
Решение ESI Additive Manufacturing для моделирования процессов аддитивного производства и топологической оптимизации. Опыт применения в промышленности



Вячеслав Котов
vkv@esi-group.com

27/05/2021



Аддитивное производство из металла

Процессы

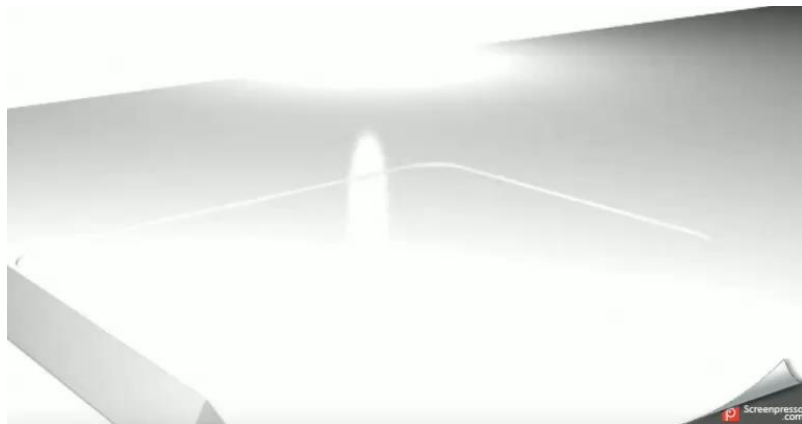
СЕГОДНЯ



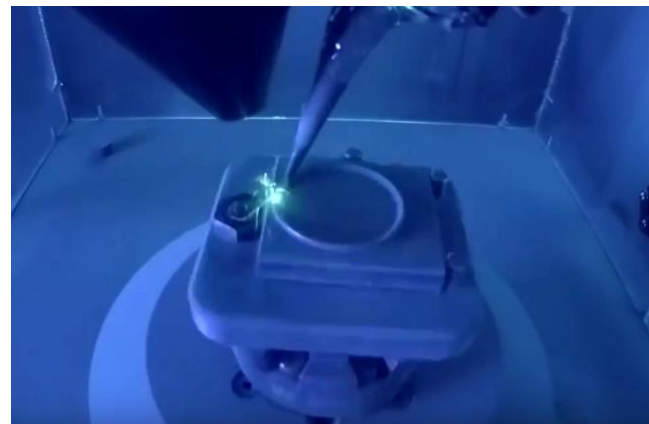
ЗАВТРА



ЗАВТРА



Erasteel - <https://youtu.be/GjbxVku39Y>



M. Barnett <https://youtu.be/f6Gb9UWbz8>



Tecnalia <https://youtu.be/N2hYFkf4SC0>



Erasteel - <https://youtu.be/GjbxVku39Y>

Size: $10^{-5} - 10^{-4}m$

Physics:

- Material supply
- Distribution
- Melting
- Porosity
- Weld pool flows & shape

Modeling: Micro scale

Size: $10^{-4}m$

Physics:

- Heat transfer
- Diffraction
- Evaporation

Modeling: Micro scale

Size: $10^{+3}m$

Physics:

- Residual stresses distribution
- Distortions distributions

Modeling: Macro scale

Size: $10^{-1}m$

Physics:

- Thermo-mechanical analysis
- Residual stresses Prediction
- Distortions Prediction
- Elasto-visco-plastic behavior laws
- Heat transfer

Modeling: Macro scale

Size: $10^{-6}m$

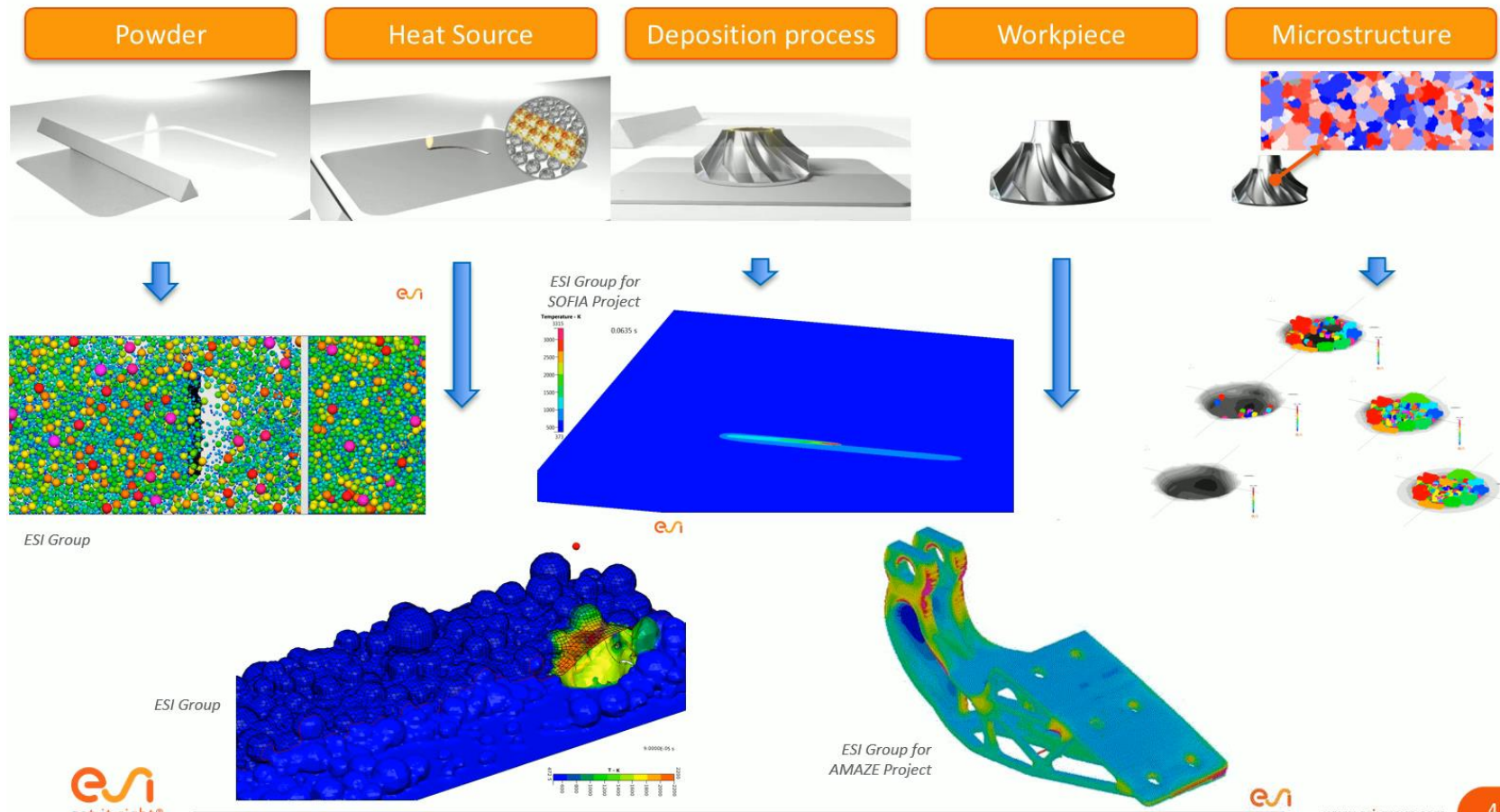
Physics:

