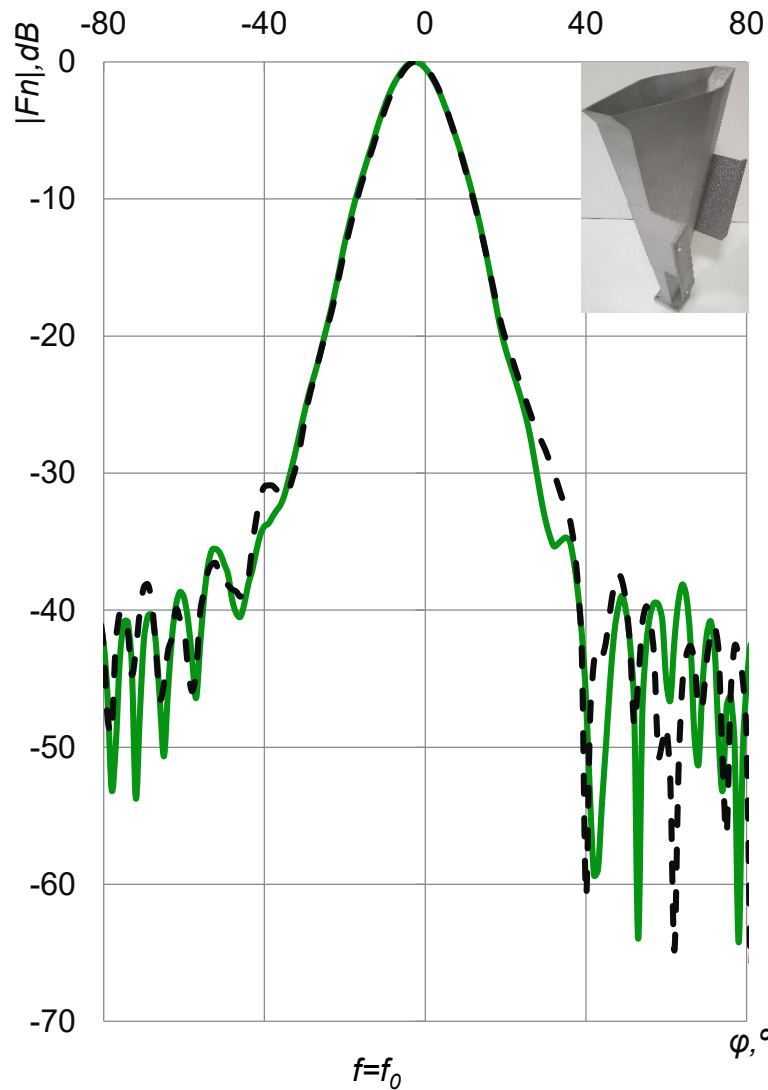
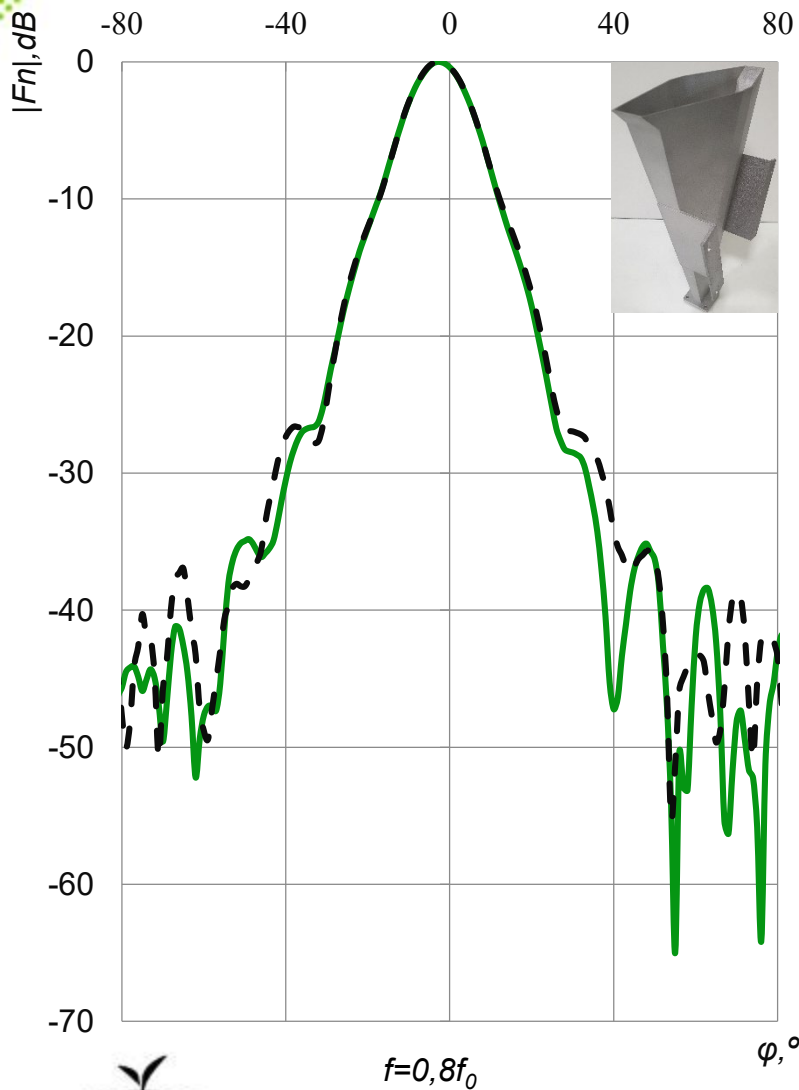


