



**ПОЛИТЕХ**  
Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

# Software package for high-performance computations in airframe assembly modeling

---

Надежда Зайцева, Татьяна Погарская

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого

# Сборка авиационных конструкций

Особенности промышленной сборки в авиастроении:

- Высокий уровень конкуренции и жесткие стандарты качества
- Крупногабаритные деформируемые конструкции
- Присутствие случайных сборочных отклонений
- Стандартные программные продукты не позволяют проанализировать процесс сборки с нужной точностью



Серийная сборка,  
[boeng.com](http://boeng.com)



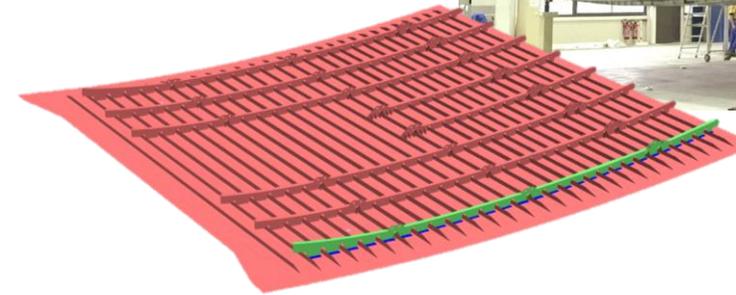
Установка крепежных  
элементов, [airbus.com](http://airbus.com)

# Программный комплекс ASRP

## ASRP (Assembly Simulation of Riveting Process)

специализированный комплекс для моделирования и оптимизации процесса сборки крупногабаритных конструкций

- Определение перемещений и напряжений
- Учет контакта и деформаций
- Верификация сборочной процедуры
- Оптимизация сборочной процедуры



A350 CWB  
lower beam assembly

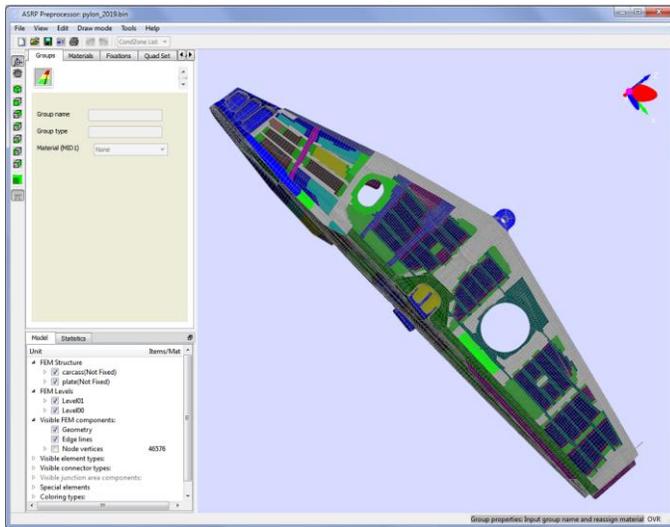


A320 NEO  
pylon assembly

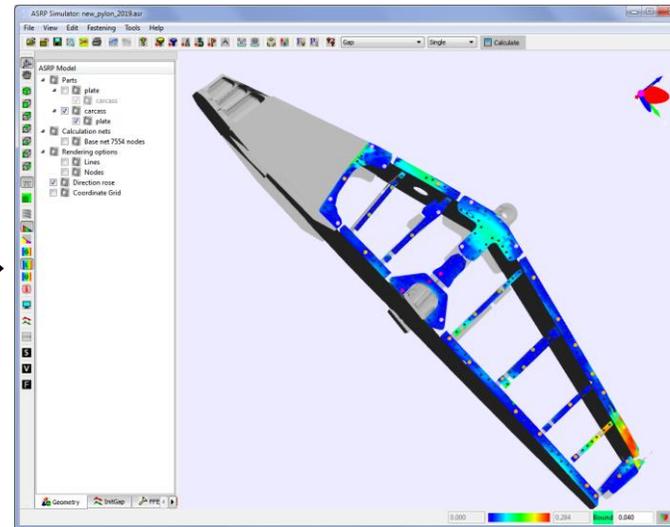
# Программный комплекс ASRP



ASRP Pre/Postprocessor



ASRP Simulator



Многопроцессорная версия ASRP Simulator



MSC  
Nastran

Dassault  
Abaqus

Создание моделей для Simulator на основе конечно-элементных моделей соединений. Вычисление напряжений, вызванных процессом клепки

Вычисление перемещений частей, зазоров между деталями, верификация и оптимизация расположения крепежных элементов, вычисление нагрузки в элементах крепления и др.