- Fusion and solification phenomena
- Metallurgical and phases transformations

Modeling: Meso scale

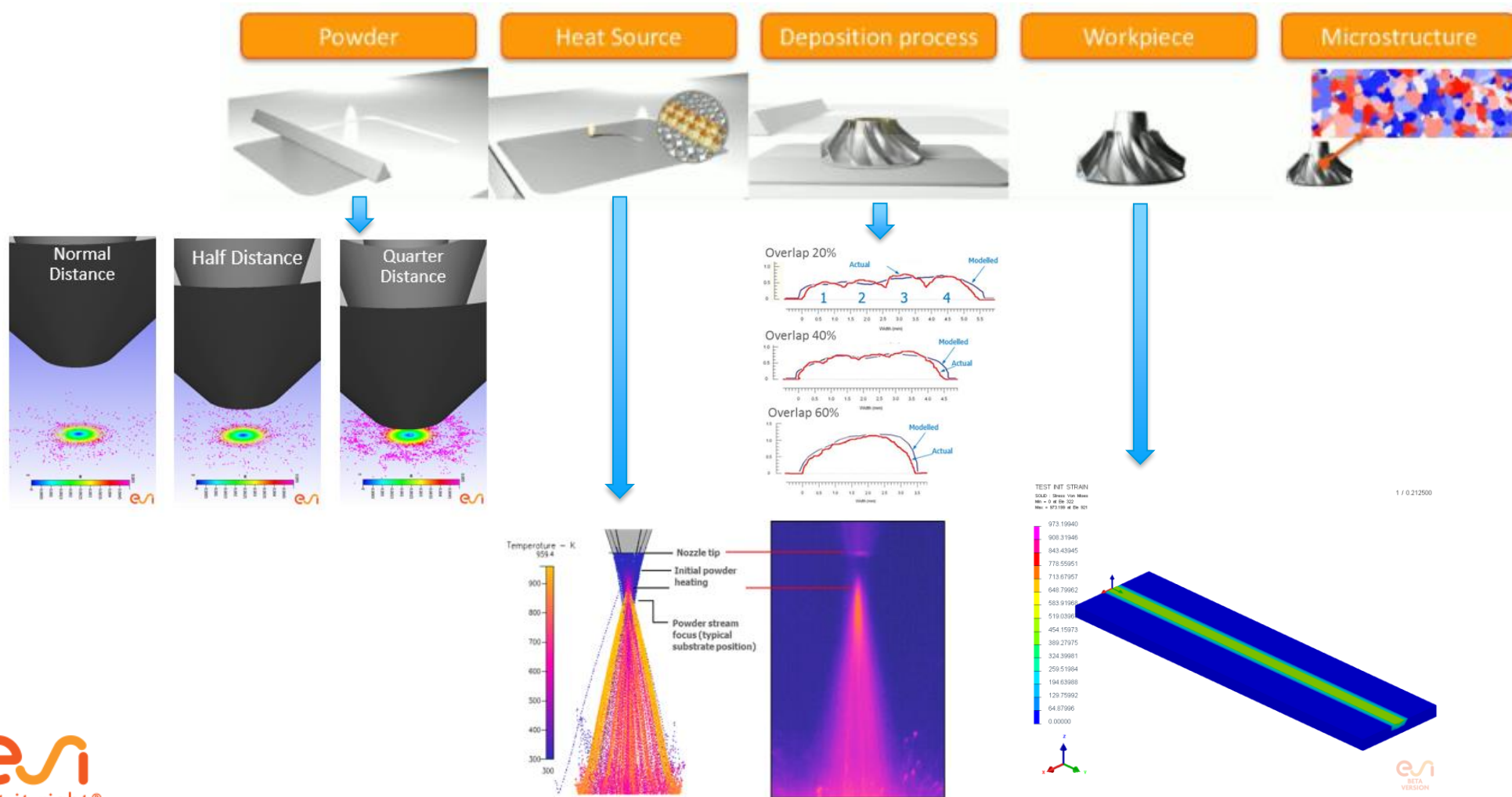
Моделирование аддитивного производства

Селективное лазерное сплавление

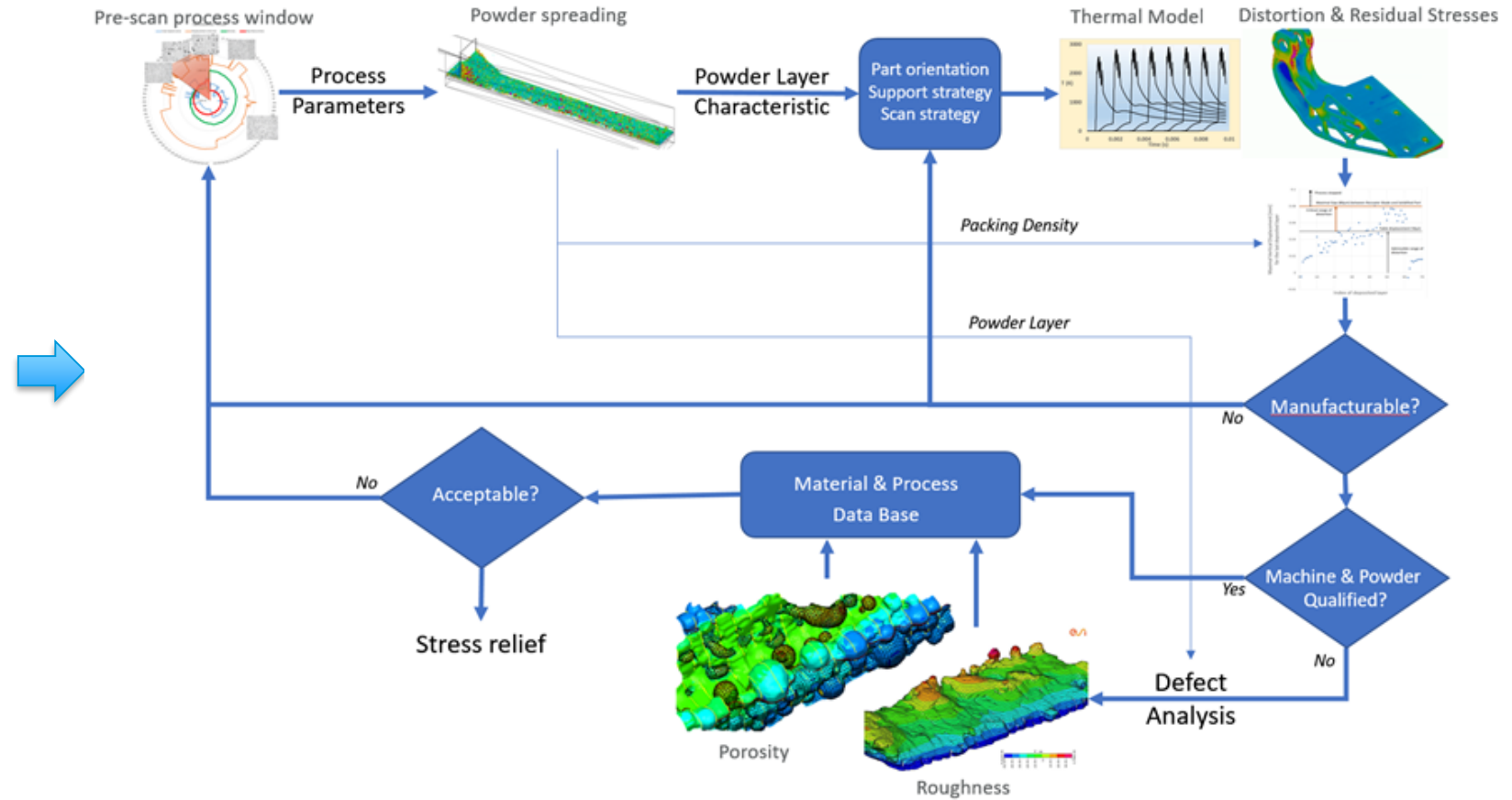


Моделирование аддитивного производства

Прямое нанесение материала



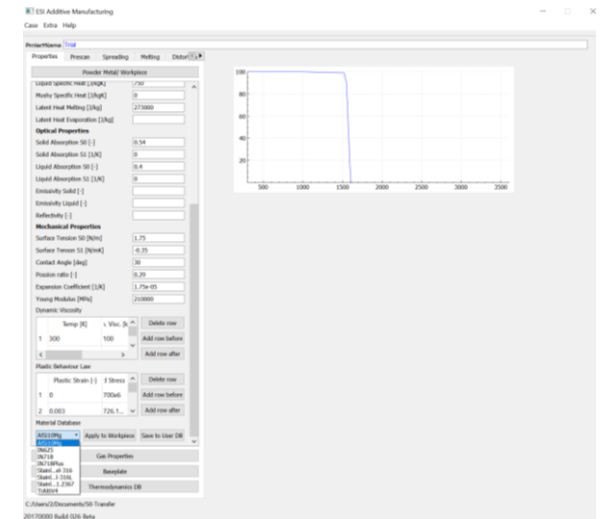
Мультимасштабный и мультифизический инструмент





Data Base:

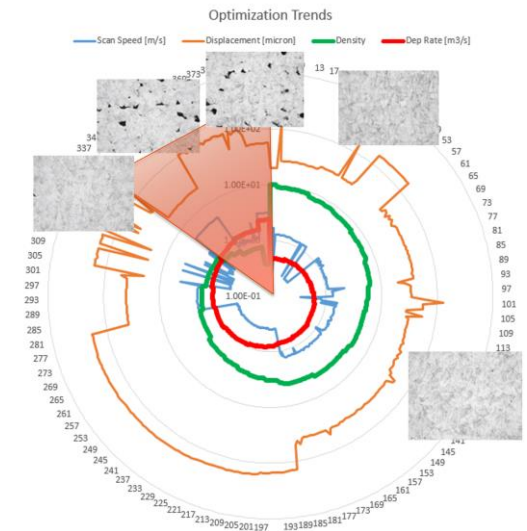
- Архив свойств материалов,
- Термо-физические и термо-механические свойства металлических материалов,
- (316L, Ti6Al4V, Inco 718 и т.д.),
- Легко редактировать и расширить.





PreScan:

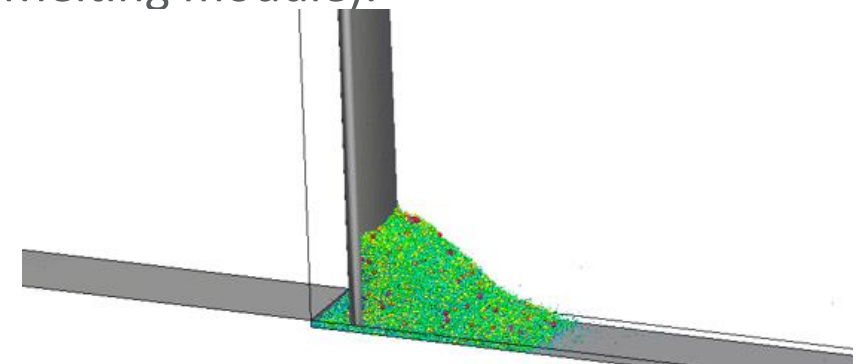
- Входные данные для анализа – параметры процесса,
- Определение наилучшего технологического окна для обеспечения минимальной пористости материала и максимальной скорости роста,
- Создание диаграммы Парето для визуализации.

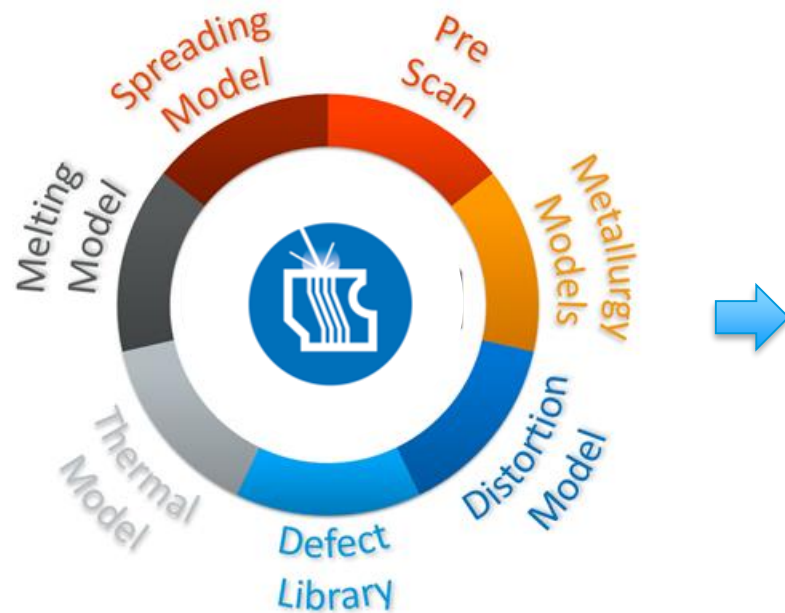




Powder Spreading:

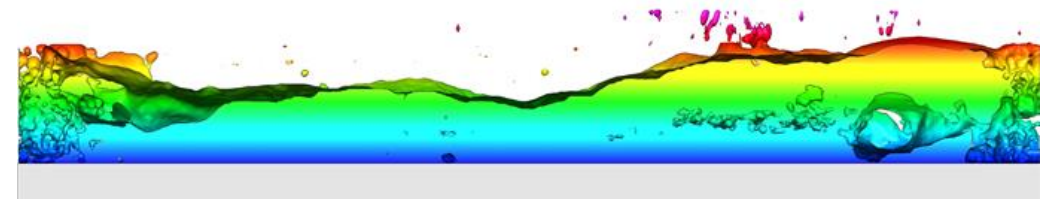
- Входные данные для анализа – параметры процесса, свойства порошка и распределение частиц по размерам,
- Предоставляет данные по характеристике процесса распределения частиц на рабочем столе (плотность распределения, распределение по размерному фактору и т.д.),
- Позволяет оценивать возможность повторного использования порошка, плотность распределения частиц в слое, а также использовать результаты расчета как входные данные для следующего шага (расчета расплавления слоя Melting module).





Melting:

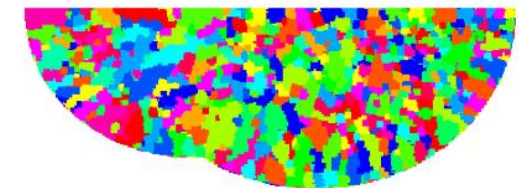
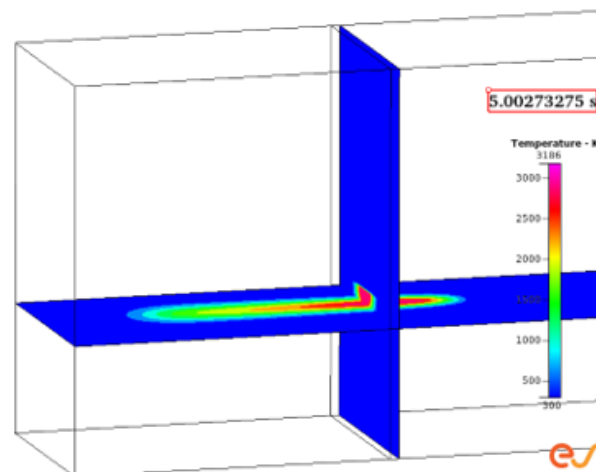
- Анализ воздействия источника тепла на порошок (процессы плавления, испарения и затвердевания),
- Анализ результатов расчета для определения пористости и качества поверхности,
- Используется для расширения библиотеки дефектов.





Metallurgical structure:

- Решение термической задачи на уровне размера пятна лазера
- Модель роста зерна для прогнозирования микроструктуры изделия.
- Оценка свойств выращенного изделия.

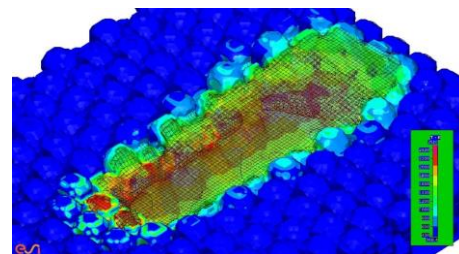


Thermal model:

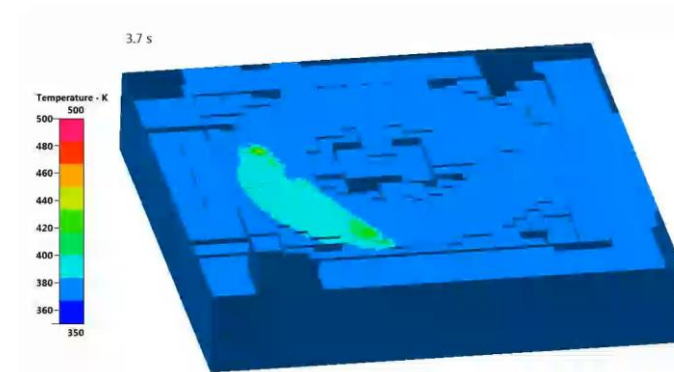
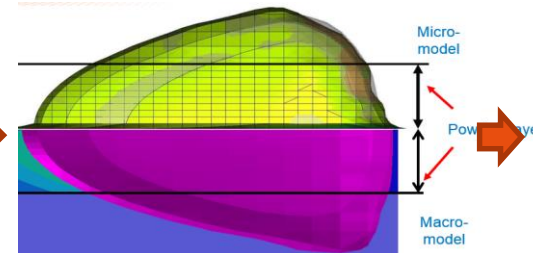
- Переходная модель между Melting Model (Micro Scale) и Distortion Model (Macro Scale)
- Моделирование стратегии сканирования для извлечения данных по теплообмену (скорости нагрева и охлаждения, термические циклы и т.д.)



Melting Micro Model



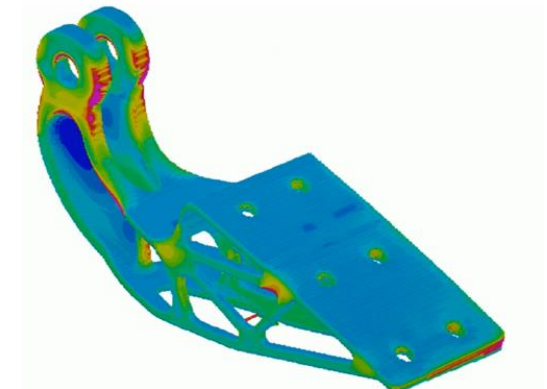
Automatic Extraction of a Thermal Cycle or a Mobile Heat Source





Distortion & Residual Stress:

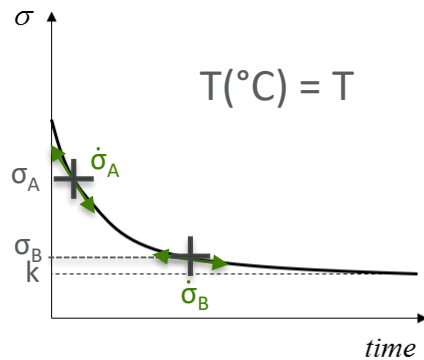
- Моделирование полноразмерного изделия,
- Автоматическое создание сетки для расчета, граничных условий и поддержек,
- Производится расчет роста заготовки, выкатки из камеры и отделения от подложки,
- Оценка технологичности компонента, а также его финальных короблений.



