

Конкурсная работа

# **Освоение и внедрение аддитивных технологий в проектировании и изготовлении металлических деталей авиационной техники**

ПАО «Корпорация «Иркут»

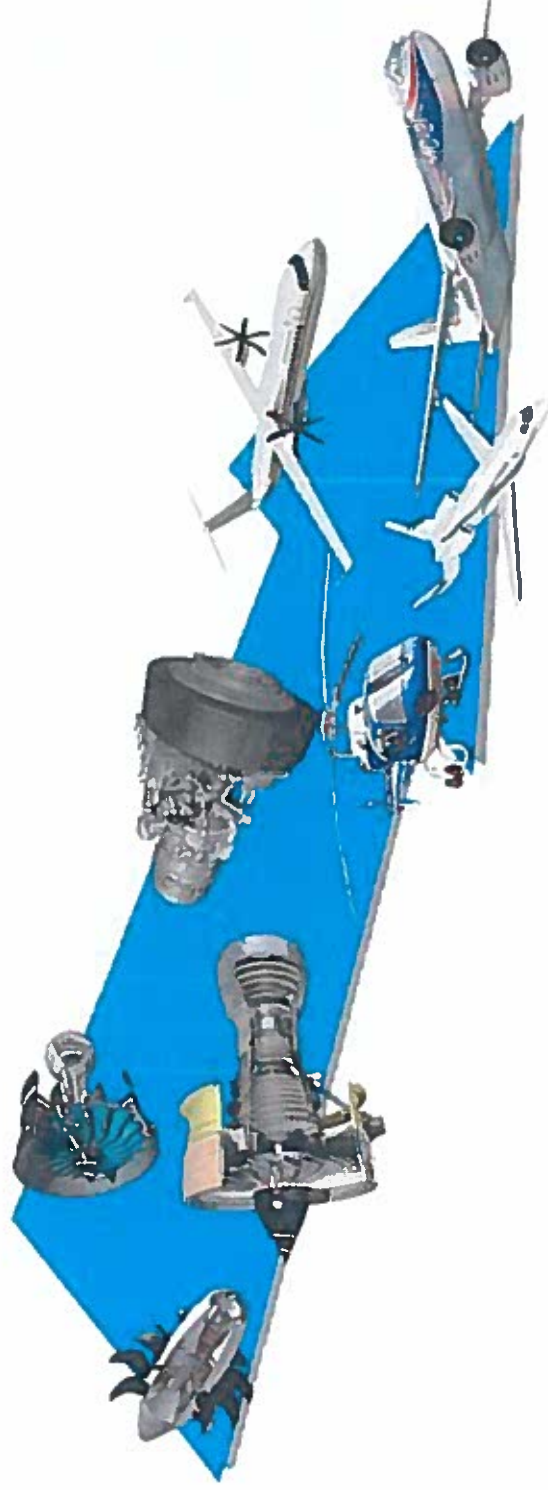
Авторы:

Гвоздева Г.О.

Пашенькин А.Н.

Богданов С.И.

Яшутин А.Г.



# ЦЕЛЬ ПРОЕКТА –

расширение конструктивно-технологических возможностей при проектировании и изготовлении деталей за счет применения аддитивных технологий для достижения следующих эффектов:

## ВОЗМОЖНОСТИ

Изготовление сложнопрофильных деталей

## ДОСТИГАЕМЫЕ ЭФФЕКТЫ

Повышение весовой эффективности (снижение массы, обеспечение равнопрочности) за счет оптимизации формы под действующие нагрузки

Повышение коэффициента использования материала, сокращение отходов (бережливая технология)

«Свёртка» сборки (повышение осматриваемости деталей, «свёртка» стыков)

Сокращение сроков изготовления и поставки деталей, сокращение сроков внесения изменений в конструкторскую документацию

Оперативное безоснасточное производство единичных деталей

Сокращение себестоимости, сроков изготовления и поставки деталей для поддержки испытаний и поддержки эксплуатации ЛА, снятых с серийного производства – обеспечение опытного производства

# РЕЗЮМЕ ПРОЕКТА

- ✓ Теоретические и экспериментальные исследования для определения областей эффективного использования аддитивных технологий в создании ЛА, формирование научно-технического задела ПАО «Корпорация «Иркут»
- ✓ Разработка многолетней программы внедрения аддитивных технологий в проектирование и изготовление металлических деталей авиационной техники, включающей:
  - планирование и создание опытного производственного участка
  - комплекс работ по разработке конструкторской, технологической и нормативной документации на процессы проектирования, изготовления и испытаний
  - создание инженерного коллектива, компетентного в области проектирования элементов конструкций ЛА с высокой весовой эффективностью
  - комплекс сертификационных работ по материалам, процессам и конструкциям

# ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТА

- Показаны перспективы расширения конструктивно-технологических возможностей при проектировании и изготовлении деталей ЛА за счет внедрения аддитивных технологий
- Создан научно-технический задел ПАО «Корпорация «Иркут» в области освоения аддитивных технологий
- Расширены компетенции коллектива в новых подходах к проектированию
- Показана потребность в новой профессии «системного» инженера, интегрирующего компетенции конструктора, технолога и расчетчика
- Определена номенклатура деталей, для изготовления которых целесообразно применение аддитивных технологий
- Разработан проект программы внедрения аддитивных технологий в процесс проектирования и производства ЛА ПАО «Корпорация «ИРКУТ», включающий создание опытного производственного участка аддитивного изготовления деталей конструкции ЛА; создание инженерного коллектива, компетентного в области проектирования элементов конструкций ЛА с высокой весовой эффективностью; создание НТД предприятия по порядку проведения и содержания работ, связанных с использованием аддитивных технологий
- В обоснование программы разработаны проекты документов: ТЗ, ТЭО программы, дорожная карта внедрения аддитивных технологий в проектирование и изготовление деталей ЛА ПАО «Корпорация «Иркут» с учетом особенностей сертификации гражданской авиатехники

