A blue-tinted image of water ripples is located in the top left corner, partially overlapping a solid blue triangle.

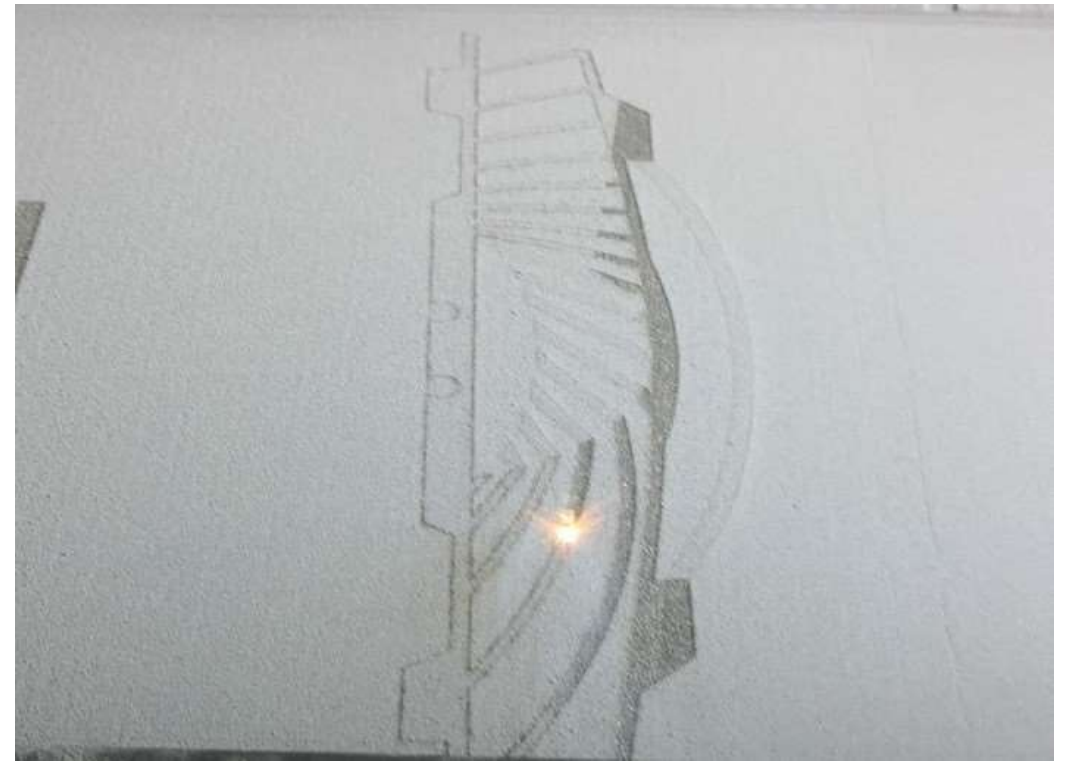
# Численное моделирование и оптимизация для печати алюминиевых изделий

Мария Гроль  
Руководитель проекта  
Департамента аддитивных технологий ИЛМиТ



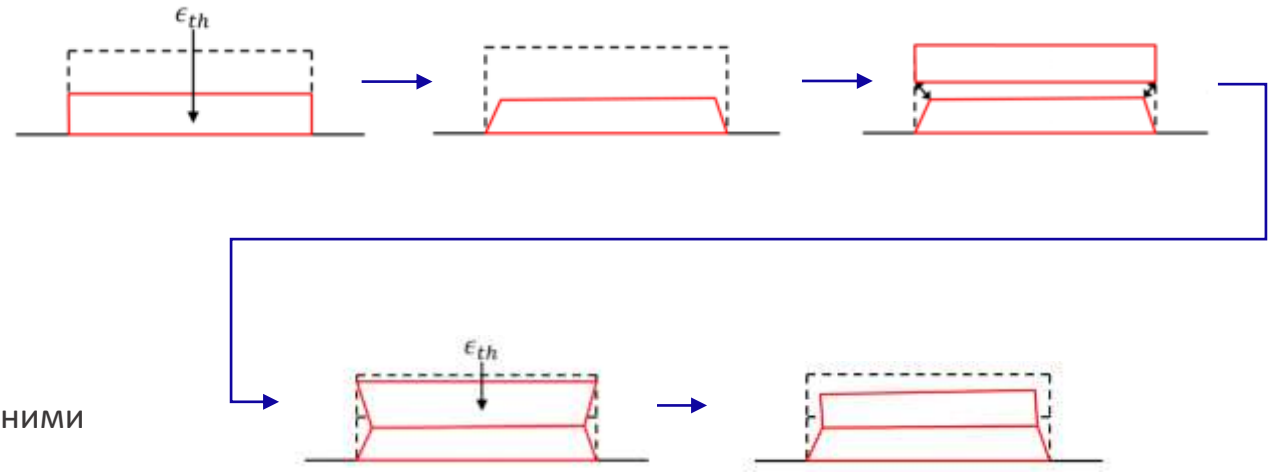
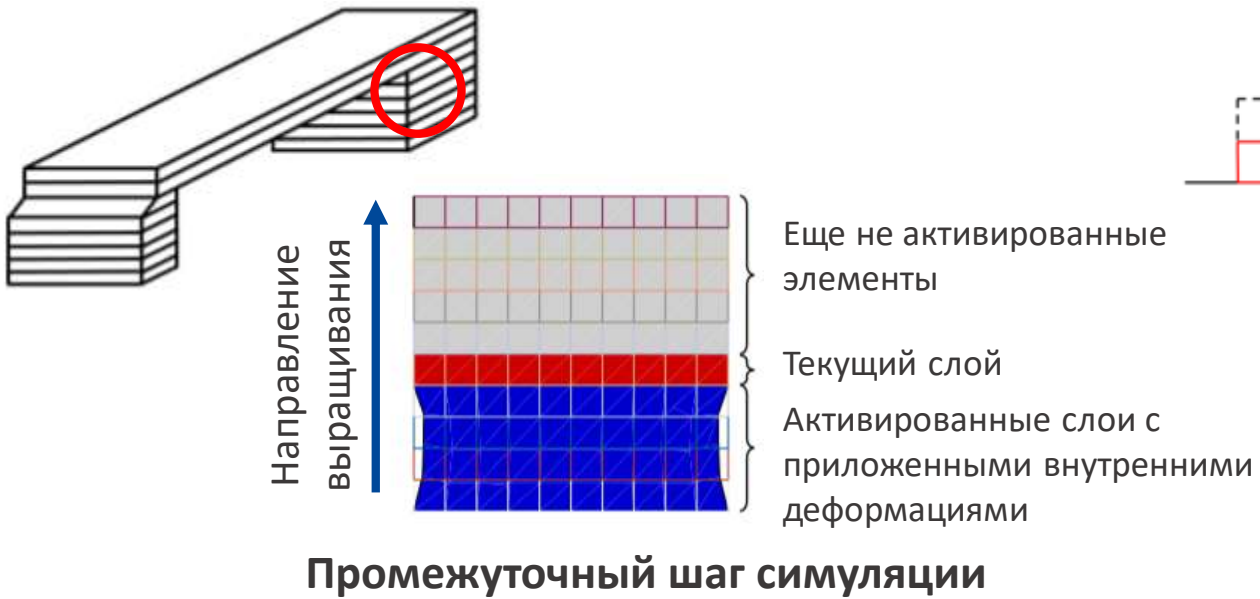
# 3D-печать