Моделирование стадий постобработки

Термическая обработка после выращивания

- Релаксационный отжиг
 - ▶ Упругопластическая модель при нагреве и охлаждении
 - ▶ Упруговязкопластическая модель во время выдержки при постоянной температуре
 - ▶ Требуются дополнительные измерения свойств материалов

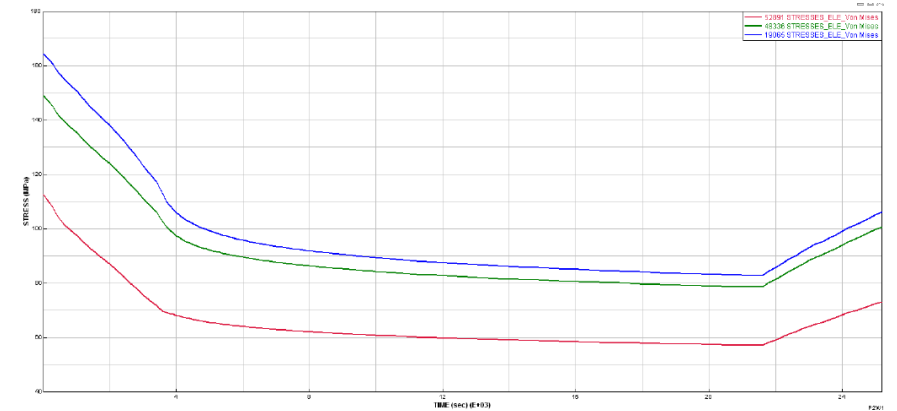


Релаксация напряжений (эксперимент)

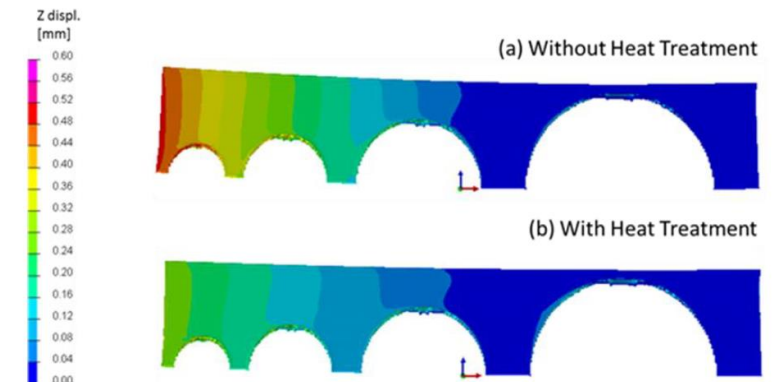
$$n = \frac{\ln\left(\frac{\dot{\sigma}_B}{\dot{\sigma}_A}\right)}{\ln\left(\frac{\sigma_B - k}{\sigma_A - k}\right)}$$

$$K = \frac{\sigma_A - k}{\left(\frac{-\dot{\sigma}_A}{E}\right)^{\frac{1}{n}}}$$

Модель ползучести



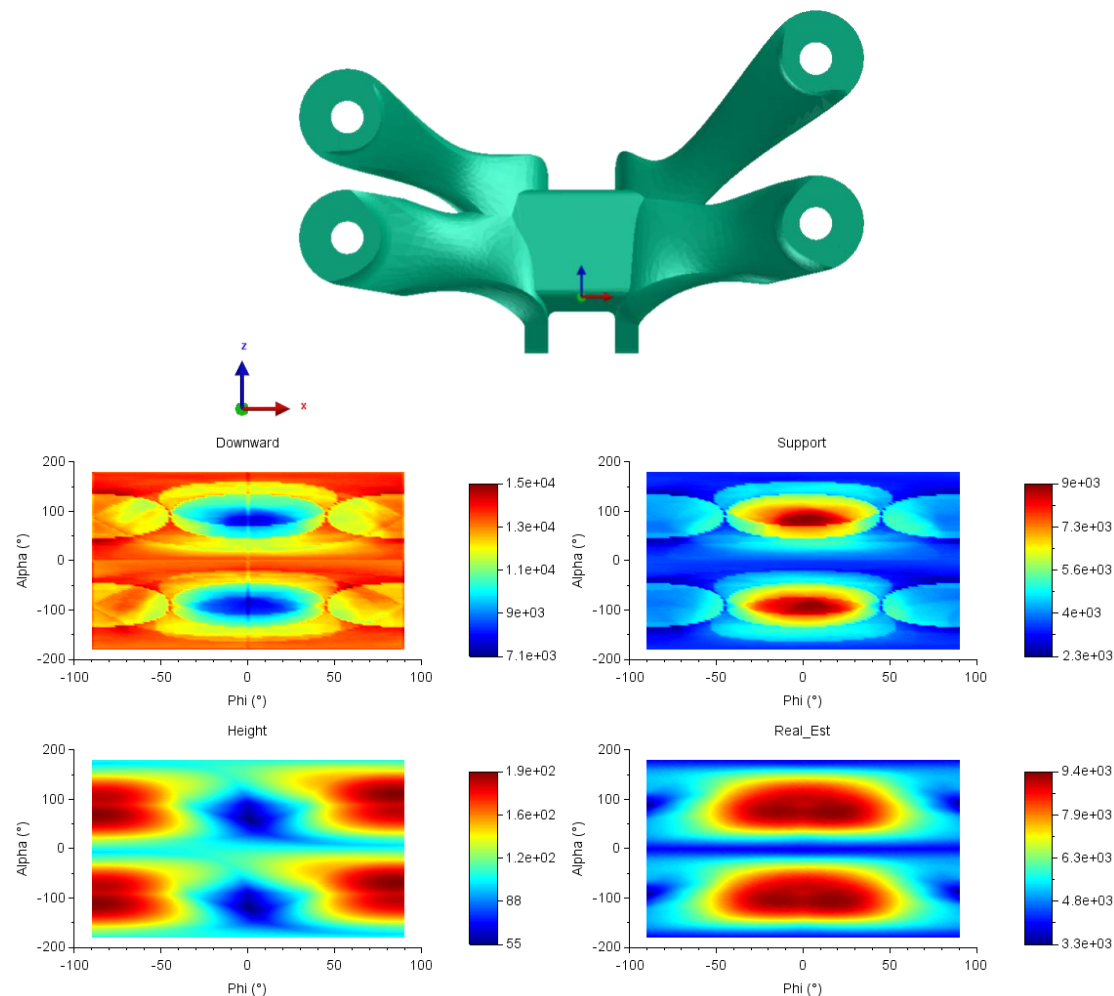
Изменение напряжений во время ТО



Distortion field with & without HT

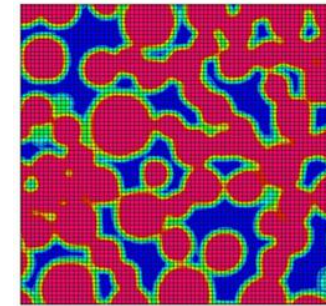
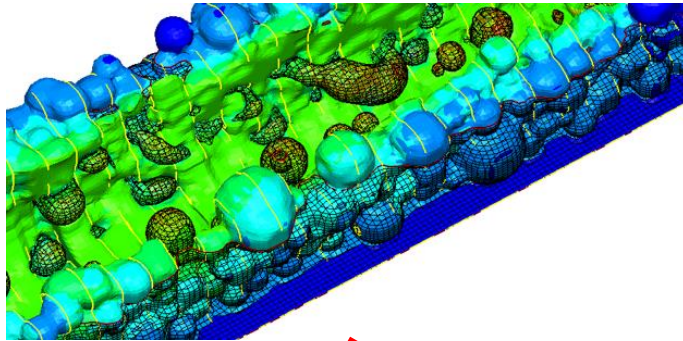
Снижение веса конструкции и затрат на производство:

- Выбор оптимальной ориентации
- Снижение поверхностных дефектов
- Уменьшение объема поддержек
- Топологическая оптимизация детали

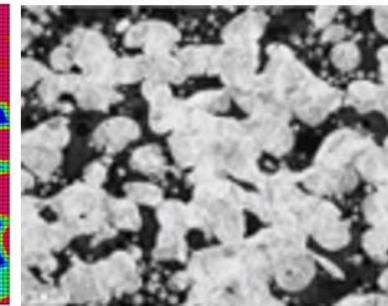


Селективное лазерное сплавление

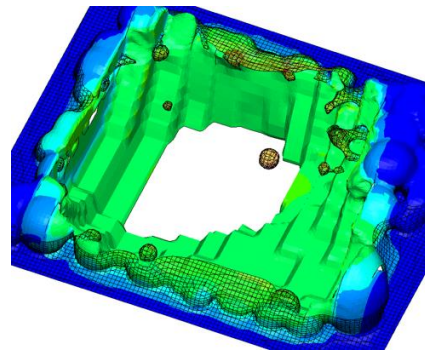
Пористость



Simulation ~ 32%



Experiment ~ 30%



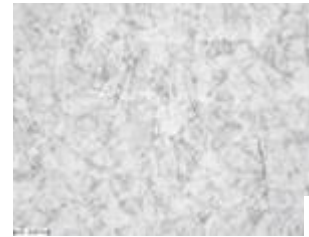
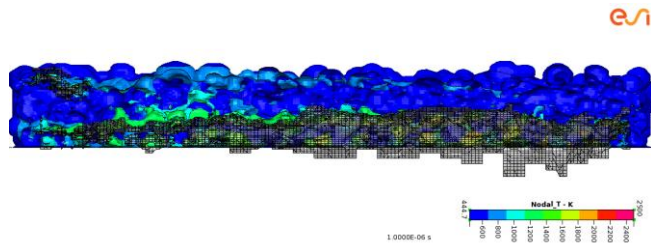
Mindt et al., Powder Bed Models – Assessment of as built Quality, AIAA 2016-1657

Power=370W, Speed in mm/sec

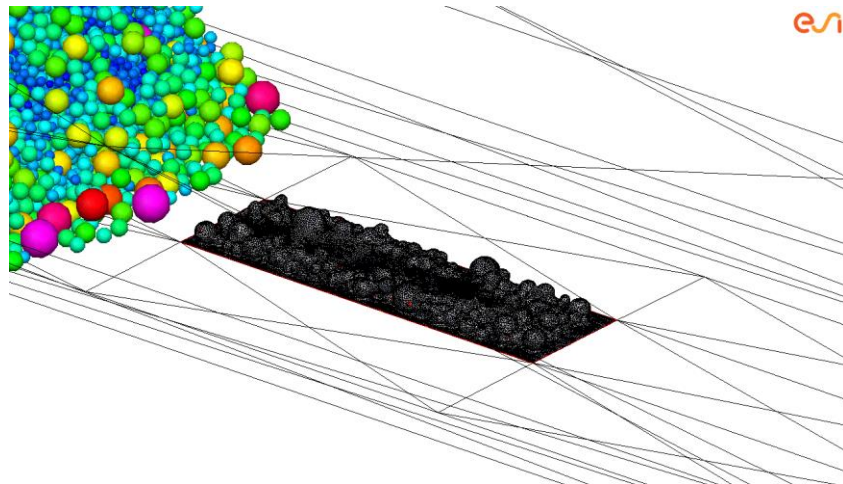
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Powder Layer Thickness	GED=3 Hatch=140μ Speed = 880	GED=1.2 Hatch=140μ Speed=2200	GED=1.6 Hatch=100μ Speed=2250	GED=3 Hatch=100μ Speed=1230	GED=2 Hatch=140μ Speed=1320	GED=0.7 Hatch=140μ Speed=3780	GED=1.2 Hatch=100μ Speed=3080
40 μm							
30 μm							
20 μm							
Porosity Level							
40 um	0.001-0.006%	3.03-4.83%	0.03-0.42%	0.002-0.018%	0.13-0.45%	30.13-30.86%	7.20-12.28%
30um	0.002-0.013%	2.65-3.48%	0.04-0.43%	0.01-0.02%	0.12-0.31%	20.2-23.9%	2.59-4.79%
20 um	0.002-0.008%	0.95-1.19%	0.10-0.21%	0.003-0.012%	0.05-0.56%	11.1-11.6%	0.68-8.99%