50,1 x 61,7 x 109,7 мм



95,4 x 203,5 x 254,8 мм

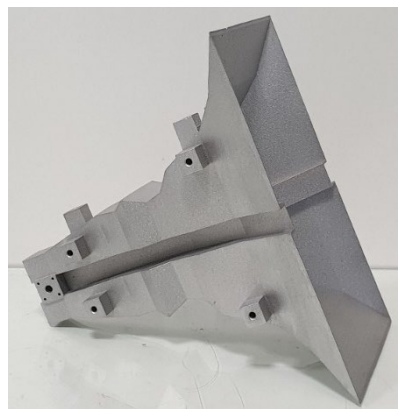
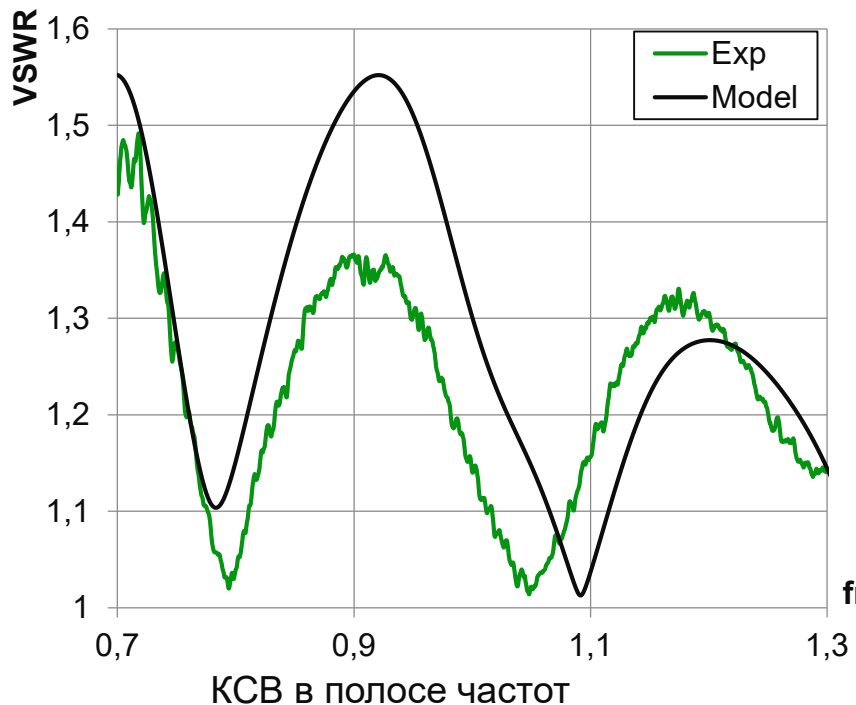
Рупорные антенны – Электрические характеристики