3D-печать позволяет создавать детали сложной формы, которые сложно или невозможно произвести традиционными методами

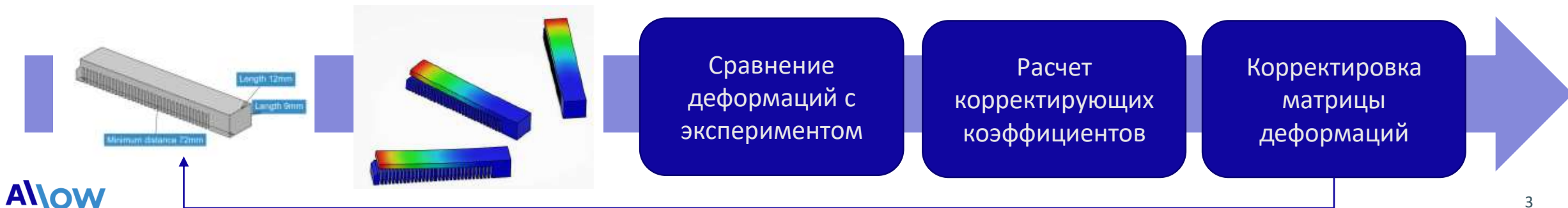


# Моделирование процесса печати

## Метод 1: метод собственных деформаций



## Процесс калибровки



# Моделирование процесса печати

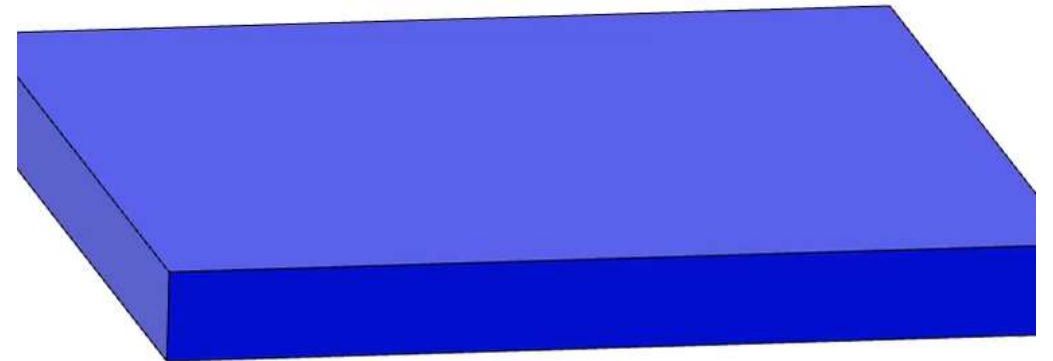
## Метод 1: метод собственных деформаций

### Достоинства

- Быстрота расчета
- Нетребовательность к ПК
- Относительная простота необходимых экспериментальных данных