Результаты расчетов

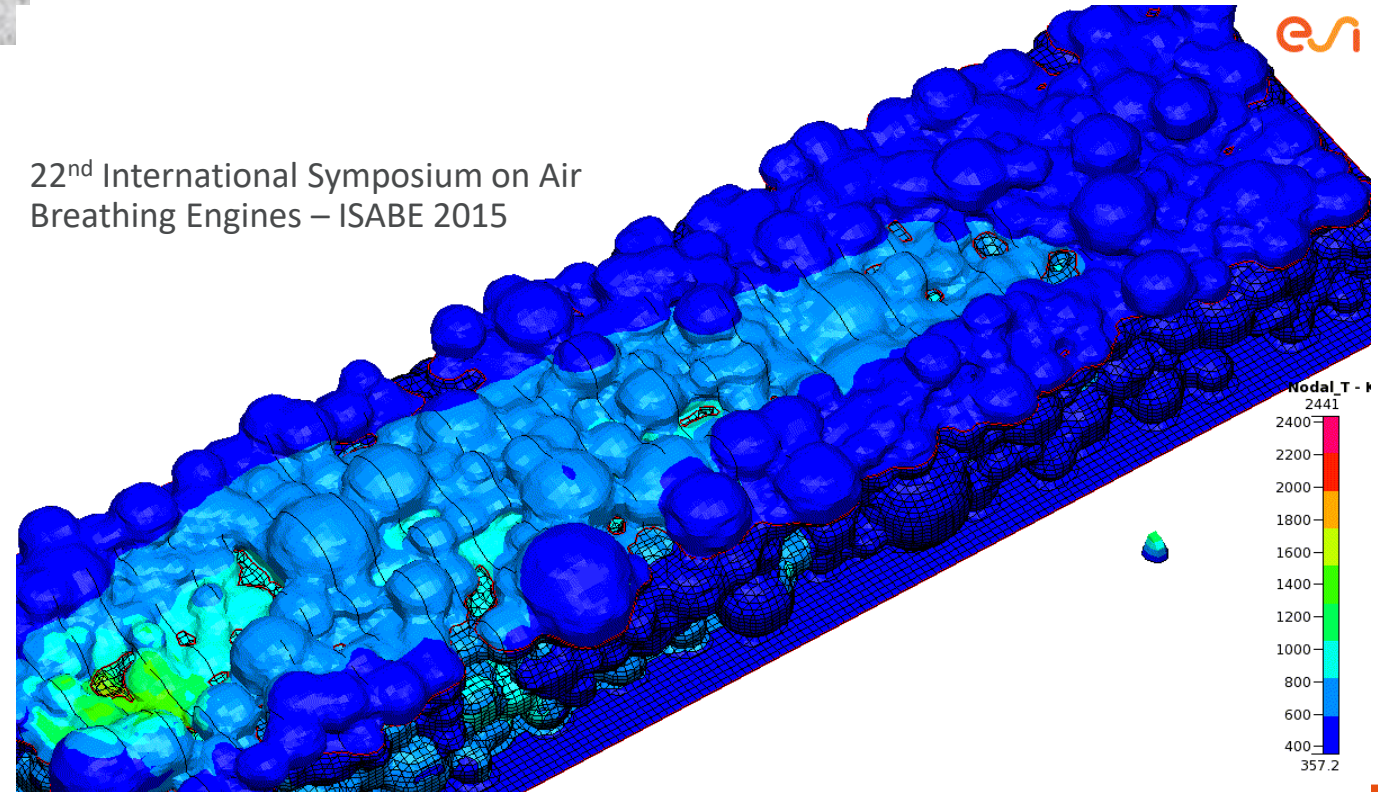
δ : 30 μm , H: 100 μm , v: 2250 mm/s (13.3.3)



Уровень пористости
0.04 – 4.3%



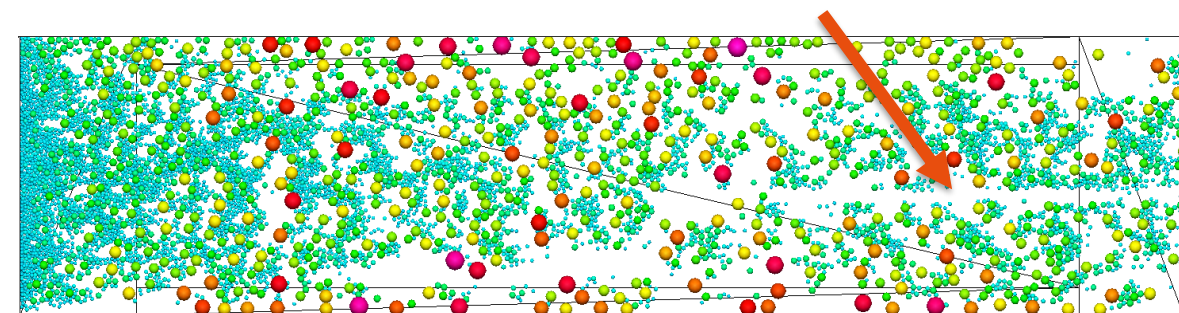
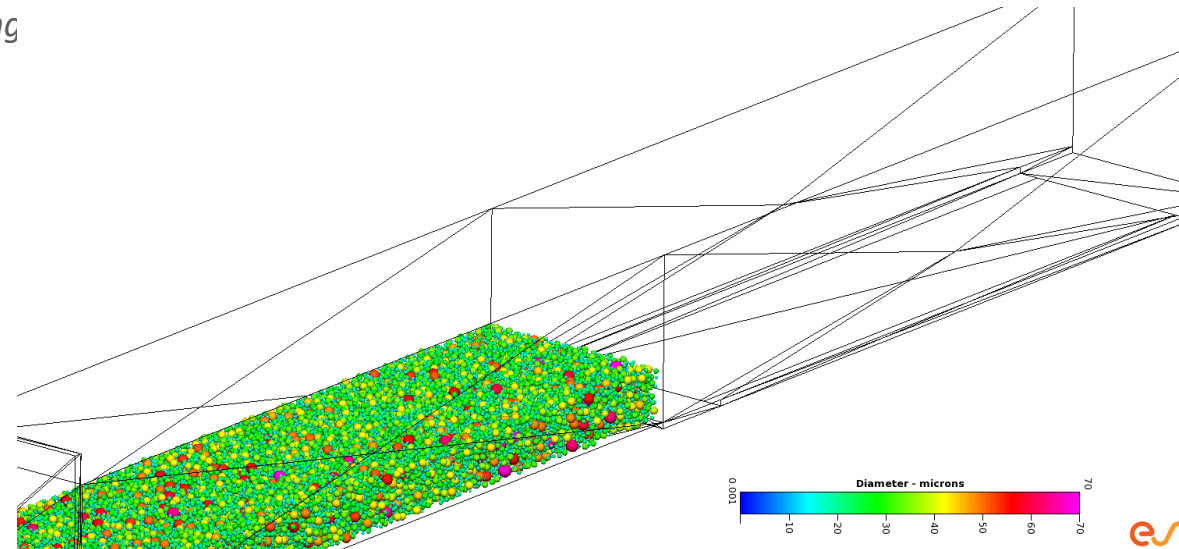
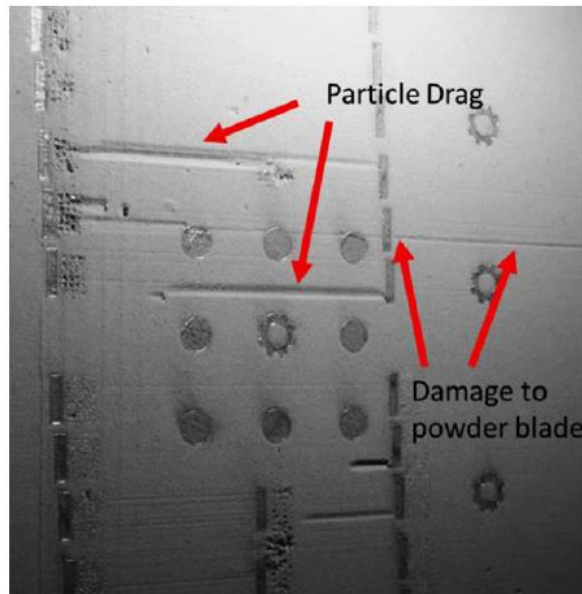
22nd International Symposium on Air Breathing Engines – ISABE 2015



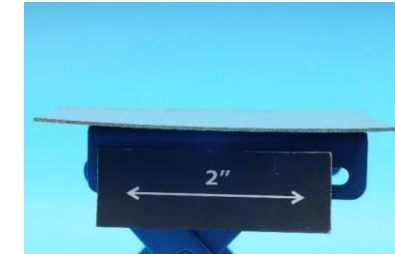
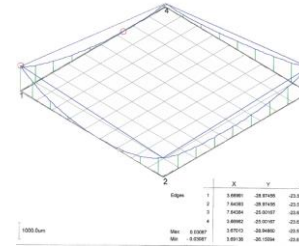
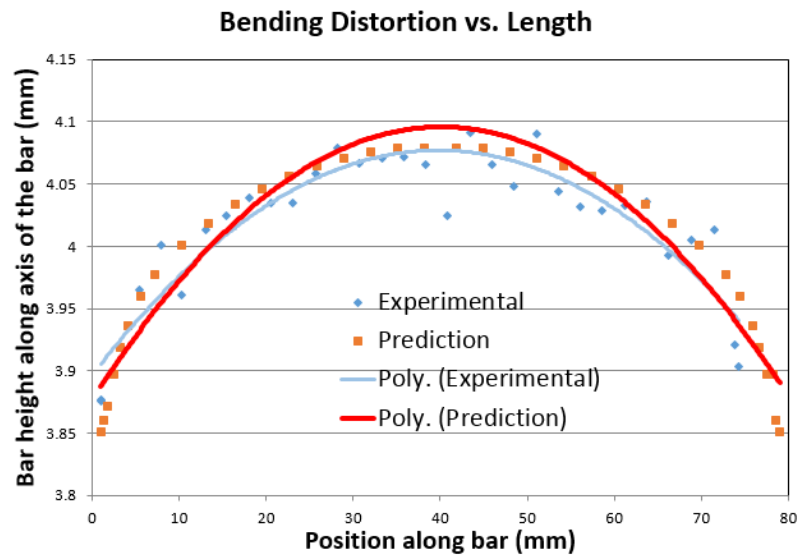
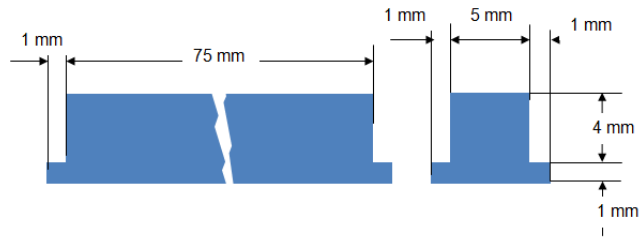
Анализ дефектов, полученных на стадии плавления, на дальнейшие процессы

Влияние разбрызгивания на распределение частиц

Foster et al., Optical, layerwise monitoring powder bed fusion, SFF, 2015



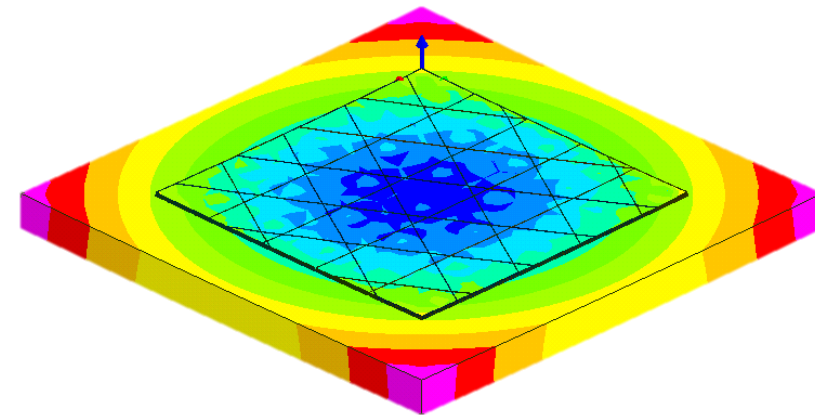
Effects of splatters on spreading.