Закрепления,  
Позиции отверстий

Конечно-  
элементная модель

Измерения поверхностей  
и начальных зазоров

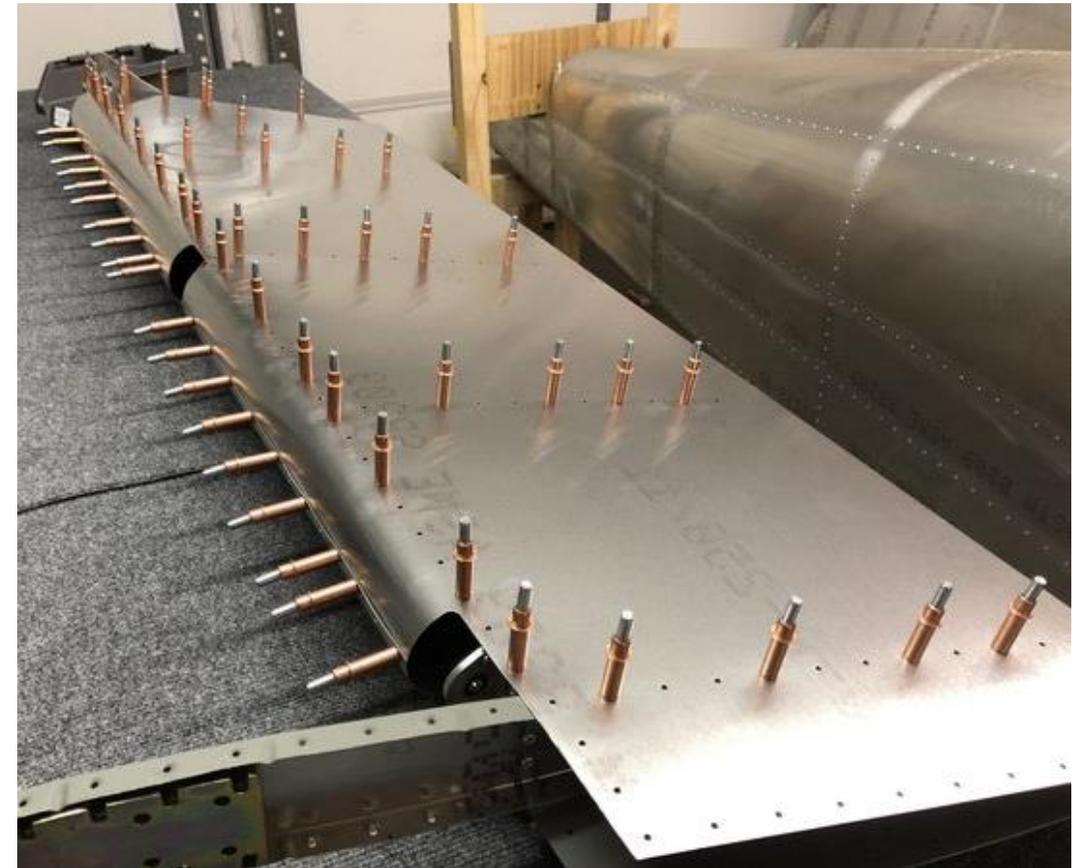
Анализ допусков и  
посадок

# Временная сборка

Соединение деталей временными крепежами позволяет избежать дефектов при рассверливании отверстий и установке финальных заклепок