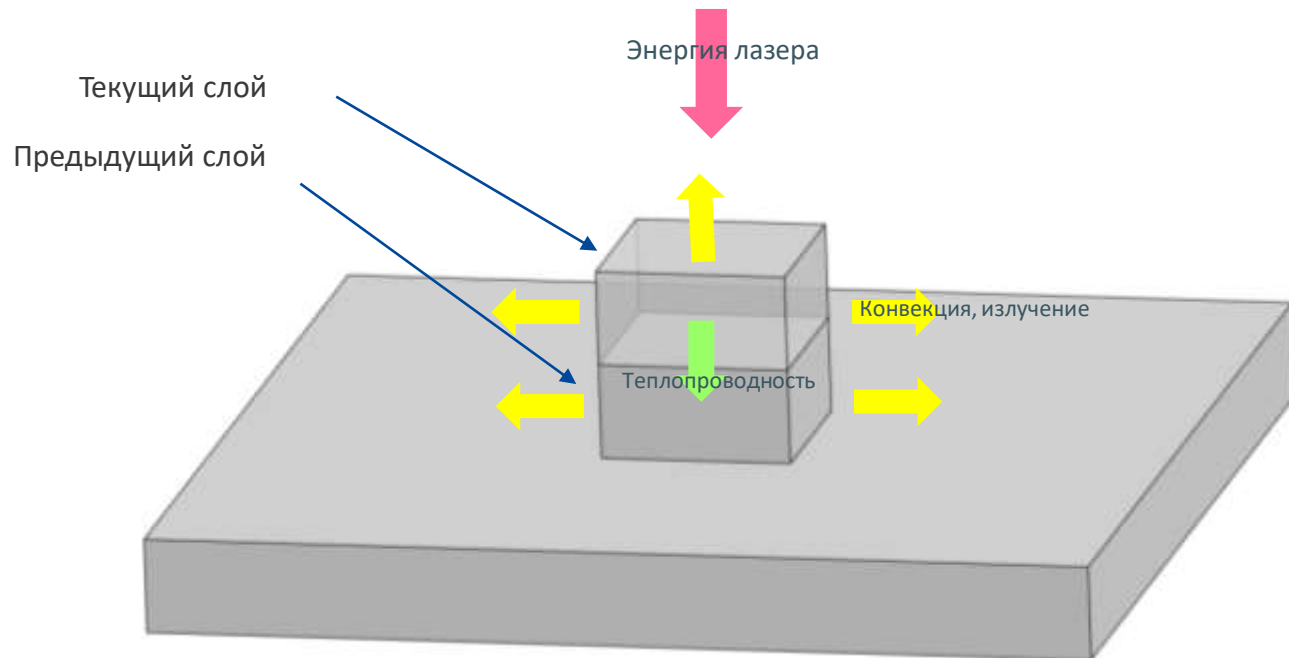
### Недостатки

- Воксели неточно описывают геометрию детали
- Низкая точность расчета
- Для каждой стратегии печати необходимы новые образцы
- Нельзя оценить влияние отдельно тех или иных факторов печати, граничных условий



# Моделирование процесса печати

## Метод 2: термомеханический



Деталь, поддержки,  
режим печати

Подготовка работы: построение  
поддержек, назначение  
стратегии печати

Подготовка КЭМ и назначение  
свойств материала

Задание тепловых нагрузок и  
граничных условий

Решение теплового шага

Перенос тепловой истории на  
прочностной шаг

Решение прочностного шага

Напряженно-  
деформированное  
состояние

# Моделирование процесса печати

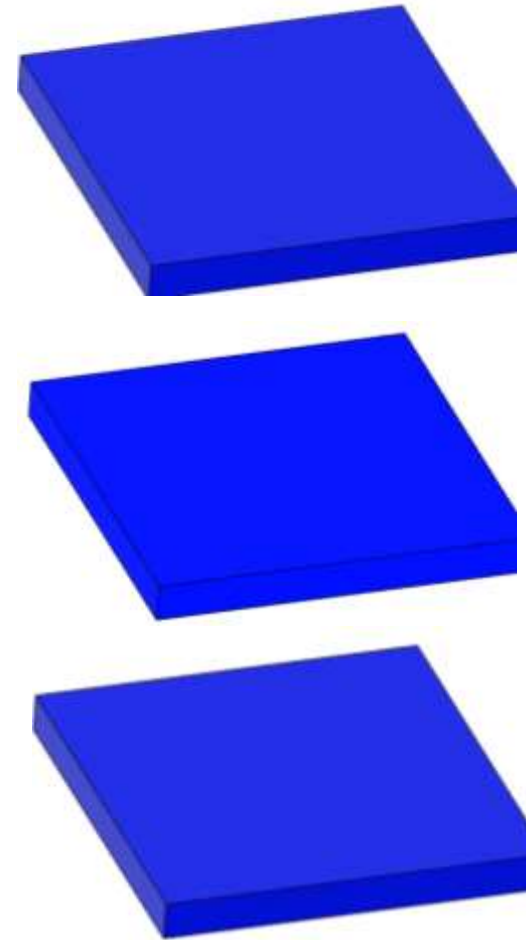
## Метод 2: термомеханический

### Достоинства

- Точность результатов
- Возможность подробного моделирования тех или иных эффектов
- Точность описания даже самой сложной геометрии

### Недостатки

- Требовательность к ПК
- Длительность расчета и большой объем хранимых данных во время и после расчета данных
- Есть допущения, не моделируется процесс на микроуровне