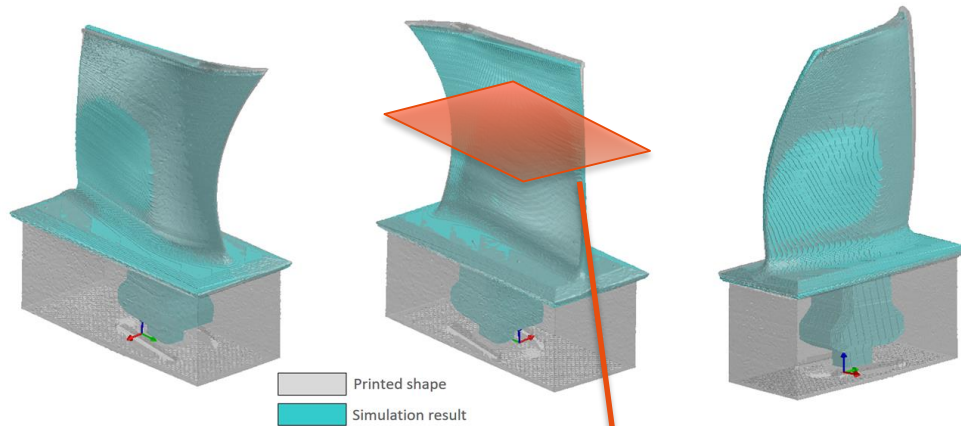
Экспериментальные коробления: 1.56 mm

Спрогнозированные коробления: 1.53 mm

Ошибка ~ 2%

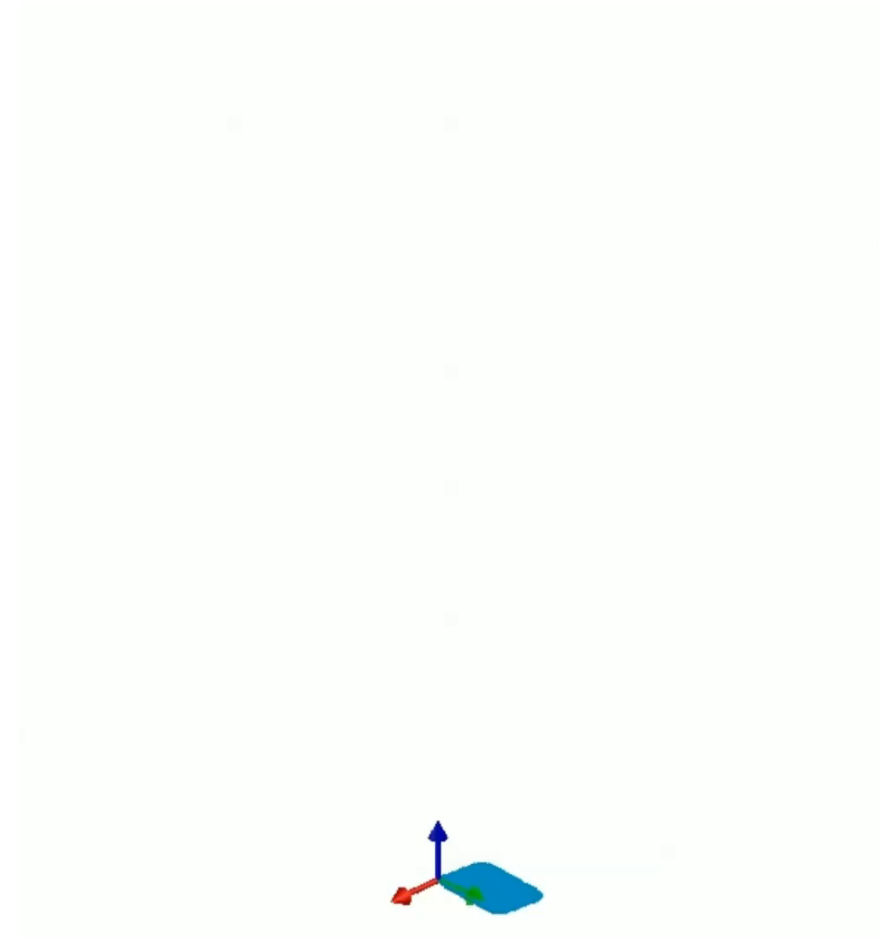
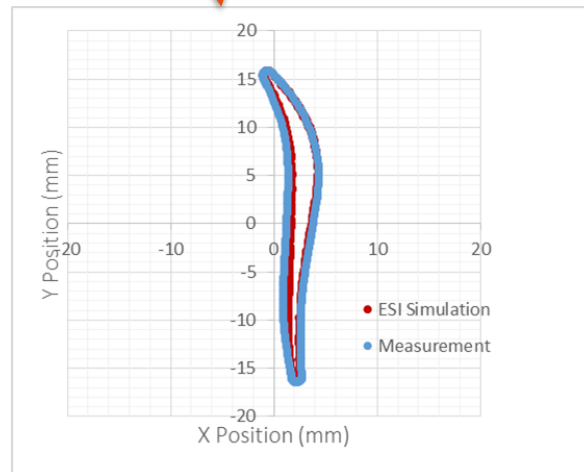


Валидационная модель. Сравнение эксперимента с расчетом.



Printed shape
Simulation result

Validation of blade distortion predictions

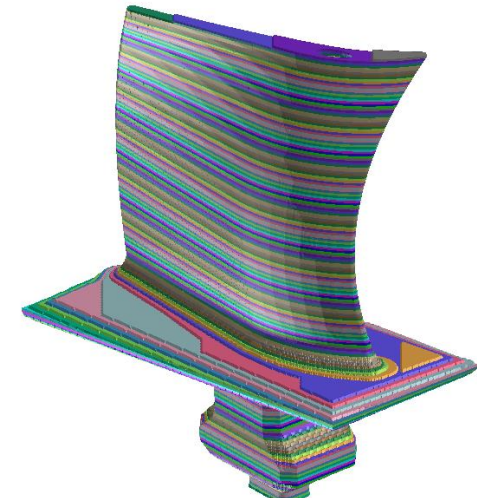


Blade distortion and residual stresses

Построение модели

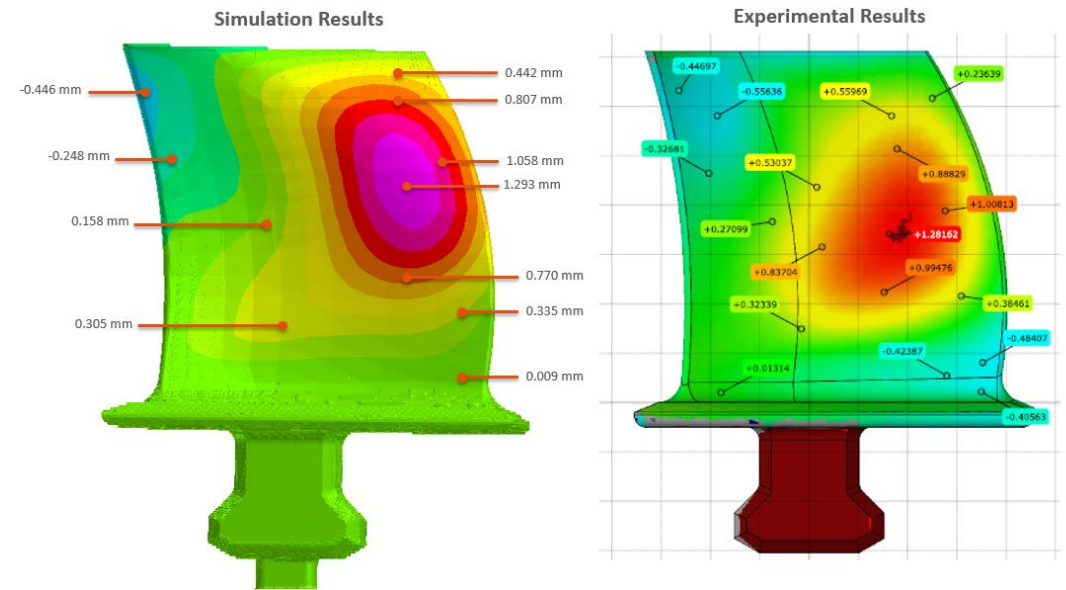
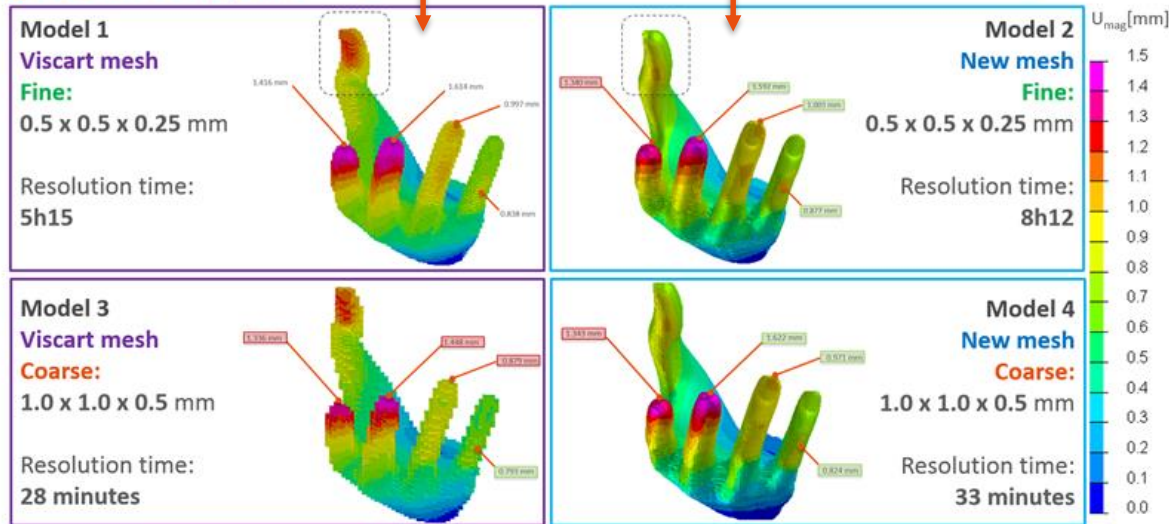
Стратегии создания сетки КЭ

- Ступенчатая – основной подход
- Body fitted - усовершенствованный подход



Classic mesh / body fitted mesh

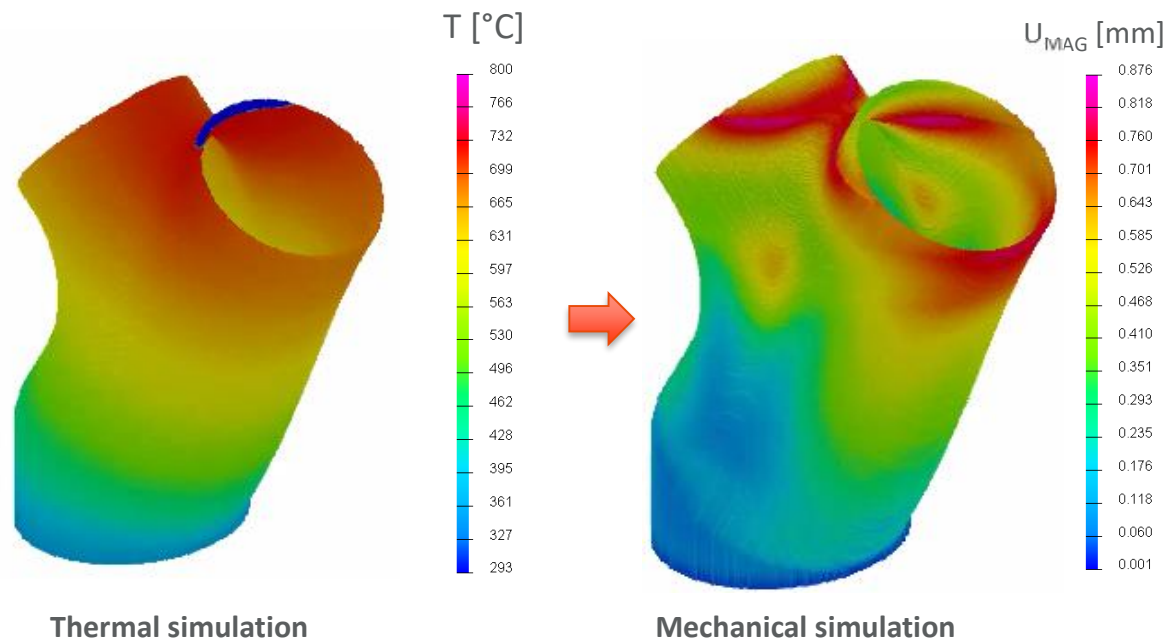
Validation Comparison



Принципы моделирования

Два подхода: высокоточная термомеханическая модель и модель короблений

- Основной подход – модель короблений
 - Послойное моделирование, расчет деформаций каждого слоя
- Обновленный подход – термомеханическая модель
 - Тепловой расчет для получения поля температур, затем механический расчет