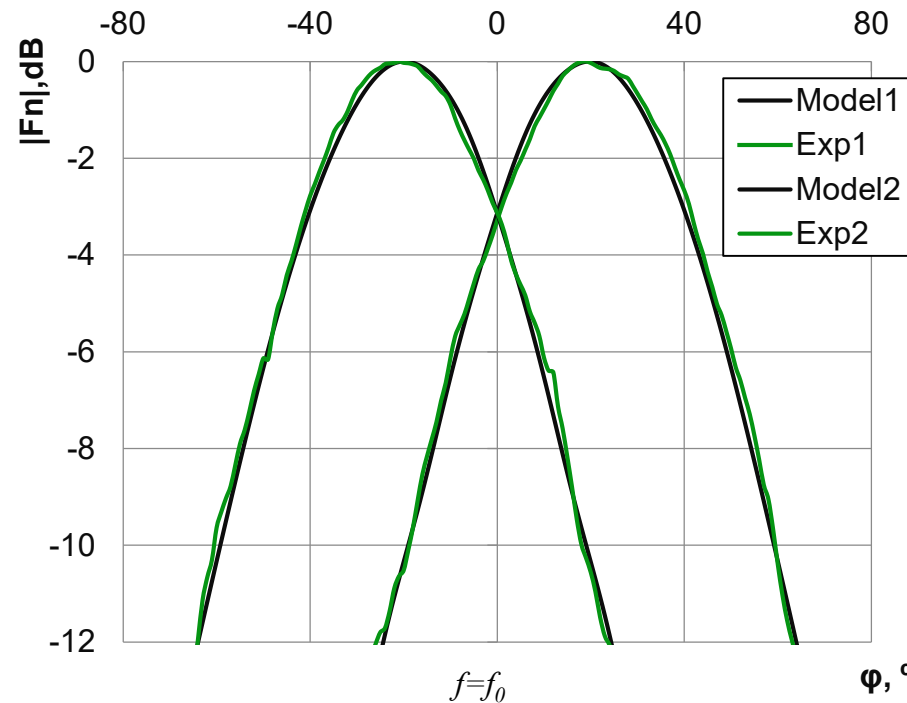
Нормированные диаграммы направленности антенны на минимальной (слева), центральной (в центре), верхней (справа) частоте рабочего диапазона в азимутальной плоскости.

Черным – рупор, изготовленный гальванопластикой, **зеленым** – 3D-печатью

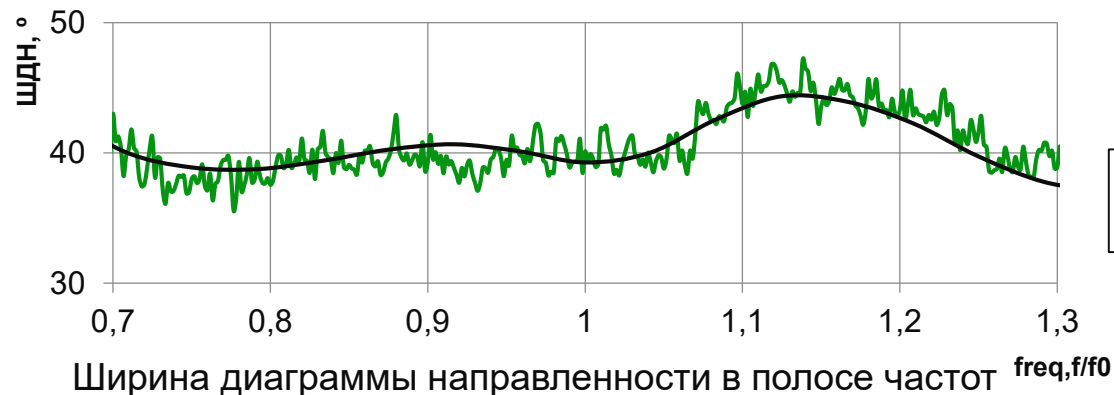
Рупорные антенны – Электрические характеристики