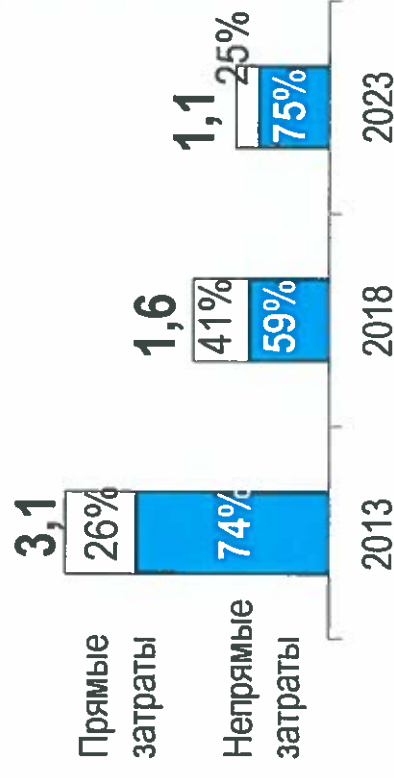
# ПАСПОРТ ПРОЕКТА

- ЗАДАЧИ**
- Изучение технологических возможностей аддитивного производства
  - Освоение методик (пере-) проектирования деталей конструкции ЛА на основе результатов оптимизации
  - Категоризация деталей конструкции ЛА по эффективности (целесообразности) их (пере-) проектирования на основе оптимизации и изготовления аддитивными технологиями
  - Выбор опытного образца и его перепроектирование с применением оптимизации
  - Поверочный расчет прочности полученной конструкции
  - ТЭО целесообразности применения аддитивных технологий для изготовления опытного образца
  - Разработка перечня, изготовление и испытания образцов-свидетелей
  - Подготовка производства, изготовление и натурные испытания опытных образцов
  - Сопоставление результатов расчетов и экспериментальных работ (валидация)
  - Анализ особенностей процедуры сертификации ЛА, связанных с применением аддитивных технологий
  - Разработка проекта программы освоения и внедрения нового технологического процесса (аддитивная технология)
  - Разработка программы внедрения аддитивных технологий в процесс проектирования и производства ЛА ПАО «Корпорация «Иркут», в том числе ТЗ, ТЭО, дорожная карта
- ЭТАПЫ ПРОЕКТА**
- Проведение пилотного проекта, включающего перепроектирование, изготовление и испытания опытных образцов *(срок реализации 9 мес.)*
  - Разработка программы внедрения аддитивных технологий в проектирование и изготовление деталей ЛА ПАО «Корпорация «Иркут» *(срок реализации 3 мес.)*

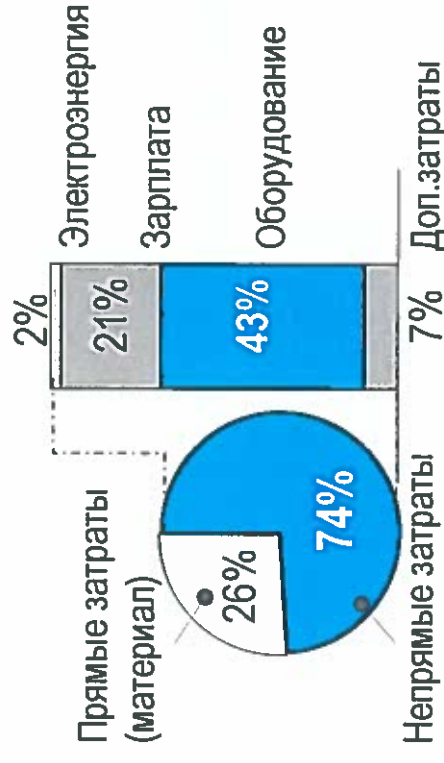
# ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРОЕКТА

- Несмотря на очевидные преимущества, широкое внедрение аддитивных технологий сдерживается высокой стоимостью изготовления изделий
- Бурное развитие направления ведет к снижению стоимости основных составляющих: материала и оборудования
- Европейские авиационные власти ведут интенсивную работу по установлению подходов к сертификации конструкций ЛА, полученных по аддитивным технологиям
- В России, благодаря наличию уникальной научной школы лазерной обработки материалов и существенного задела в области порошковой металлургии, имеются благоприятные условия для развития инновационного направления аддитивного производства