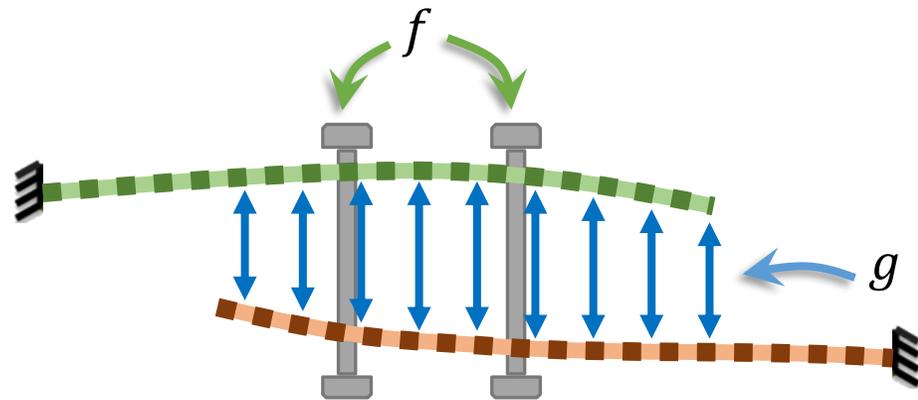
- До 2-х миллионов временных крепежей
- Ручная установка
- 60% от всей стоимости сборки
- 80% всех обнаруживаемых дефектов

Оптимизация расстановки позволяет ускорить процесс и сократить себестоимость сборки

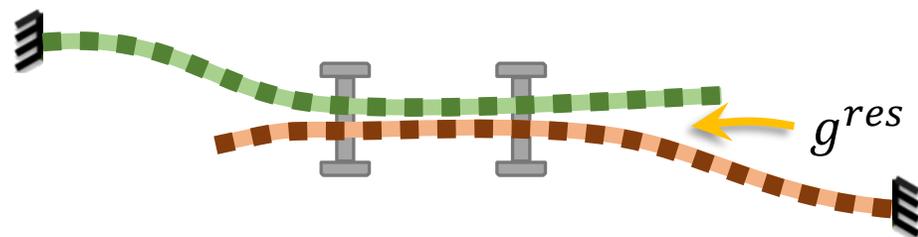


Соединение деталей с помощью временных крепежей,  
[slingsi.rueker.com](http://slingsi.rueker.com)

# Моделирование сборочного процесса



(a) до контакта



(б) после контакта

Схематичное изображение соединения

Вариационная постановка контактной задачи:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} x^T K x - f^T x &\rightarrow \min \\ A^T x &\leq g \end{aligned}$$

$x \in \mathbb{R}^n$  – вектор перемещений в зоне возможного контакта (зоне стыка)

$n = 1000 \div 20\,000$  – число расчетных узлов

$K \in \mathbb{R}^{n \times n}$  – редуцированная матрица жесткости

$f \in \mathbb{R}^n$  – вектор внешних сил

$A \in \mathbb{R}^{n \times m}$  – матрица ограничений

$g \in \mathbb{R}^m$  – начальный зазор между деталями

$$g^{res} = g - A^T x \in \mathbb{R}^m \text{ – результирующий зазор после сборки}$$