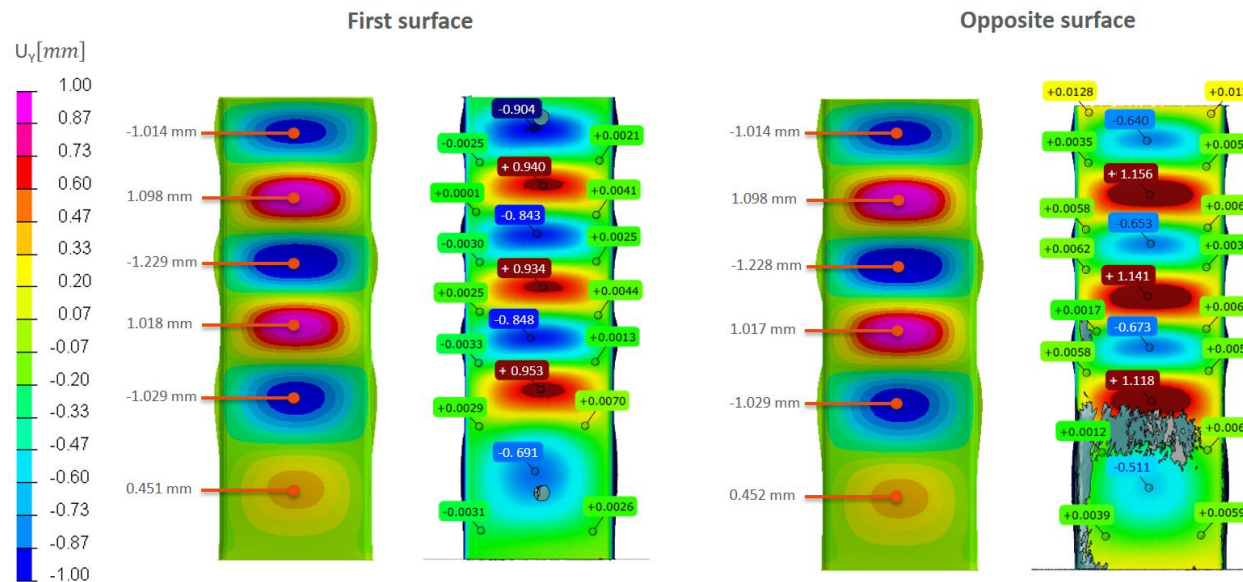


Дополнительные возможности

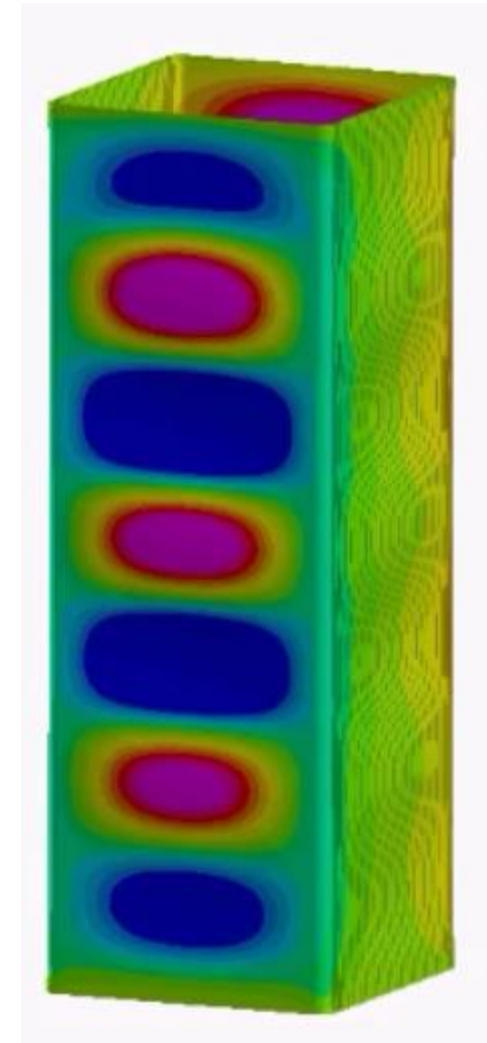
Расчет потери устойчивости тонкостенных изделий в процессе выращивания

- Расчет потери устойчивости:
 - КЭ модель построенная методом body-fitted mesh
 - Опция больших перемещений
 - Корректировка параметров модели короблений

Пример прогнозирования потери устойчивости во время выращивания:



Comparison between numerical model and experimental data



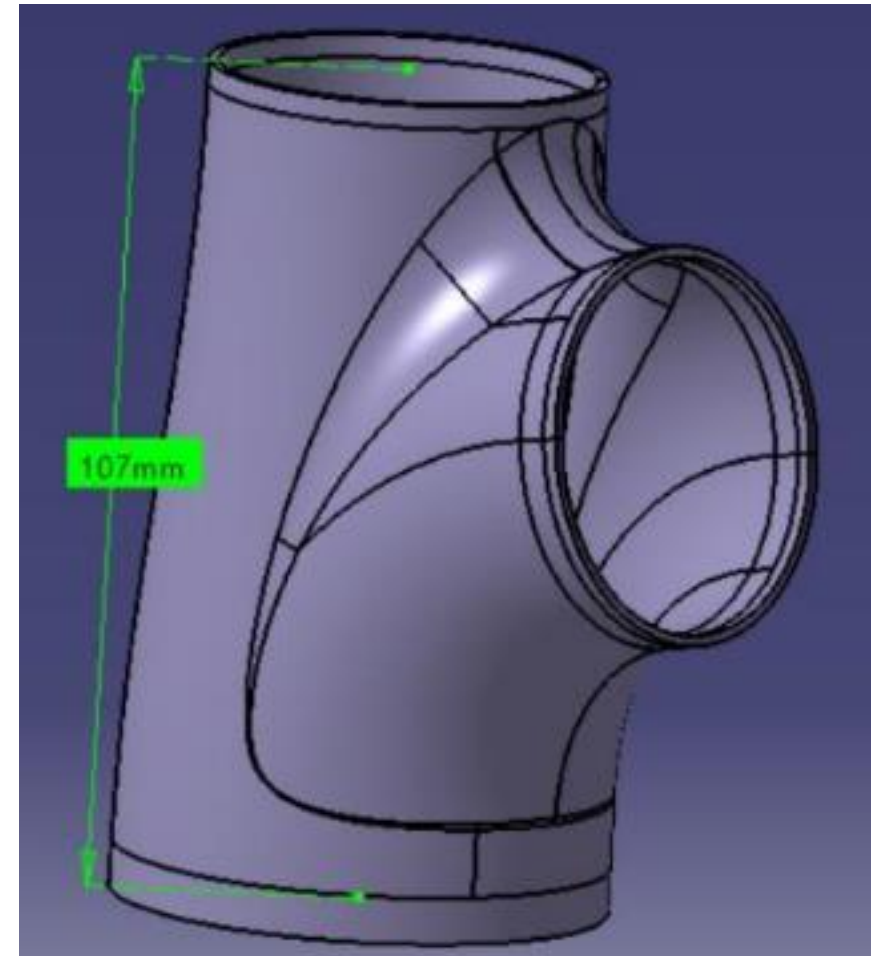
Примеры проектов ESI AM

Компенсация поводок при выращивании авиационной детали для Zodiac

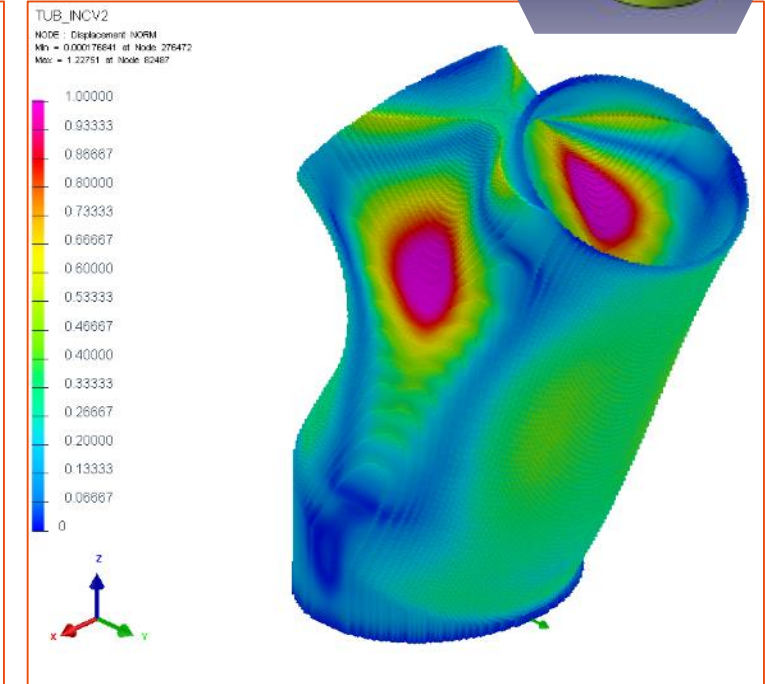
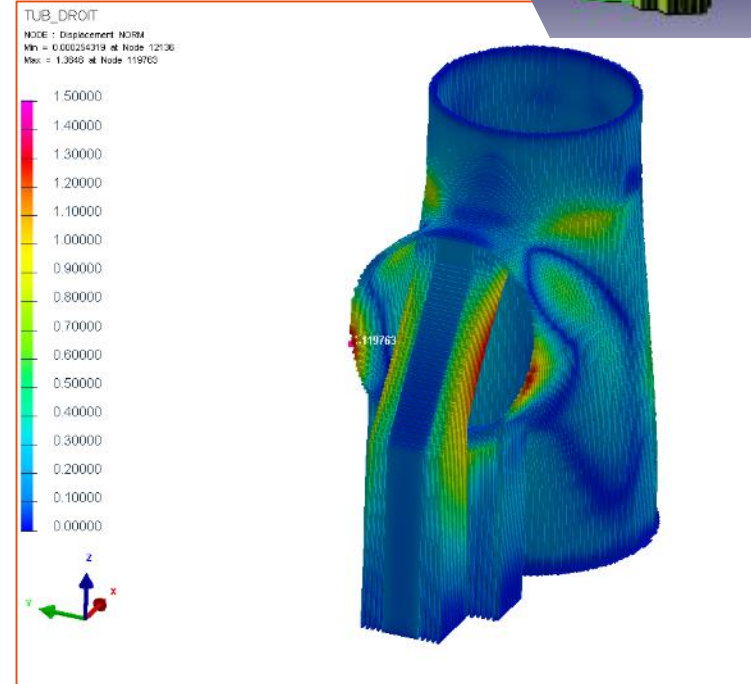
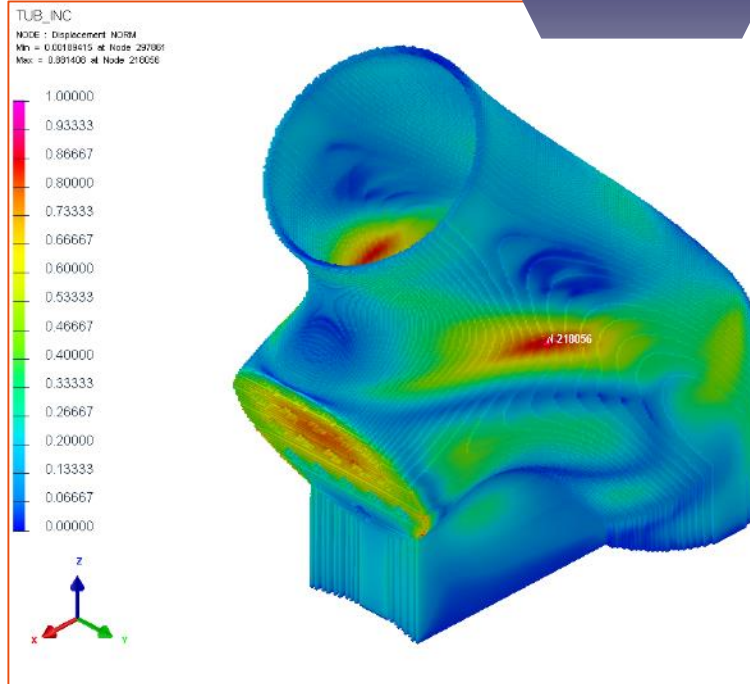
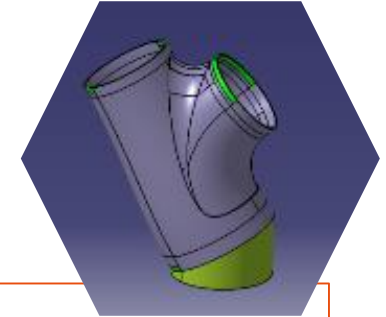
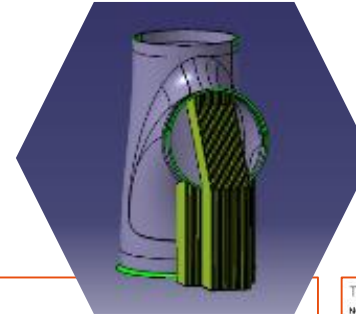
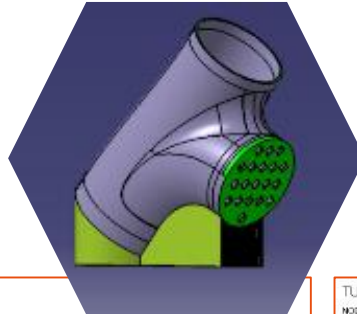
Проект Zodiac