Прогноз динамики стоимости, €/см<sup>3</sup>

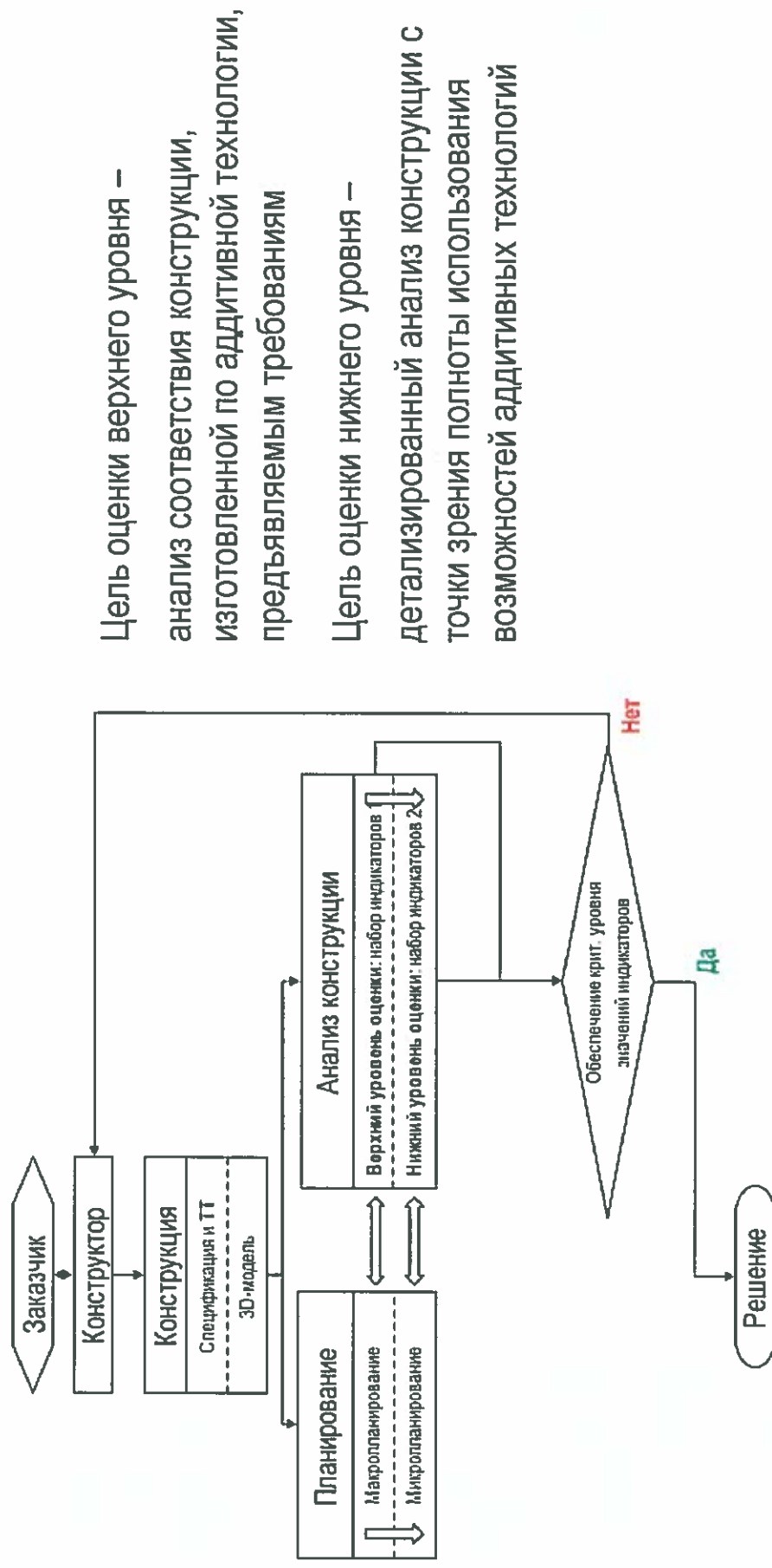


Технологическая стоимость изготовления изделия аддитивными технологиями



# АЛГОРИТМ ВЫБОРА ДЕТАЛЕЙ

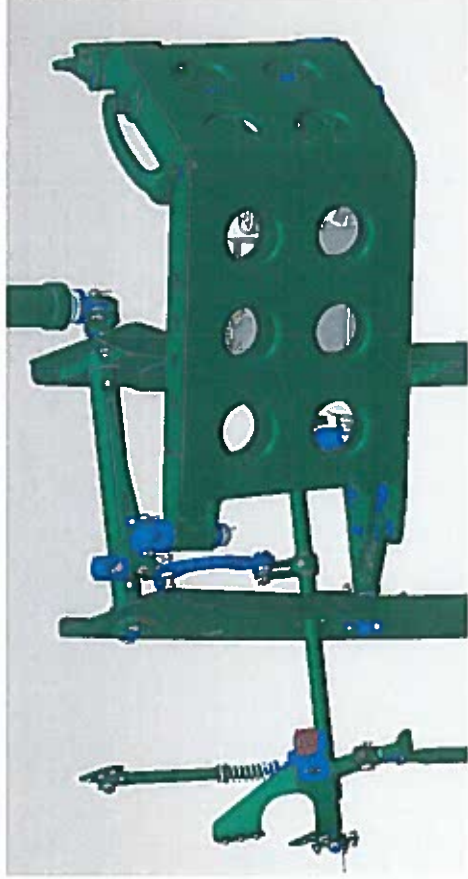
- Разработан алгоритм оценки целесообразности применения аддитивных технологий в проектировании и изготовлении деталей ЛА
- Сформирован проект перечня деталей для изготовления методами аддитивного производства



# ВЫБОР ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА, ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ

## КРИТЕРИИ ВЫБОРА:

- ➔ не относится к основным силовым элементам, не воспринимает полетных нагрузок и нагрузок от избыточного давления
- ➔ сложная конфигурация, значительный объем сборки
- ➔ потенциал для улучшения эксплуатационных характеристик



## Рычаг навески двери

Объем сборки: 28 деталей (без учета крепежа)

Материал: лист 1163AM

Масса изделия: 4,28 кг (б/учета крепежа)

Максимальные перемещения относительно недеформированного состояния: ~5 мм

## ЗАДАЧА:

- ➔ апробация аддитивных технологий и топологической оптимизации в разработке конструкций ЛА
- ➔ сокращение объема сборки
- ➔ повышение жесткости конструкции