freq, f/f0



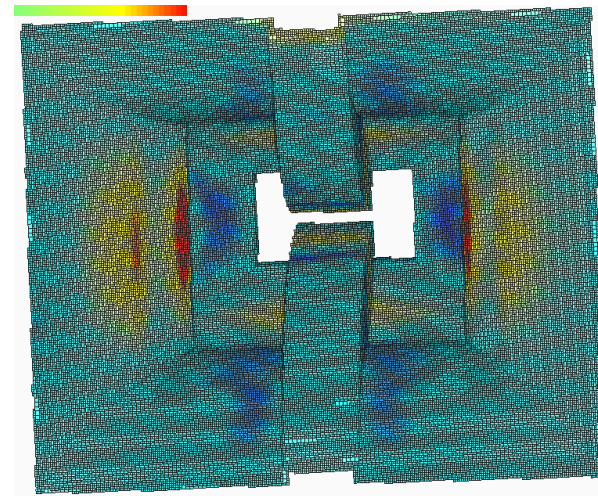
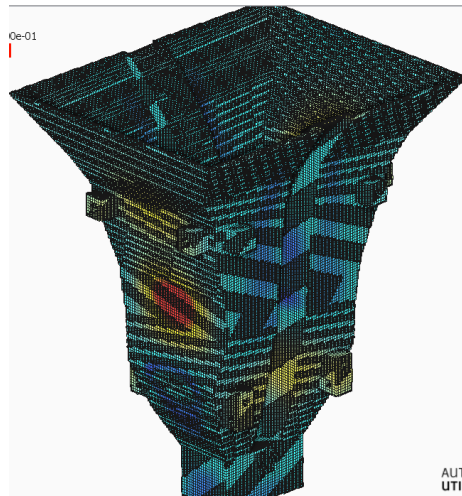
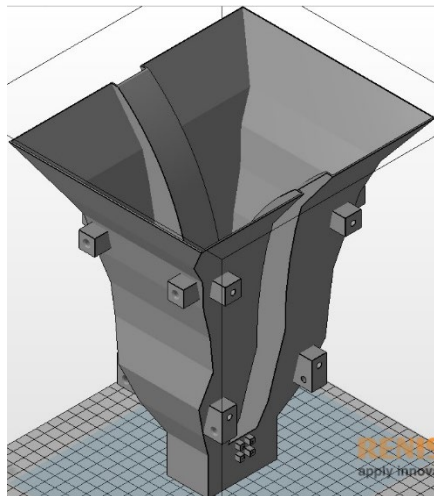
Нормированные диаграммы направленности антенной системы на центральной частоте рабочего диапазона в азимутальной плоскости



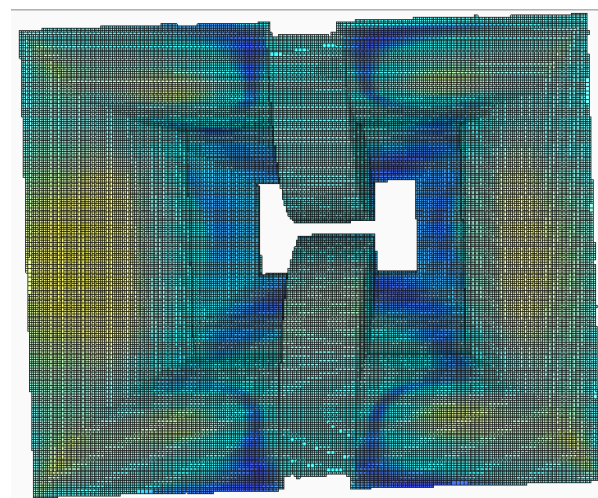
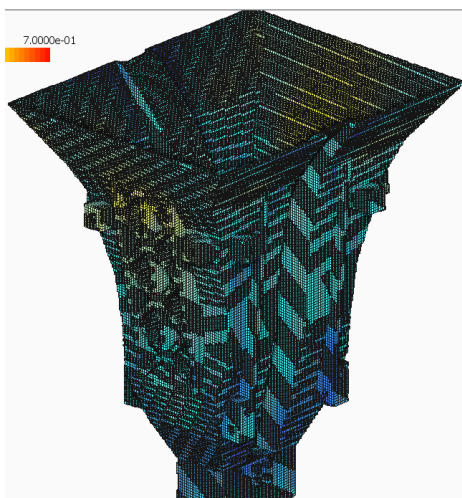
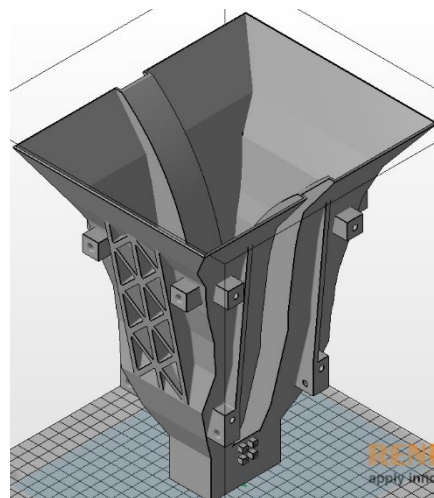
Черные кривые – расчет
Зеленые кривые – измерения