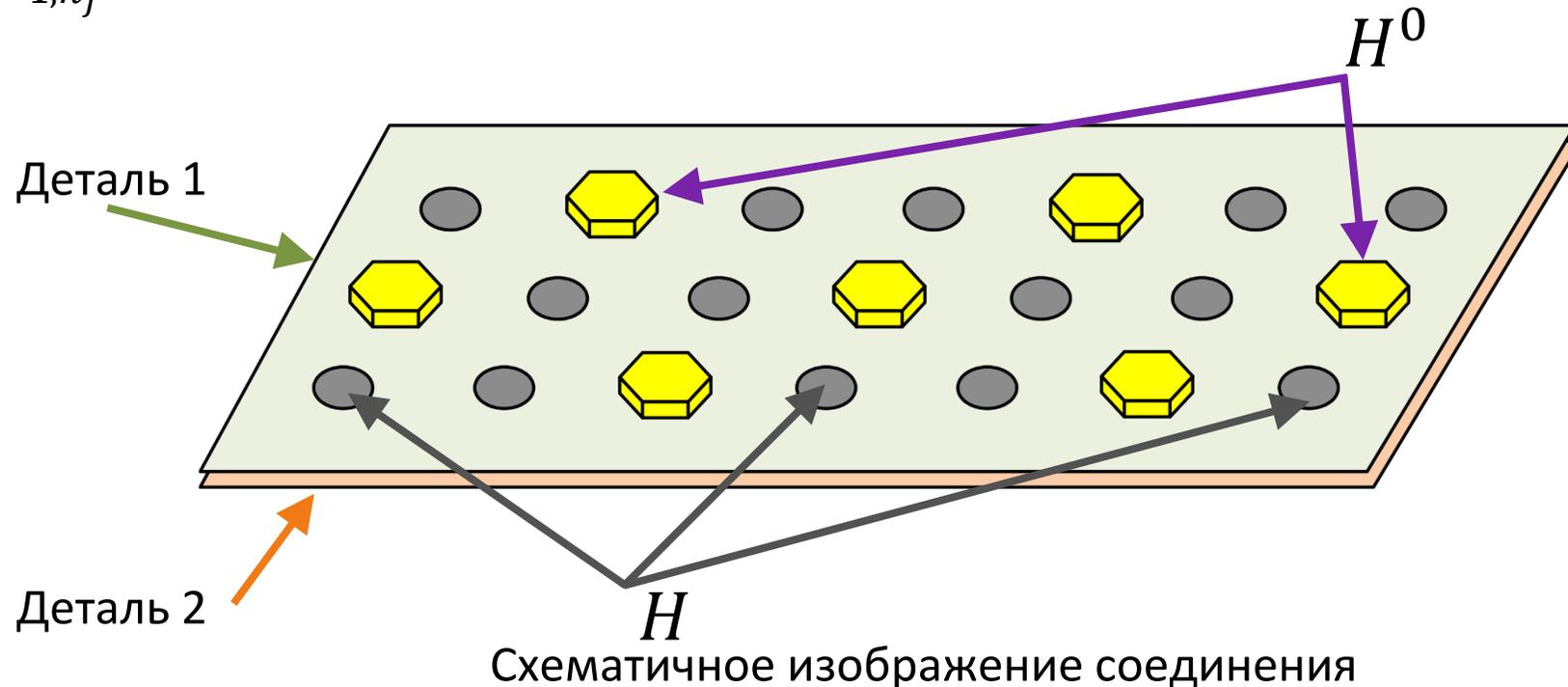
# Моделирование сборочного процесса

**ВКЭ** – временные крепежные элементы, устанавливаются для уменьшения зазора между деталями:

$$g^{res} \leq \Delta$$

$H = \{h_i\}_{i=1, n_h}$  – исходное множество отверстий (места возможной установки ВКЭ)

$H^0 = \{h_i^0\}_{i=1, n_f}$  – подмножество множества  $H$ , расстановка временных крепежных элементов (ВКЭ)

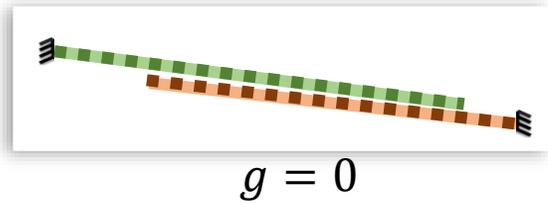


Задачи:

- **Верификация** (проверка заданной расстановки)
- **Оптимизация** (поиск новой расстановки)

# Моделирование сборочных отклонений

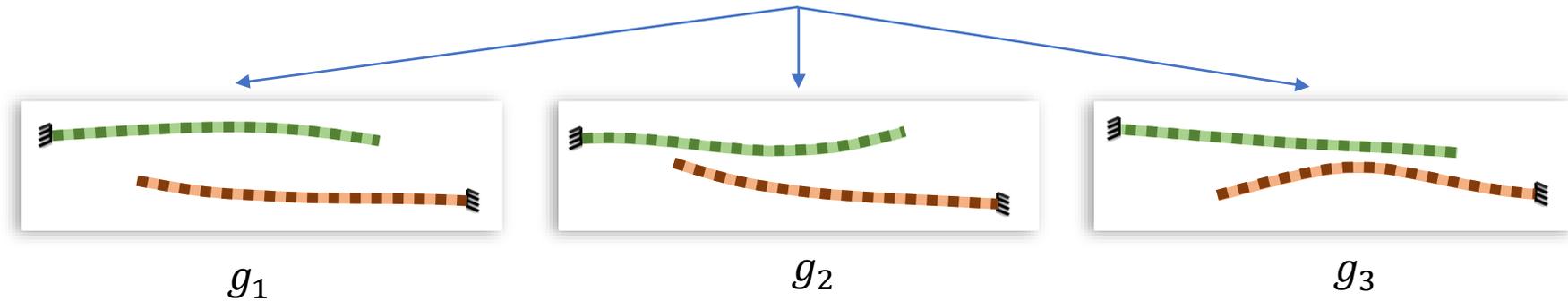
Идеальный случай:



Случайные сборочные отклонения:

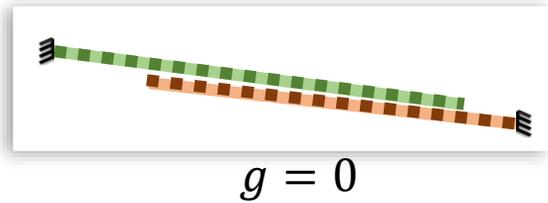
- Производственный процесс (неточности изготовления и обработки)
- Сборочный процесс (неточности закрепления и установки крепежей)

Случайные начальные зазоры



# Моделирование сборочных отклонений

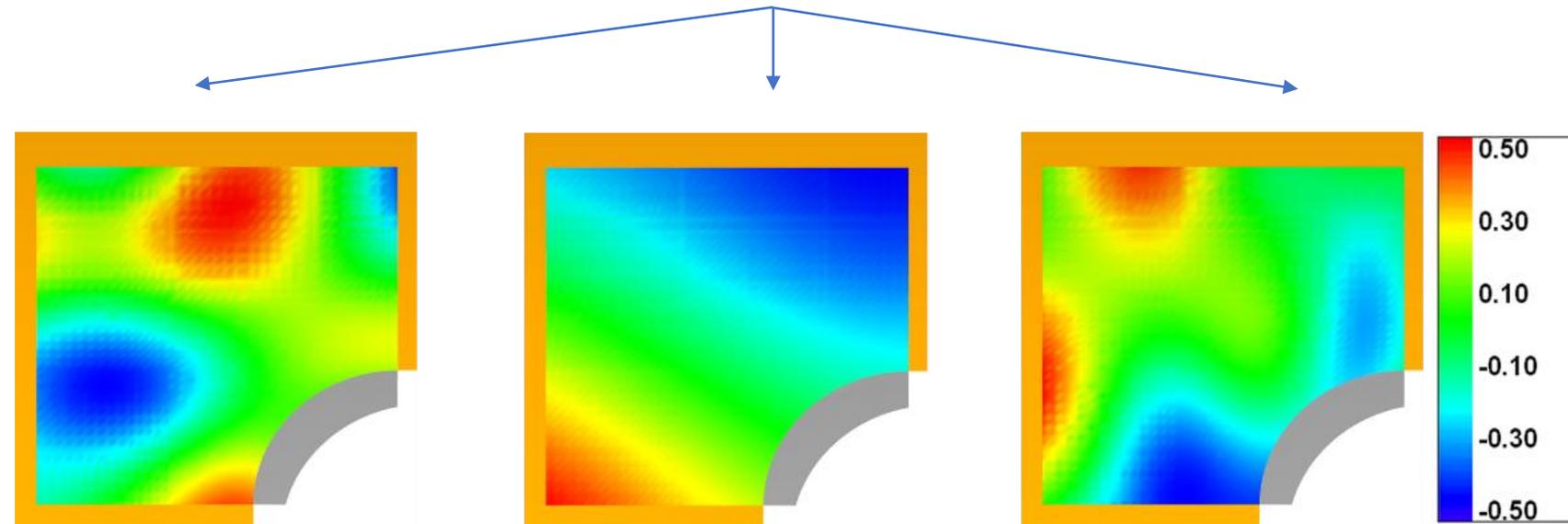
Идеальный случай:



Случайные сборочные отклонения:

- Производственный процесс (неточности изготовления и обработки)
- Сборочный процесс (неточности закрепления и установки крепежей)