# СХЕМА РЕИНЖИНИРИНГА ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

1. Исходная конструкция



2. Расчетная схема



3. Топологическая оптимизация



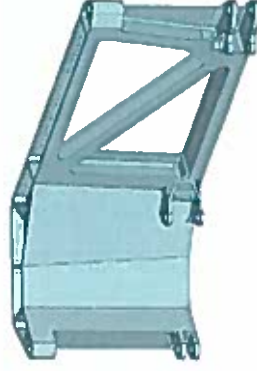
6. Изготовление



5. Технологическая проработка



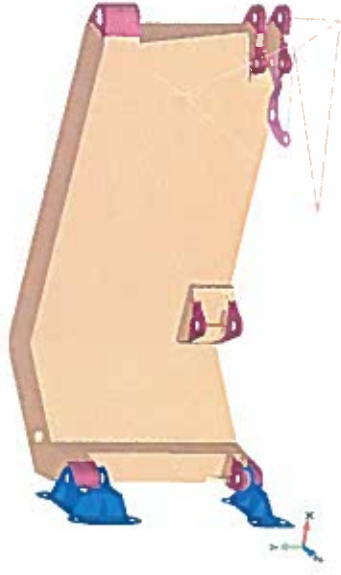
4. Варианты конструкции



# РЕЗУЛЬТАТЫ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

- Проведена топологическая оптимизация конструкции под действующие нагрузки
- Получен геометрический образ оптимальной формы детали
- Проведена конструкторско-технологическая проработка полученного образа, разработаны варианты конструкции

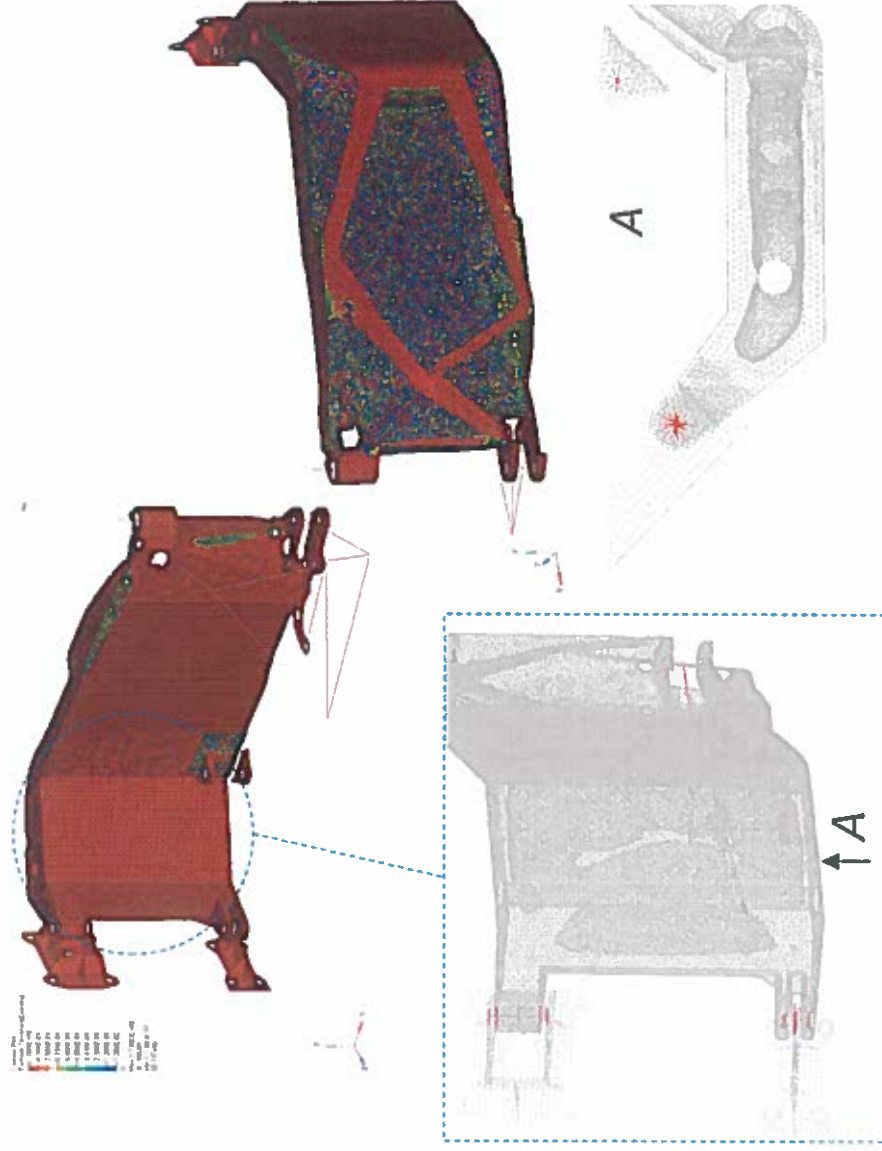
Определение пространства для оптимизации



- Пространство для проектирования
- Зоны сопряжения, исключенные из пространства для проектирования
- Окружающая конструкция



Результаты оптимизации



# ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛОВ

## КРИТЕРИИ ВЫБОРА УСТАНОВКИ

- возможность работы с основными авиационными материалами (сплавы на основе Al, Ti; стали)
- габариты камеры в соответствии с размерами деталей выбранной номенклатуры
- опыт производителя
- наличие оборудования в научных и производственных организациях на территории РФ, занятых в области аддитивного производства

## ВЫБРАНО

- Наиболее распространенные в РФ установки от 3-х ведущих мировых производителей:
  - SLM 280HL TWIN (рабочая зона 280x280x365 мм)
  - EOS M290 (рабочая зона 250x250x325 мм)
  - Concept Laser M2 (рабочая зона 250x250x280 мм)
- 3 группы материалов:
  - сплавы на основе Al
  - сплавы на основе Ti
  - стали

# ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

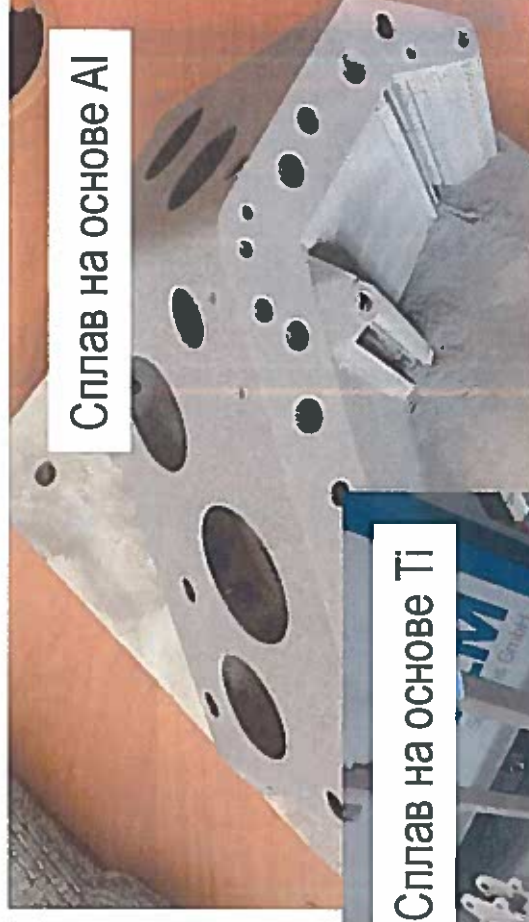
- Проведена оценка затрат на изготовление детали «Рычаг двери» по аддитивной технологии с учетом выбранного оборудования и материалов
- Показано, что затраты на изготовление детали «Рычаг двери» по аддитивной технологии не превосходят затрат на изготовление по традиционной технологии

## Затраты на изготовление детали «Рычаг двери», руб

Исходная конструкция	Оптимизированная конструкция		
	Вариант №1 (Сталь)	Вариант №2 (Al)	Вариант №3 (Ti)
Затраты на материал	120 000	17 200	127 050
Затраты на комплектующие	0	0	0
Затраты на оплату труда	4 900	4 900	4 900
Затраты на оборудование, накладные расходы	58 400	72 900	22 000
<b>ИТОГО</b>	<b>184 185</b>	<b>~183 000</b>	<b>~154 000</b>

# ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПРОТОТИПОВ

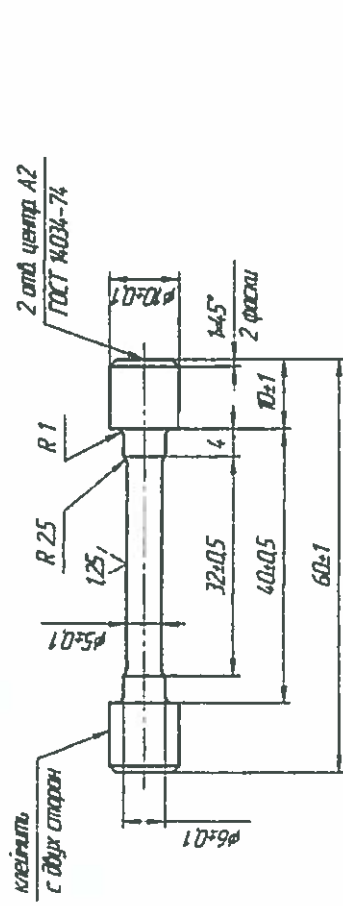
- Изготовлены три опытных образца детали различной конфигурации и из различных материалов: сплав на основе Al, сплав на основе Ti, сталь
- Изготовлены образцы-свидетели в одном технологическом цикле с деталью



# ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ-СВИДЕТЕЛЕЙ

- ✓ Разработан перечень образцов-свидетелей (мин. 3 образца в каждом из направлений 0, 45, 90 град)
- ✓ Проведены испытания образцов-свидетелей в соответствии с ГОСТ 1497-84
- ✓ Подтверждены механические характеристики материала, заявленные в НД
- ✓ Полученные кривые деформирования использованы для проведения поверочного расчета прочности

Эскиз образца

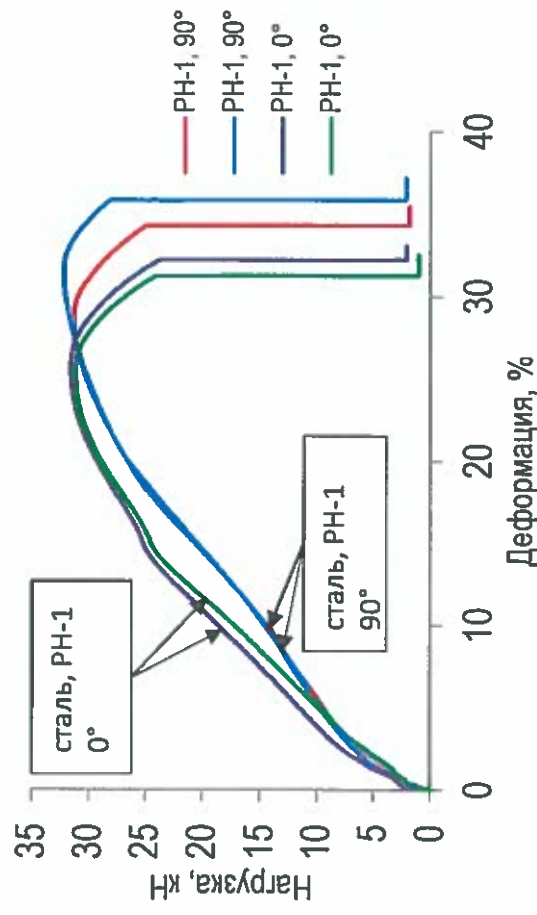


Бюксы шпильки-сваго образца при проверке в центрах не должны превышать 0,02 мм

Вид образца после испытаний



Диаграмма растяжения образцов  
(на примере стали РН-1)



# ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ

- Разработаны подробные твердотельные конечно-элементные модели, отражающие физические свойства материала и действительные условия испытаний
- Проведен поверочный расчет прочности принятых вариантов конструкции
- Показано обеспечение требуемого уровня прочности и жесткости конструкции

Модель, отражающая реальные условия испытаний  
на примере образца из Ti-сплава






Результаты расчета  
(распределение эквивалентных напряжений)  
на примере образца из Ti-сплава



# НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ

- Разработана программа испытаний, проведены натурные испытания
- Показано соответствие результатов расчета и эксперимента: отклонение расчетных и экспериментальных значений деформаций конструкции не превышает 10% в зачетных зонах
- Показано обеспечение требуемого уровня прочности и жесткости конструкции, продемонстрировано соответствие проектным требованиям

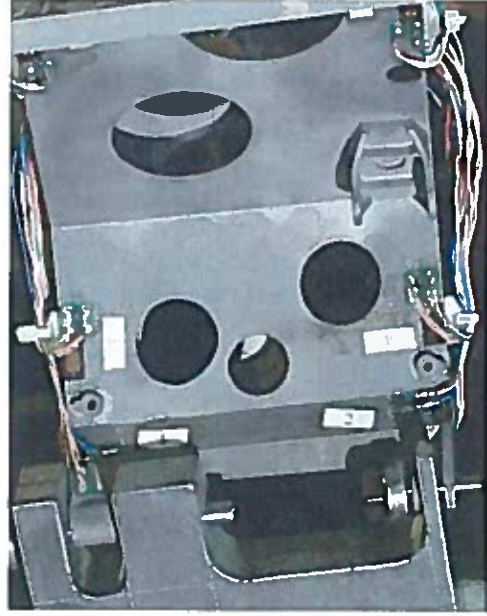
<p>УТВЕРЖДАЮ</p> <p>Начальник отдела качества - Зам. Г. Лавочкин</p> <p>КБ НЦ ПАО «Корпорация «Иркут»</p> <p></p> <p>А.Г. Якушкин</p>	<p>УТВЕРЖДАЮ</p> <p>Начальник отдела прочности - Зам. Г. Лавочкин</p> <p>КБ НЦ ПАО «Корпорация «Иркут»</p> <p></p> <p>А.Г. Якушкин</p>
<p>ПРОГРАММА</p> <p>испытаний опытного образца кронштейна,</p> <p>спроектированного на основе результатов оптимизации и</p> <p>использованной по аддитивной технологии</p>	

<p>Объект испытаний: Рычаг навески двери (образец, изготовленный по аддитивной технологии)</p>	<p>УТВЕРЖДАЮ</p> <p>Начальник отдела прочности - Зам. Г. Лавочкин</p> <p>КБ НЦ ПАО «Корпорация «Иркут»</p> <p></p> <p>А.Г. Якушкин</p> <p>«27» июня 2017 г.</p>
<p>ПРОТОКОЛ №1</p> <p>статических испытаний от 27.06.2017</p>	
<p>Объект испытаний: рычаг навески двери (образец, полученный по аддитивной технологии).</p> <p>Случай нагружения: действующие веса двери.</p> <p>Метод испытаний: статический.</p> <p>Дата проведения испытаний: 27.06.2017.</p> <p>Параметры окружающей среды: температура 21,4°С; влажность 23,3%.</p> <p>Максимальная нагрузка: P<sub>зад</sub> = 1000 кгс.</p>	
<p>Наблюдения</p> <p>Рычаг был закреплён в горизонтальном положении на стальной плите в статической жёсткости с помощью специально изготовленного приспособления такого образца, что:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- по проушине 1 (схема расположения проушин - см. ПРИЛОЖЕНИЕ 1) заперты раздвигательные перекосы (разрешены осевые перемещения и вращение вокруг оси)</li> <li>- по проушине 2 заперты раздвигательные и осевые перемещения (разрешено вращение</li> </ul>	<p>Основные результаты</p> <p>Несущая способность P<sub>нес</sub> &gt; 100 кгс</p>
<p>1 из 2</p>	

# СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

- Проведена валидация расчетных моделей на основе данных тензометрии, полученных при проведении натурных испытаний опытных образцов
- Показано качественное и количественное соответствие результатов расчета и эксперимента: отклонение расчетных и экспериментальных значений деформаций конструкции не превышает 10% в зачетных зонах
- Показано, что поведение конструкции при нагружении соответствует прогнозируемому: зона начала пластической деформации и характер разрушения соответствуют расчетным

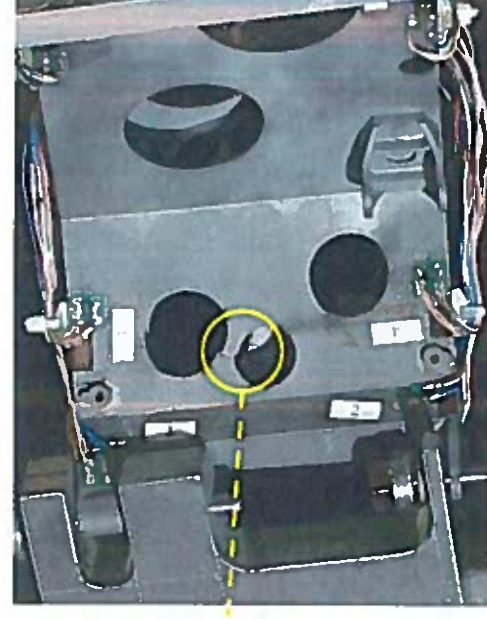
НЕПОСРЕДСТВЕННО ПЕРЕД РАЗРУШЕНИЕМ



НДС ПРИ РАЗРУШАЮЩЕЙ НАГРУЗКЕ



РАЗРУШЕНИЕ



Расчет НДС проведен методом конечно-элементного моделирования в нелинейной постановке  
ПО для расчета: FEMAP v11.3.2/ MSC NASTRAN / Nonlinear analysis