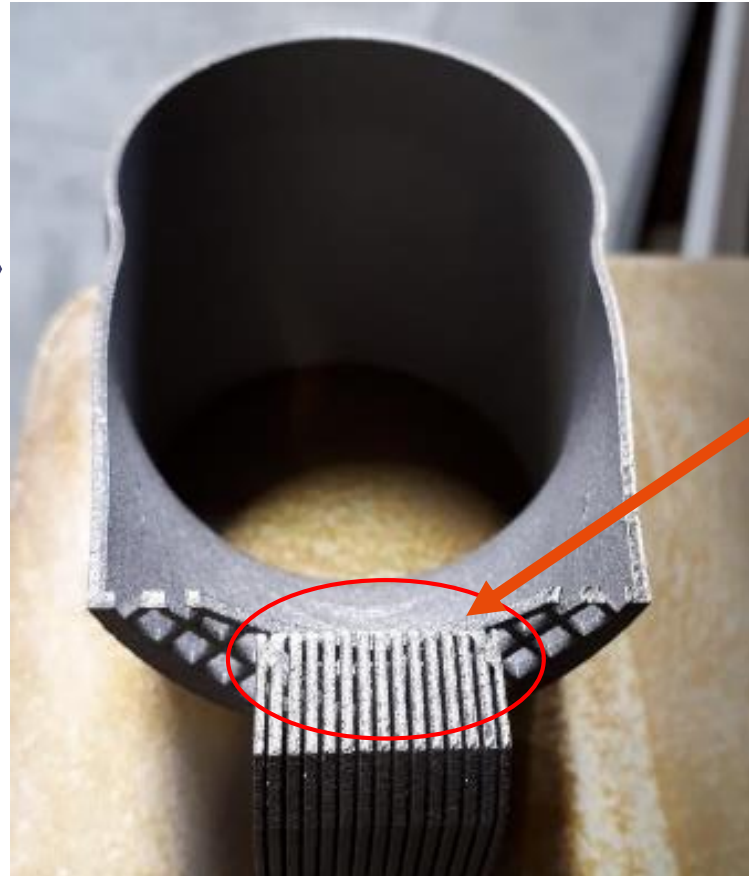
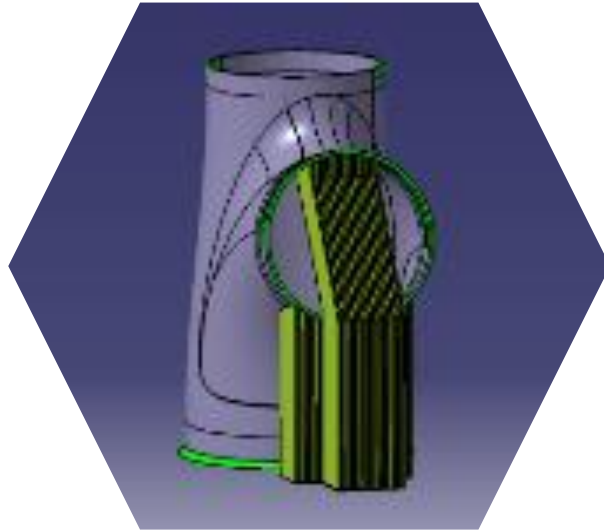
- Деталь авиационного назначения
- Для работы в условиях больших нагрузок
- Основные цели:
 - Получить наилучшую чистоту поверхности
 - Добиться наилучших геометрических характеристик
 - Использовать минимальное количество поддержек



Определение наилучшей ориентации детали и расположения поддержек

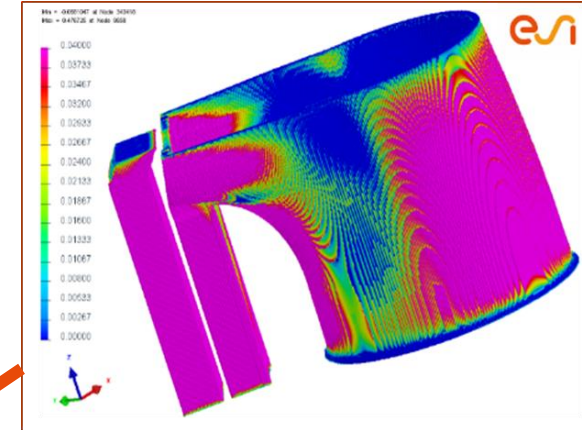


Определение проблем производства

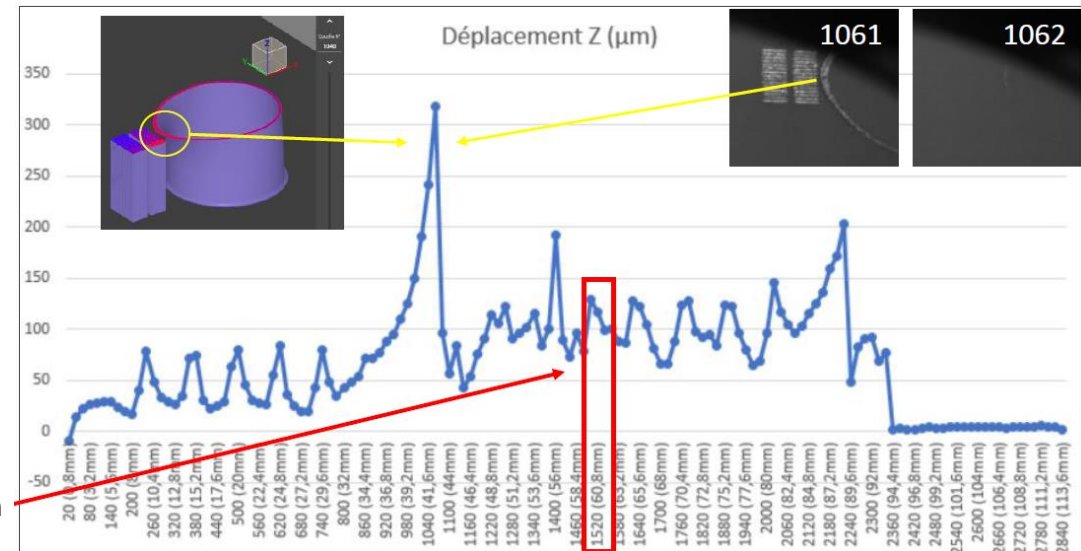


First production

Manufacturability Criterion



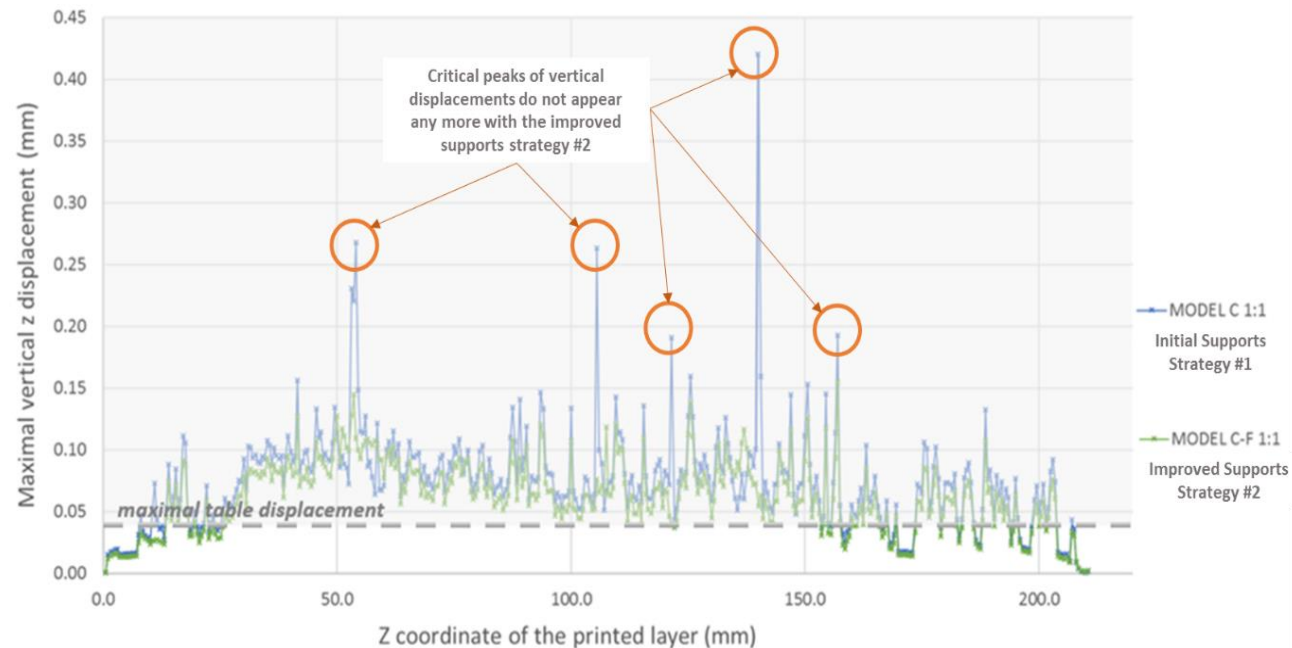
Visual AM Distortion:
Normal Displacement Field
numerically predicted.



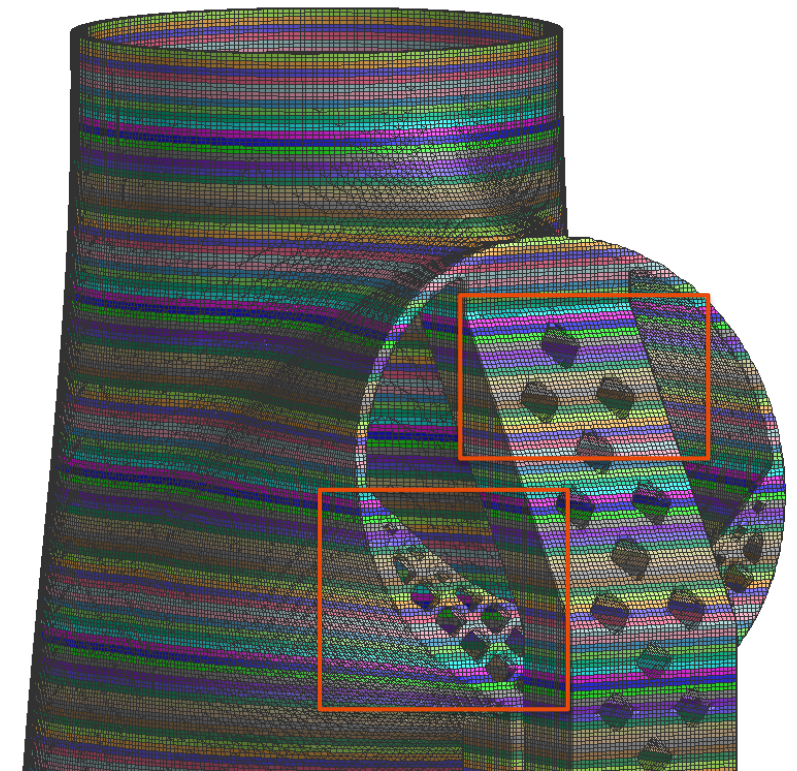
Анализ конструкции на технологичность

Контроль остановки рекоутера и валидация поддержек

- Анализ технологичности
 - Позволяет обнаружить опасное взаимодействие рекоутера с выращиваемой деталью