# Моделирование процесса печати в ИЛМиТ

## Деталь «Крыльчатка вентилятора»



### Стандартная технология

**AMг6**

Материал

**3 мес.**

Цикл изготовления

**60 шт.**

Количество сварных соединений

**9 кг**

Расход материала на 1 деталь

### 3D печать

Материал

**AK7ч**

Цикл изготовления

**60,5 ч.**

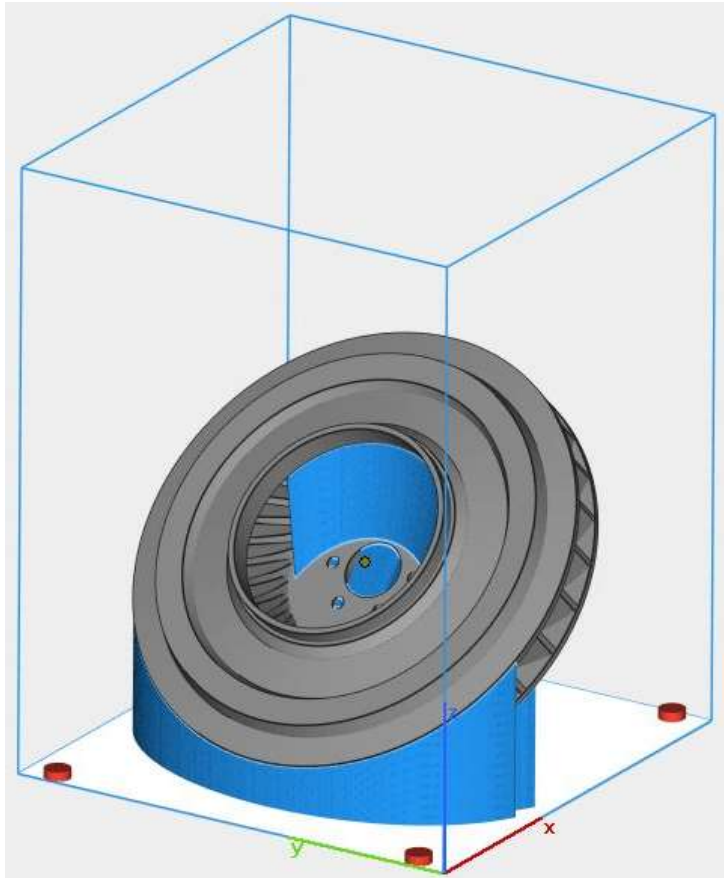
Количество сварных соединений

**0 шт.**

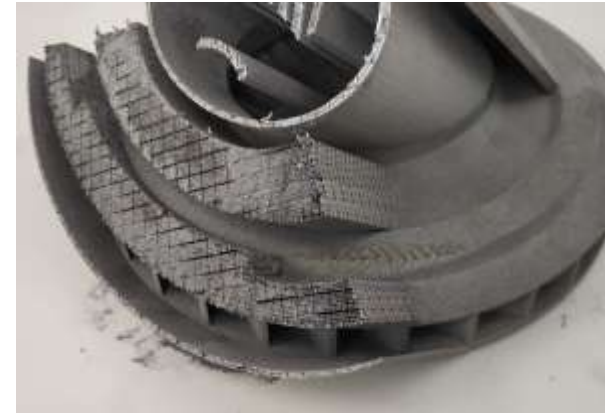
Расход порошка на 1 деталь

**1,8 кг**

# Моделирование процесса печати в ИЛМиТ



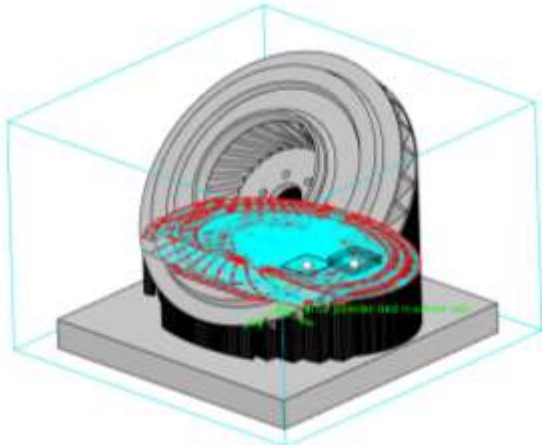
Попытка с первого раза напечатать массивную деталь: стандартная подготовка работы со стандартными поддержками и стратегией печати



Плохое качество поверхности и частично разрушившиеся поддержки

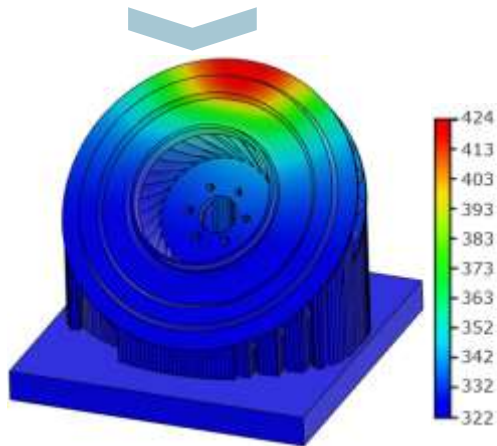


# Моделирование процесса печати в ИЛМиТ

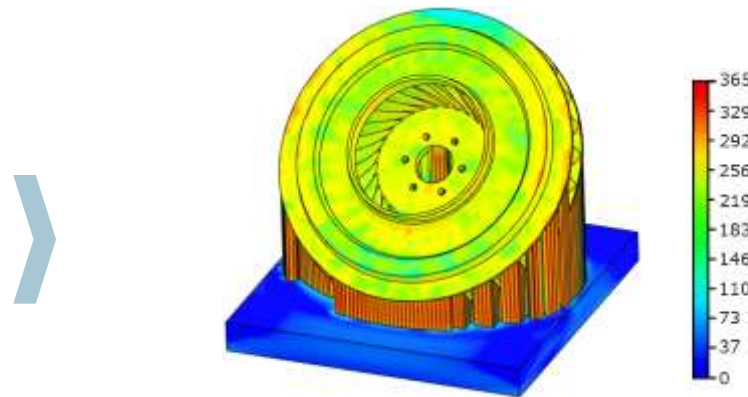


Расположение детали на платформе, подготовка стратегии печати

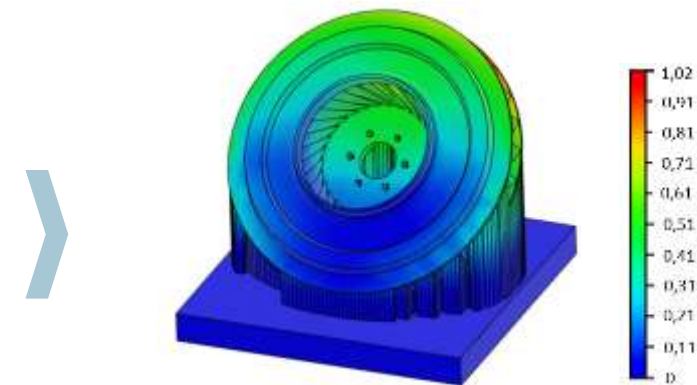
- Изменения по сравнению с первой печатью:
- Изменена ориентация детали
  - Перегенерированы поддержки
  - Проведено моделирование процесса печати