# ОЦЕНКА ЭФФЕКТА ОТ РЕИНЖИНИРИНГА

- Сокращен объем сборки от 28 до 1 детали
- Сокращена длительность цикла изготовления сплава Al, до 22ч в случае использования сплава Ti. Продемонстрирован потенциал для сокращения времени изготовления при использовании оборудования с мультилазерной системой и большими размерами рабочей камеры
- Повышены жесткостные характеристики конструкции, повышена степень равнопрочности конструкции
- Указанные эффекты обеспечиваются при 20%-ной экономии массы детали в случае использования сплава Al, при сохранении массы в случае использования сплава Ti
- На основе результатов натурных испытаний показан потенциал для дальнейшей оптимизации конструкции и снижения массы детали
- Показаны перспективы расширения конструктивно-технологических возможностей при проектировании и изготовлении деталей ЛА за счет внедрения аддитивных технологий

## Исходная конструкция



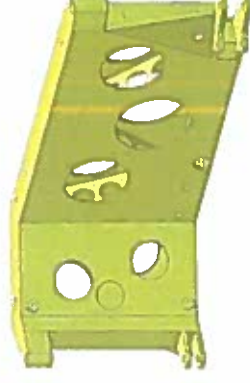
Размер сборки: 28 деталей (бручета крепежа)

Макс. перемещения отн-но недеформ-го сост-ия: ~5 мм

Масса изделия: 4,28 кг (бручета крепежа)

Материал: 1163AM

## Конструкция на основе результатов топологической оптимизации



Размер сборки: 1 деталь

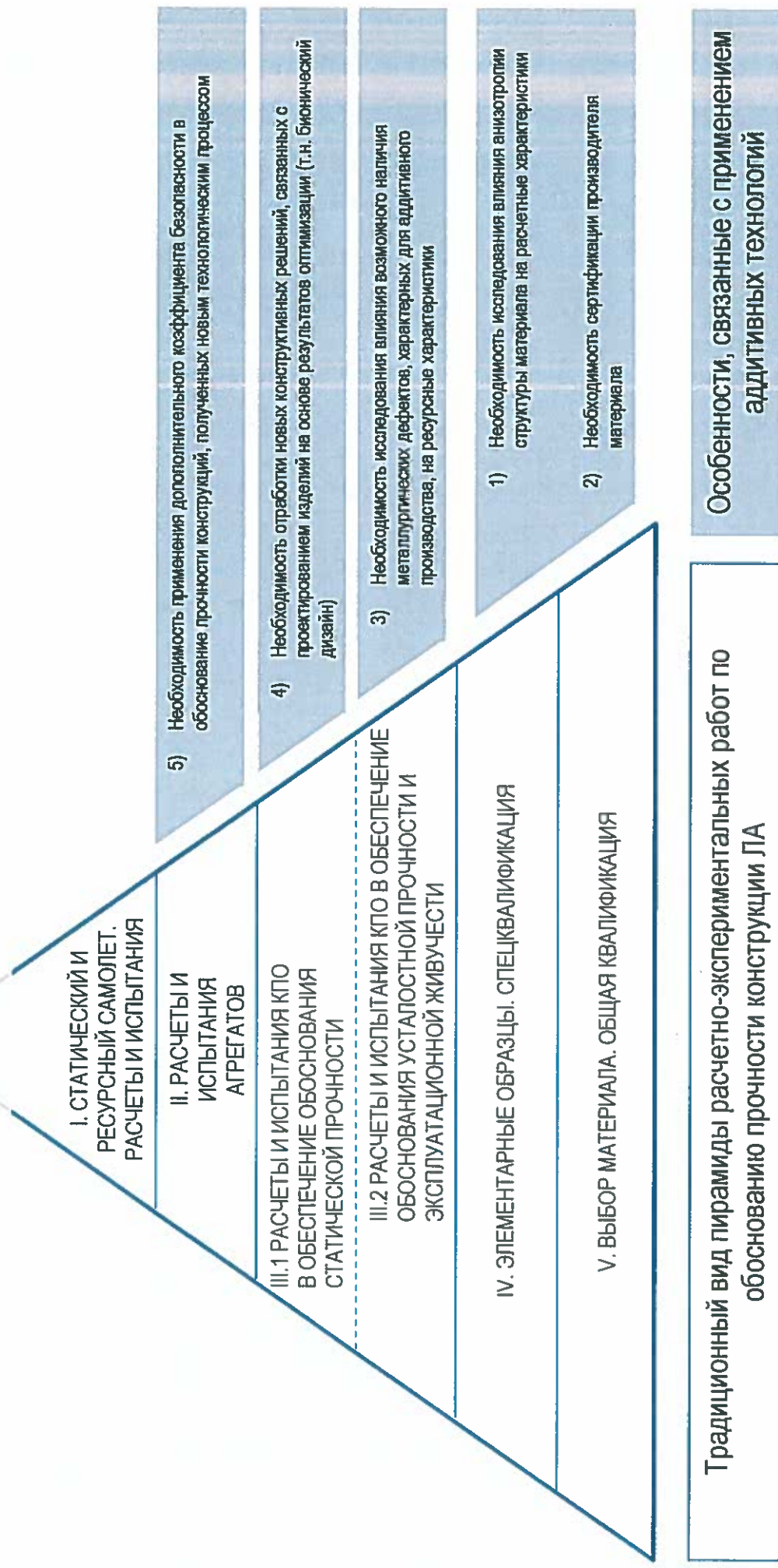
Макс. перемещения отн-но недеформ-го сост-ия : <1 мм