Случайные начальные зазоры

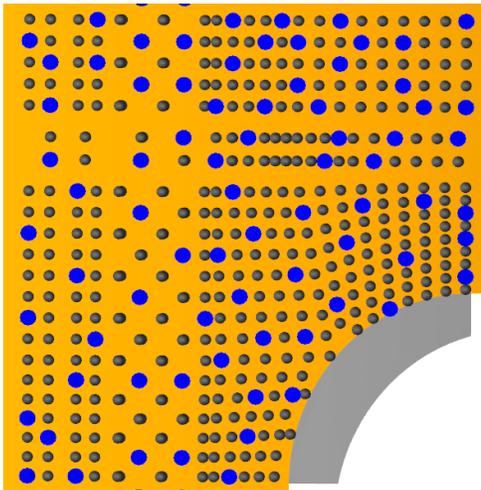


# Моделирование сборочных отклонений

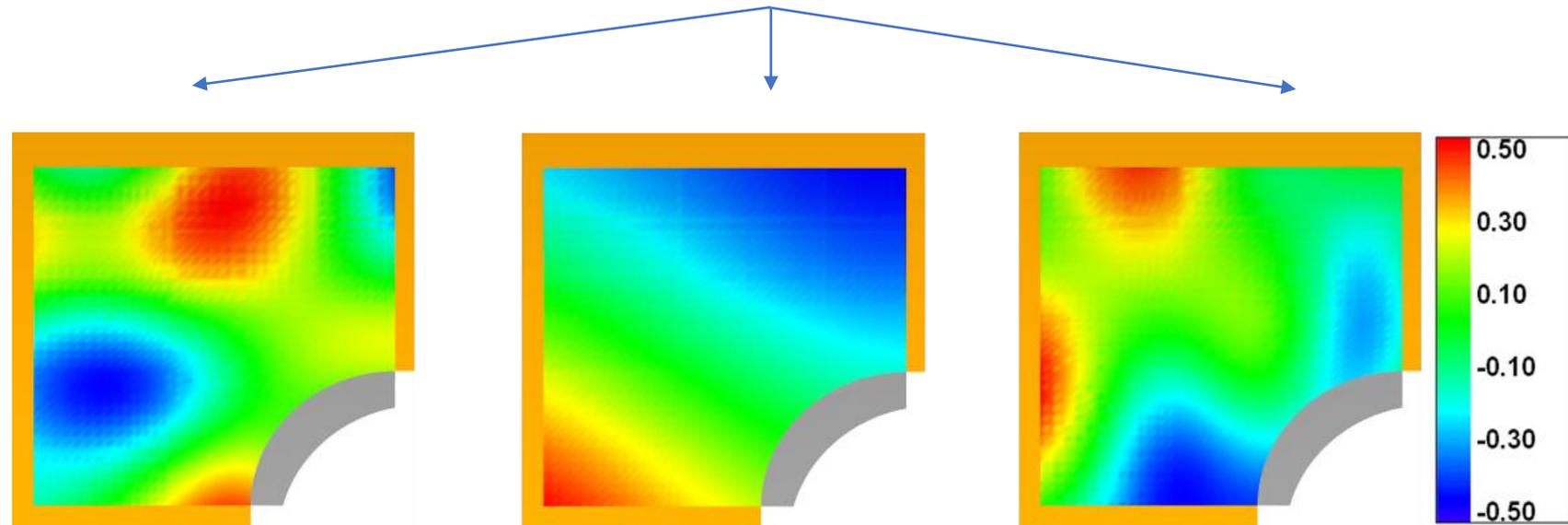
Случайные сборочные отклонения:

- Производственный процесс (неточности изготовления и обработки)
- Сборочный процесс (неточности закрепления и установки крепежей)