Распределение температур на последнем шаге, К



Распределение эквивалентных по Мизесу напряжений на последнем шаге, МПа



Распределение узловых перемещений на последнем шаге, мм

# Технологическая оптимизация и агрегатирование

3D-печать дает возможность объединить многокомпонентные сборки в одну деталь для повышения технологичности



Форсунка двигателя LEAP 1A

Печать позволила сократить количество деталей в узле с 17 до 1

Снижение количества деталей позволило снизить стоимость логистики, сборки и монтажа  
Измененная форма внутренних каналов повысила эффективность узла\*

Иногда необходима доработка деталей с учетом особенностей 3D-печати. Иногда такая доработка может повысить не только технологичность, но и эффективность самой детали

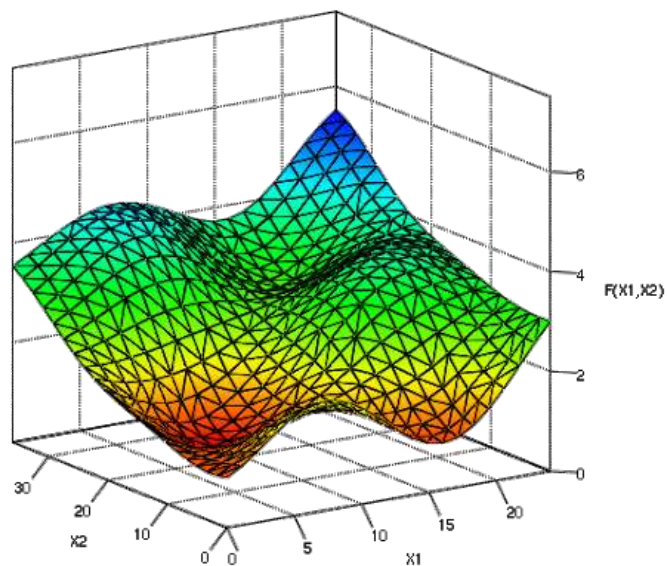


Смеситель (жидкость + газ) с помощью оптимизации перепроектирован из сборки, состоящей из 12 деталей, в 1 деталь; нет необходимости в операции сборки, прокладках и металлоемких фланцах\*\*

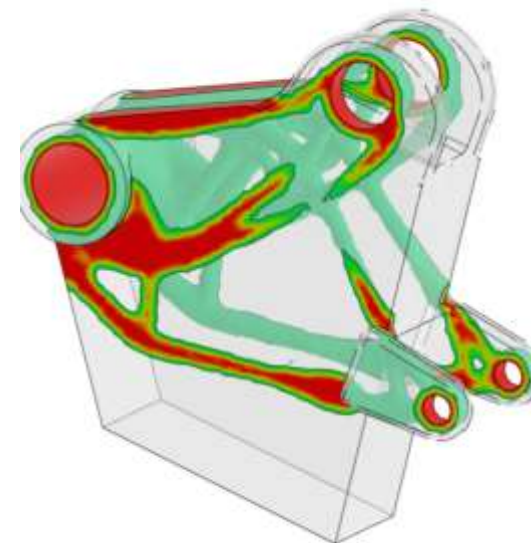
# Оптимизационные подходы

Используя **традиционные** подходы к проектированию деталей, **все сложнее** создавать детали, отвечающие современным требованиям