Рупорные антенны – перепроектирование по результатам моделирования процесса печати в Netfabb Local Simulation

Изначальная конструкция рупора.
Толщина стенки 1 мм.
Габаритные размеры
185,1 x 224,7 x 280,4 мм



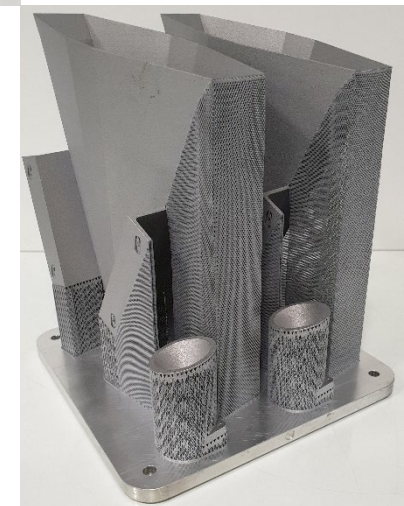
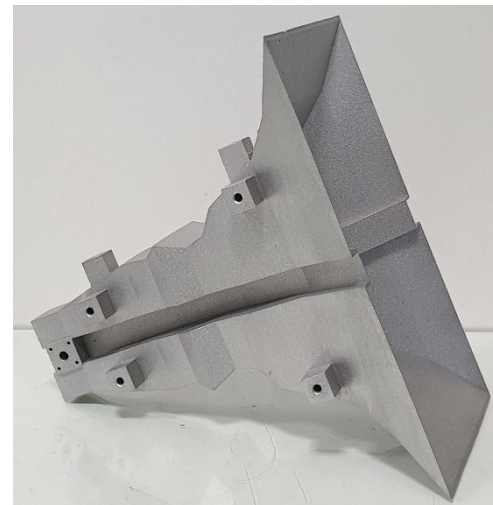
Перепроектированная конструкция рупора.
Толщина стенки 1,5 мм
Ребра жесткости



Прогнозируемые деформации после печати и термообработки

Рупорные антенны – Выводы

- НИИ Вектор, разработчик: «Основными плюсами исполнения антенн методом 3D-печати являются высокая **точность** изготовления и **повторяемость** апертуры излучателя, возможность исполнения изделия **целым**, без дополнительных мест стыковки. **Вес**»
- НИИ Вектор, конструктор: «Изготовление методом 3D-печати позволяет получить сразу готовое изделие, оперативно внести в него изменения по результатам измерений. Метод дает возможность получить изделия **чрезвычайно сложной геометрической формы**, нетехнологичные с точки зрения классической технологии»



Выводы

- Изготовлены опытные образцы изделий космического приборостроения
- Серийное производство рупорных антенн 2-40 ГГц для корабельных комплексов радиотехнического мониторинга
- Перепроектирование, порождающее проектирование, моделирование процесса печати необходимы для использования потенциала АТ:
 - Объединение нескольких деталей в одну (до **32 деталей**)
 - Снижение цены изделия при переходе с классической на аддитивную технологию(до **~10 раз**)
 - Снижение массы (на **56%**)
 - Снижение стоимости напечатанного изделия (до **1,9 раза**)
 - Уменьшение объема поддержек (до **3,8 раза**), трудоемкости постобработки, объема отходов
 - Снижение отклонения напечатанной детали от CAD-модели



Порождающее проектирование кронштейна в Autodesk Fusion 360



Будущее
создается

Будем признательны за выбор нашей компании
в качестве технологического партнера!

Направление цифровых производственных технологий
«Остек-СМТ»

РФ, г. Москва, ул. Кулакова, д. 20 (Технопарк «Орбита»). м. Строгино

Тел./факс: +7-495-788-44-41

e-mail: 3d@ostec-group.ru

Internet: www.ostec-3d.ru