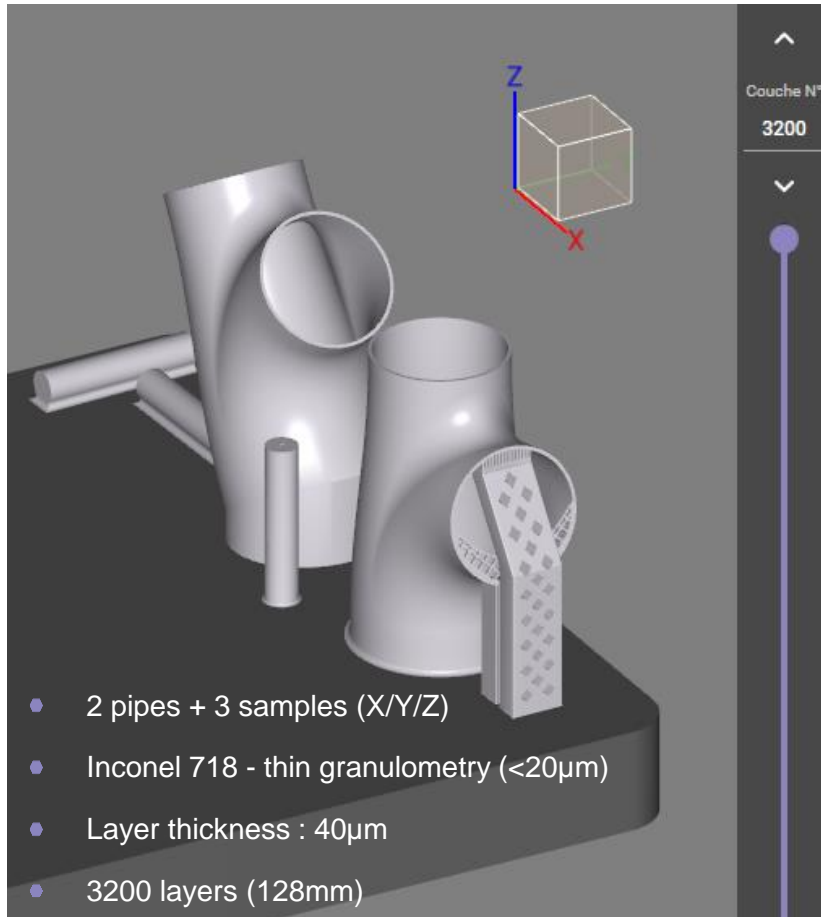


Сравнение двух стратегий выращивания по критерию технологичности

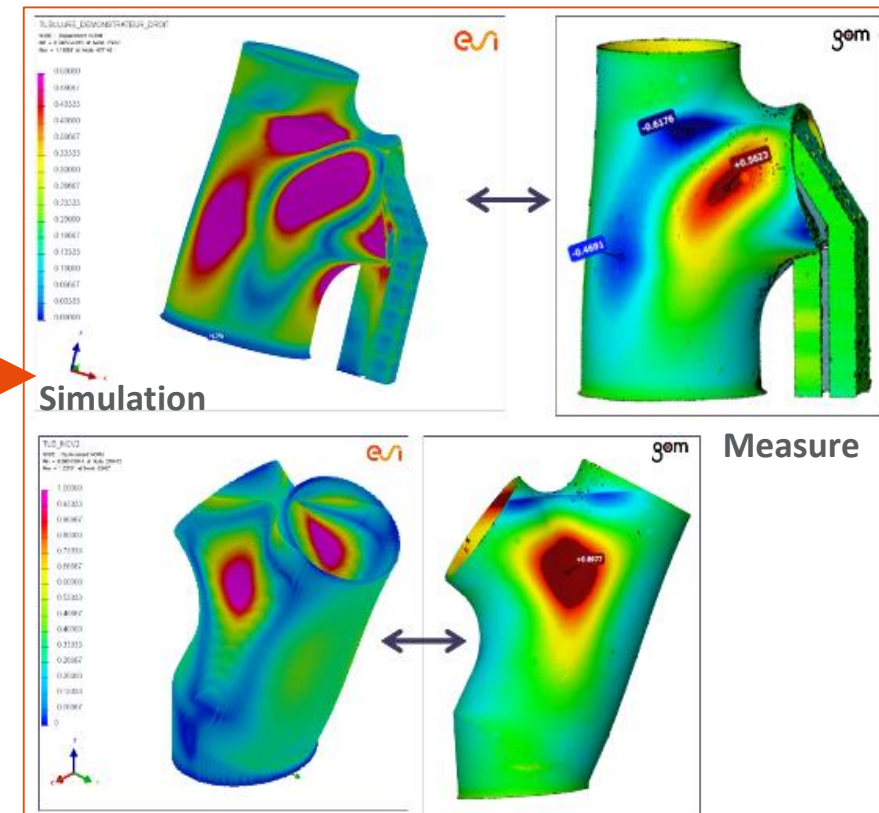


Support strategy manufacturability validation
Support 3D modeling with body fitted grid technology

Успешная печать изделия







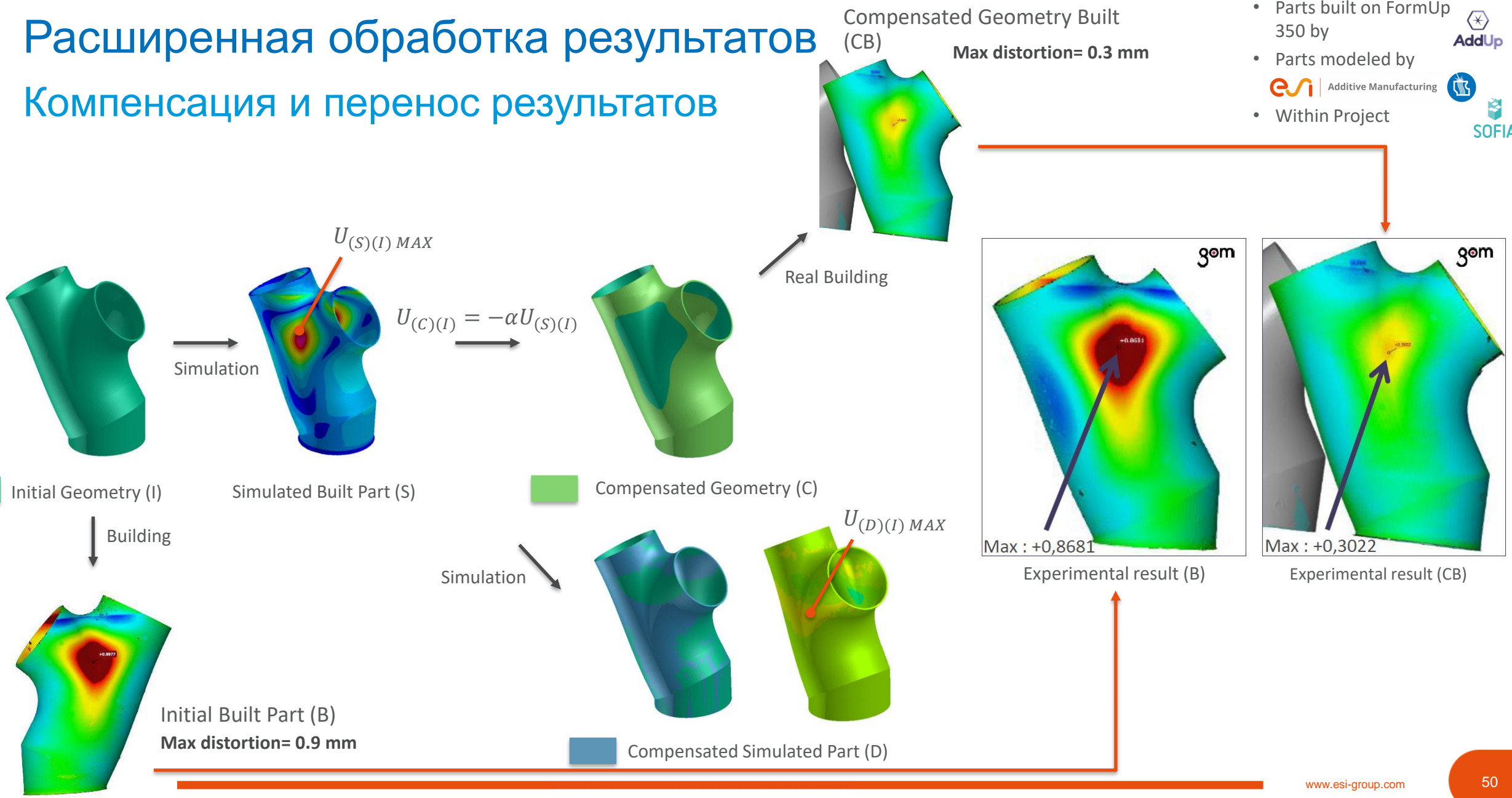
Second production



Le design et la conception sont la propriété de Zodiac Aerospace. Toute diffusion d'informations relatives au design, même dans le cadre du projet Sofia, est conditionnée à un accord préalable écrit de Zodiac Aerospace. Les modifications apportées au design sont la propriété d'Addup.

Расширенная обработка результатов Компенсация и перенос результатов

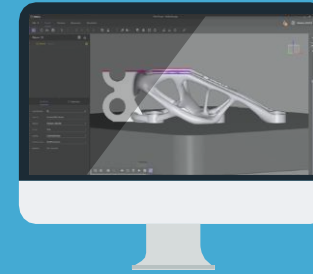
- Parts designed by 
- Parts built on FormUp 350 by 
- Parts modeled by 
- Within Project 



Взаимодействие с производителями оборудования

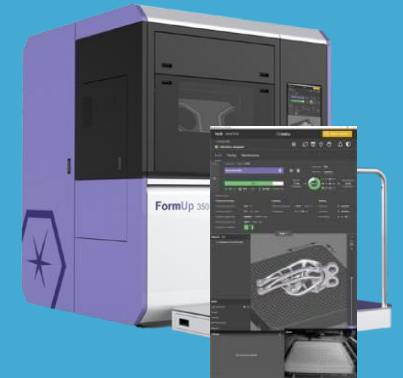


Программное обеспечение



AddUp Manager™

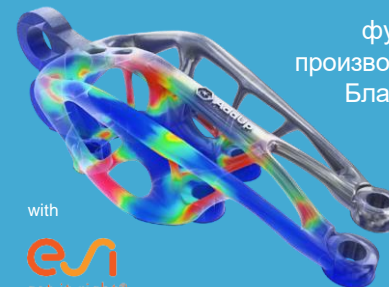
Программное обеспечение для подготовки к аддитивному производству металлических деталей AddUp Manager позволяет импортировать 3D-файлы и обеспечивает связь с драйвером принтера.



AddUp NCore

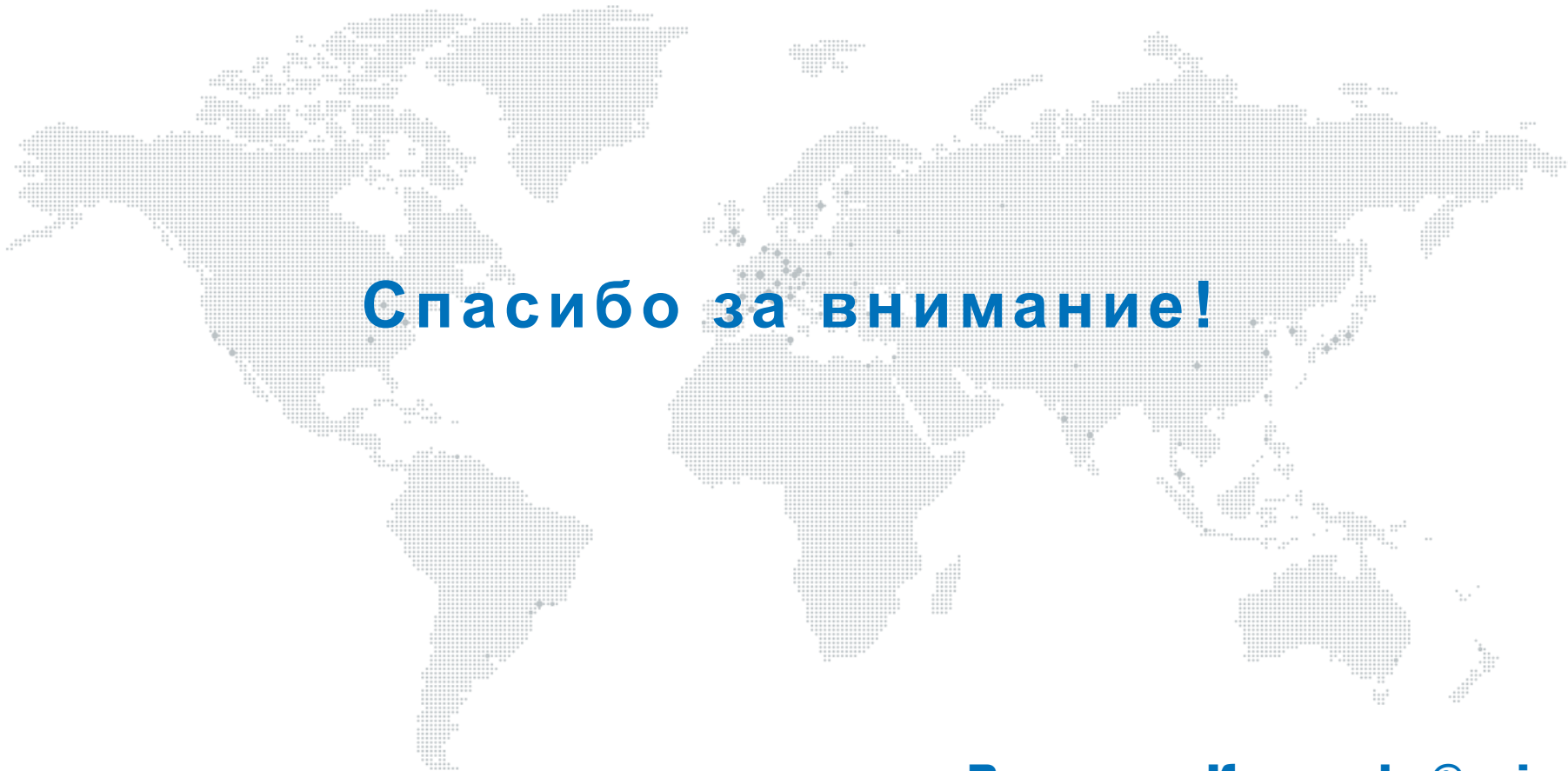
NCore - это управляющее программное обеспечение для управления машинами FormUp@ 350. Схожая с эргономикой AddUp Manager™, она позволяет запускать производство детали с, отображать состояния и события или управлять машинными модулями.

Distortion Simulation AddOn



Оптимизация параметров процесса является фундаментальным шагом в процессе аддитивного производства и маркером конкурентного преимущества. Благодаря Distortion Simulation AddOn существенно повышается эффективность работы и скорость запуска производства изделий.





Спасибо за внимание!

Вячеслав Котов vkv@esi-group.com