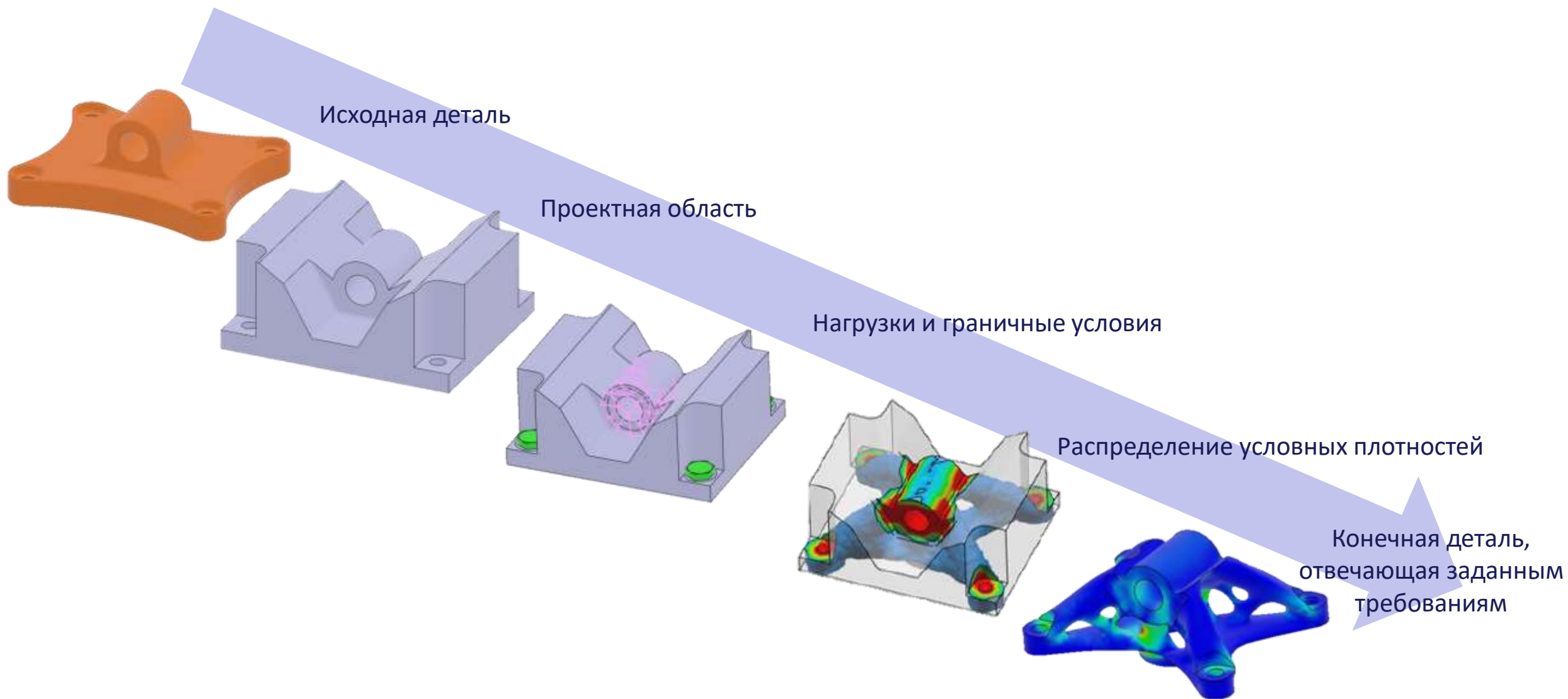
Параметрическая оптимизация



Топологическая оптимизация



# Топологическая оптимизация

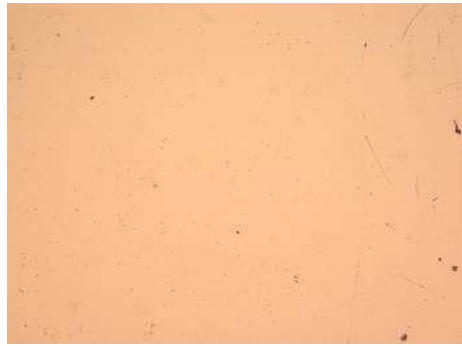
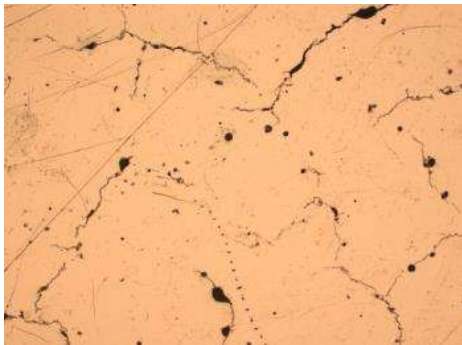


# Новые сплавы для аддитивных технологий

## Высокопрочные сплавы

### Сплав системы Al-Mg-Sc (RS-553)

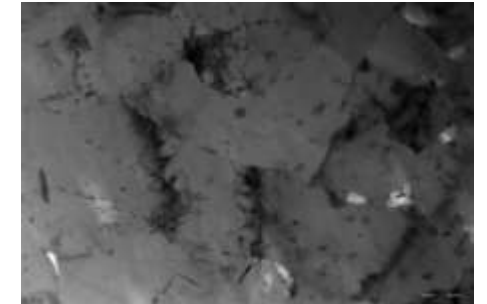
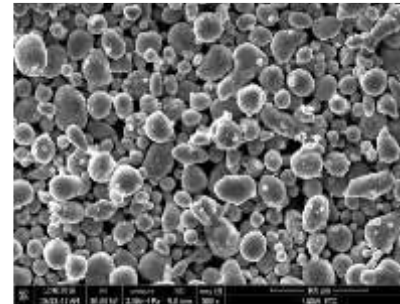
- **Снижение в 2 раза содержания скандия** in обеспечивает преимущество в стоимости по сравнению с аналогами
- **Сплав не нуждается в закалке**-> детали не подвержены поводкам при обработке
- **По характеристикам коррозионной** стойкости сплав не уступает традиционным **сплавам 5XXX серии**
- **Плотность синтезированного материала – 2,658 г/см<sup>3</sup>**



Разработанные режимы СЛС обеспечивают отсутствие горячих трещин, обеспечивая уровень пористости синтезированных образцов не более

### Сплав системы Al-Mg (RS-507)

- Разработанные параметры обеспечивают сплошность материала (гарантированный уровень пористости – менее **25 % об.**);
- **Сплав не нуждается в закалке**-> детали не подвержены поводкам при обработке
- **По характеристикам коррозионной** стойкости сплав не уступает традиционным **сплавам 5XXX серии**
- **Сниженная стоимость** благодаря отсутствию дорогостоящего Sc
- **Плотность – 2,677 г/см<sup>3</sup>**



Сплав	Airbus Scalmalloy	RS-553	RS-507
$\sigma_B$ , МПа	490	475	430
$\sigma_{0,2}$ , МПа	450	435	340
$\delta$ , %	8	10	15
% Sc	0,7	0,3	-

# Новые сплавы для аддитивных технологий

## Жаропрочные сплавы

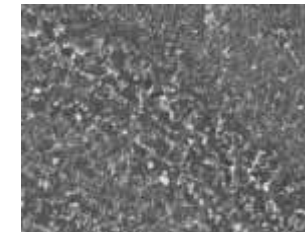
### Сплав системы Al-Si (RS-320)