Масса изделия: 3,375 кг

Материал: сплав на основе Al

# ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕДУРЫ СЕРТИФИКАЦИИ ЛА ПРИ ПРИМЕНЕНИИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

→ Проведен анализ особенностей процедуры сертификации ЛА, связанных с применением аддитивных технологий



# ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕДУРЫ СЕРТИФИКАЦИИ ЛА ПРИ ПРИМЕНЕНИИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

- Разработан проект перечня работ в обеспечение сертификации металлических деталей, спроектированных и изготовленных с применением аддитивных технологий

ПРОЕКТ ПЕРЕЧНЯ РАБОТ В ОБЕСПЕЧЕНИЕ СЕРТИФИКАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Пункт СБ	Наименование работ	Разрабатываемые документы
25 603, 25 606	Корректировка перечня НТП и количества директивных и рабочих НТП	Перечень НТП, Перечень СЧ, изготовленных с применением НТП, ЦТ на процессы изготовления материалов (и деталей), отчет по испытаниям элементарных образцов, перечень материалов с НДС (НТ, ТП), заключение СЦД об выполнении требований пп 25 603, 25 606
	Корректировка перечня СЧ ВС, изготовленных с применением НТП	
	Разработка программы освоения и внедрения НТП	
	Разработка перечня материалов (стали, алюминиевые сплавы, титановые сплавы) с указанием требуемых свойств и характеристик	
	Разработка проекта ЦД на материалы (стали, алюминиевые сплавы, титановые сплавы)	
	Разработка проекта ТП на процессы изготовления материалов (стали, алюминиевые сплавы, титановые сплавы) и деталей	
	Изготовление и испытания образцов для доказательства стабильности свойств материалов при серийном производстве	
	Составление отчета по испытаниям образцов для доказательства стабильности свойств материалов при серийном производстве	
	Корректировка ЦД на материалы (стали, алюминиевые сплавы, титановые сплавы) по результатам испытаний	
	Корректировка перечня материалов (стали, алюминиевые сплавы, титановые сплавы) с указанием НДС	
25 613	Аттестация собственного производства участка	Расчетные характеристики металлических материалов, изготовленных с помощью аддитивных технологий, отчет по испытаниям элементарных образцов по серийной технологии
	Получение заключения СЦД на материалы (стали, алюминиевые сплавы, титановые сплавы) и технологий при вводе	
	Разработка проекта документа «Предварительные расчетные характеристики металлических материалов, изготовленных с помощью аддитивных технологий»	
	Изготовление и испытания образцов по серийной технологии из серийных	



# РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ВНЕДРЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Разработан проект программы внедрения аддитивных технологий в процесс проектирования и производства ПА «Корпорация «ИРКУТ», включающий:

- Организацию опытного производственного участка аддитивного изготовления деталей конструкции ПА
- Создание инженерного коллектива, компетентного в области проектирования конструкций с высокой весовой эффективностью
- Создание НТД предприятия по порядку проведения и содержания работ, связанных с использованием аддитивных технологий
- Развитие взаимодействия с Минобрнауки РФ и подведомственными организациями, НИИ и др. для интенсификации освоения аддитивного производства в отечественном авиастроении: в 2017г. ПАО «Корпорация «Иркут» стала полноправным членом ТК-182 «Аддитивные технологии», организованным на базе ФГУП «ВИАМ»

Программа содержит проекты следующих документов:

- План производственного участка
- План-программа обучения специалистов
- Проект ТЗ, ТЭО на проведение НИОКР
- Дорожная карта внедрения аддитивных технологий в деятельность ПАО «Корпорация «Иркут»

УТВЕРЖДАЮ  
Выше-подписант по разработке АТ -  
Директор Инженерного центра,  
главный конструктор МС-21  
ПАО «Корпорация «Иркут»

К.Ф. Попович

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ  
НА ВЫПОЛНЕНИЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ОПЫТНО-  
КОНСТРУКТОРСКОЙ РАБОТЫ

«Освоение и внедрение аддитивных технологий в проектировании и изготовлении  
металлических деталей авиационной техники»

Шифр: АДдТех – Металл

# ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТА

- Показаны перспективы расширения конструктивно-технологических возможностей при проектировании и изготовлении деталей ЛА за счет внедрения аддитивных технологий
- Создан научно-технический задел ПАО «Корпорация «Иркут» в области освоения аддитивных технологий
- Расширены компетенции коллектива в новых подходах к проектированию
- Показана потребность в новой профессии «системного» инженера, интегрирующего компетенции конструктора, технолога и расчетчика
- Определена номенклатура деталей, для изготовления которых целесообразно применение аддитивных технологий
- Разработан проект программы внедрения аддитивных технологий в процесс проектирования и производства ЛА ПАО «Корпорация «ИРКУТ», включающий создание опытного производственного участка аддитивного изготовления деталей конструкции ЛА; создание инженерного коллектива, компетентного в области проектирования элементов конструкций ЛА с высокой весовой эффективностью; создание НТД предприятия по порядку проведения и содержания работ, связанных с использованием аддитивных технологий
- В обоснование программы разработаны проекты документов: ТЗ, ТЭО программы, дорожная карта внедрения аддитивных технологий в проектирование и изготовление деталей ЛА ПАО «Корпорация «Иркут» с учетом особенностей сертификации гражданской авиатехники