- **Скорость печати идентична AlSi10Mg** – аналогичные временные затраты на построение детали;
- Разработанные параметры СЛС обеспечивают низкую пористость (не более **0,2 % об.**);
- Проведен **широкий спектр испытаний на механические свойства в аккредитованной лаборатории**



### Сплав системы Al-Si-Ni (RS-390)

- Разработанные параметры СЛС обеспечивают уровень пористости не более **0,30 % об.**
- Сплав может применяться как после **отжига**, так и после **закалки и старения (Т6)**
- **Высокая устойчивость к термическим воздействиям** благодаря добавкам переходных металлов
- **Плотность – 2,820 г/см<sup>3</sup>**



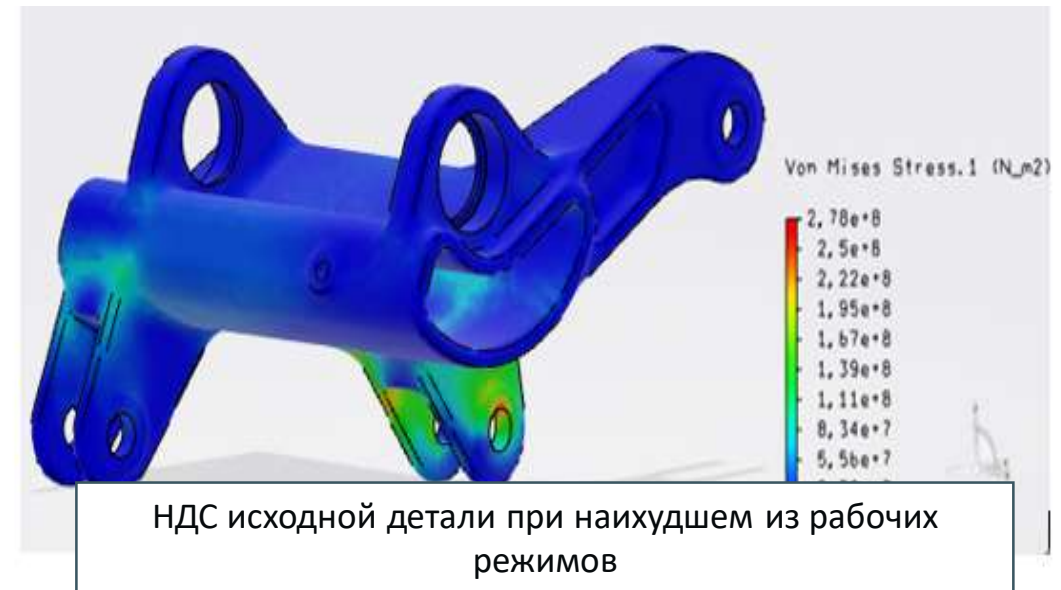
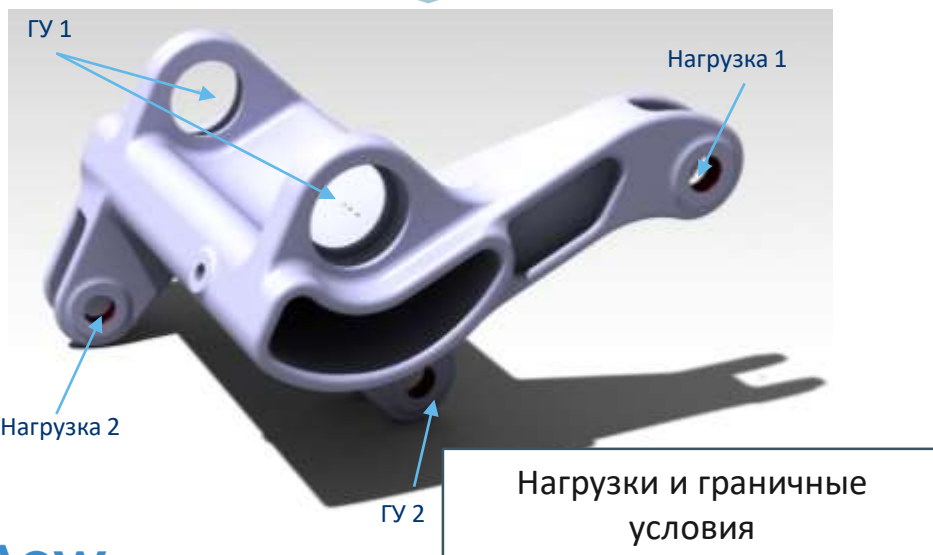
Сплав	AlSi10Mg (RS-300)	RS-390	RS-230
$\sigma_B^{20}$ , МПа	350	<b>360</b>	<b>490</b>
$\sigma_{0,2}^{20}$ , МПа	215	<b>265</b>	<b>430</b>
T раб °C	175	<b>250</b>	<b>250</b>
$\sigma_B^{раб}$ , МПа	140	<b>170</b>	<b>170</b>

# Топологическая оптимизация деталей в ИЛМиТ

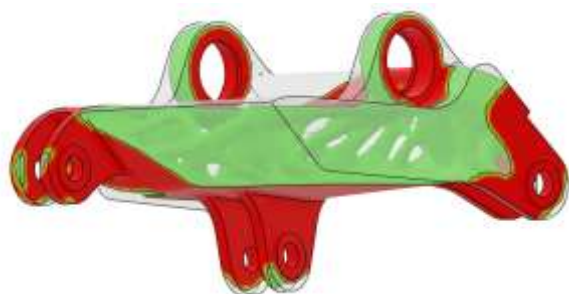


Деталь для оптимизации: качалка системы механизации крыла

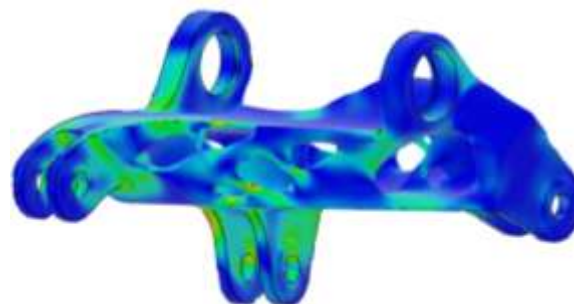
Цель оптимизации: снижение массы при условии минимизации податливости



# Топологическая оптимизация деталей в ИЛМиТ



Распределение условных плотностей



НДС оптимизированной детали



Деталь перед установкой на стенд

Параметры оптимизации		
	До	После
Масса, кг	0,641	<b>0,544*</b>
Сплав	AK7	RS-320
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,7	2,7
Технология производства	Литье	3D-печать

\*Минимальный коэффициент запаса при наихудшем случае нагружения составляет 1,68. Выигрыш в массе 15%



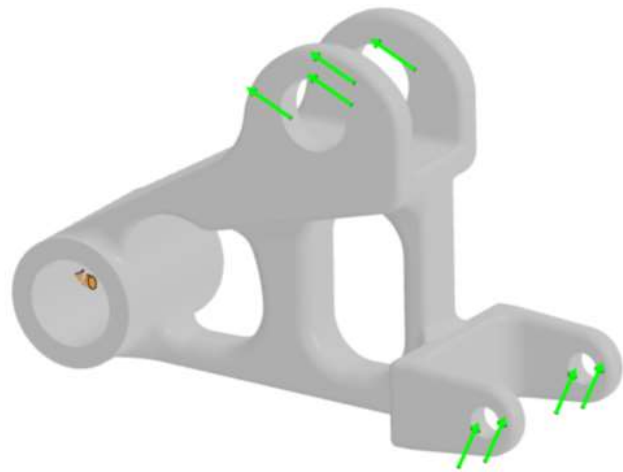
# Топологическая оптимизация деталей в ИЛМиТ

Деталь для оптимизации: кронштейн авиационной техники

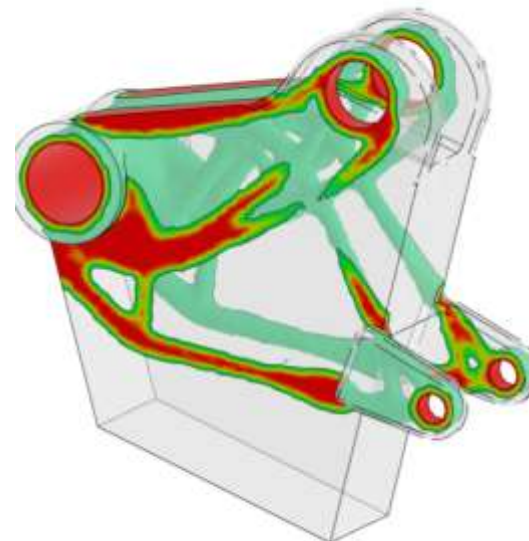
Цель оптимизации: снижение массы при условии минимизации податливости

Параметры оптимизации		
	До	После
Масса, кг	3,15	<b>1,58</b>
Сплав	AK9	RS-300
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,7	2,7
Технология производства	Литье	3D-печать

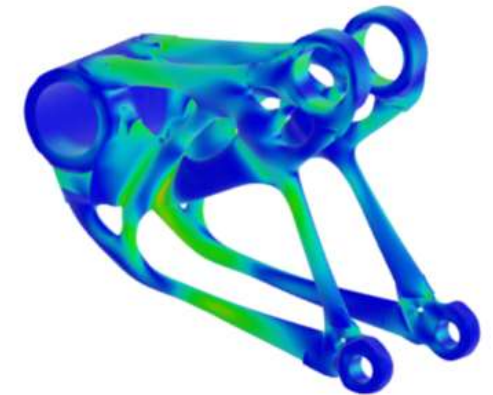
\*Минимальный коэффициент запаса при наихудшем случае нагружения составляет 1,73. Выигрыш в массе 51%



Исходная деталь с нагрузками и ГУ



Распределение условных плотностей



НДС оптимизированной детали

# Центр АТ ИЛМиТ

## Основное оборудование центра АТ



Атомайзер BluePower  
AU12000

30 кг по алюминию



3D сканнер Kreon  
Ace Skyline

Точность 15  $\mu\text{m}$



Принтер EOS M290



ПО 3DEXPERIENCE

- Моделирование процесса печати изделия
- Топологическая оптимизация (под традиционные технологии производства и 3D-печать)
- Перепроектирование детали под АТ
- Прочностные расчеты
- Реверс-инжиниринг

## Испытательный центр ИЛМиТ

### Участок литья и термической обработки

### Участок механической обработки

### Лаборатория исследования физических свойств

определение теплоемкости, теплопроводности, КТР

### Лаборатория исследования механических свойств материала

Определение статической прочности при комнатной температуре и с нагревом, испытания на МЦУ, МнЦУ

### Лаборатория коррозионных исследований

Общая коррозия, климатическая коррозия, фреттинг-коррозия

### Лаборатория металлографического и химического анализа



# ALLOW

aluminium crafted by hydro power



**По всем вопросам:**

Мария Гроль, Руководитель проекта Департамента аддитивных технологий ИЛМиТ  
[Mariya.Grol@rusal.com](mailto:Mariya.Grol@rusal.com)