Единый шаблон  
крепежных элементов



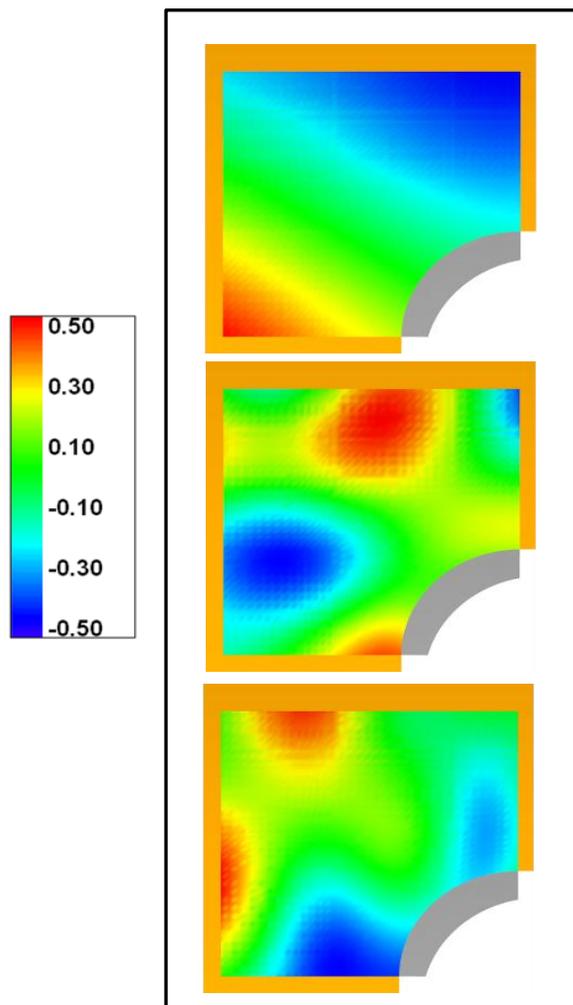
Случайные начальные зазоры



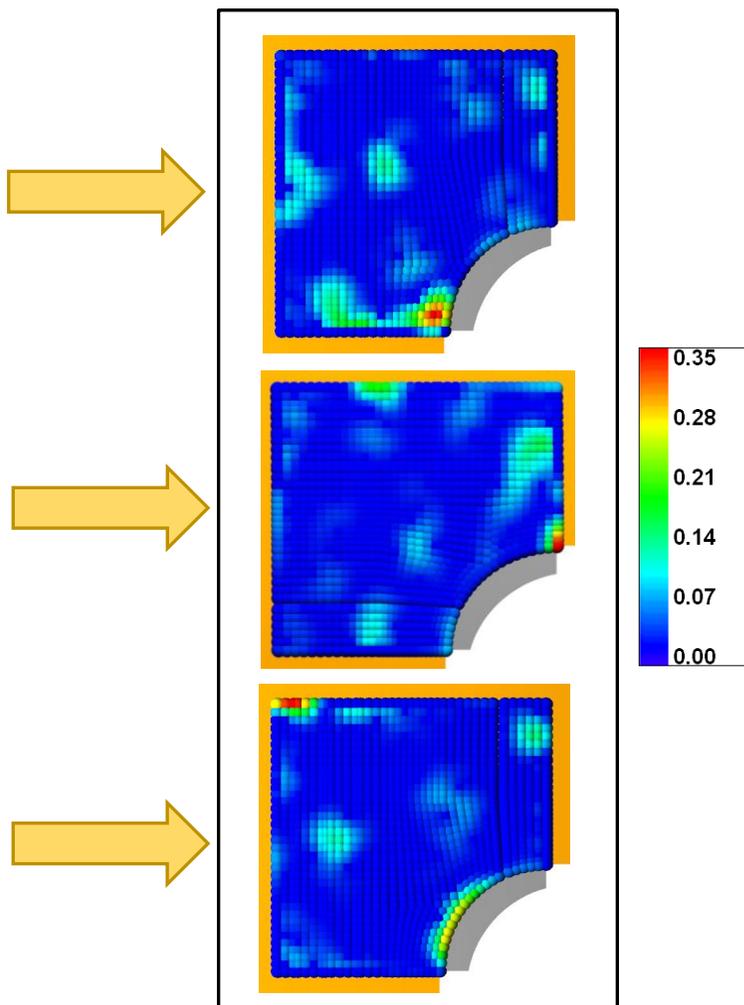
Верификация: шаблон должен  
хорошо работать для всех  
случайных отклонений

# Верификация с учетом случайных отклонений

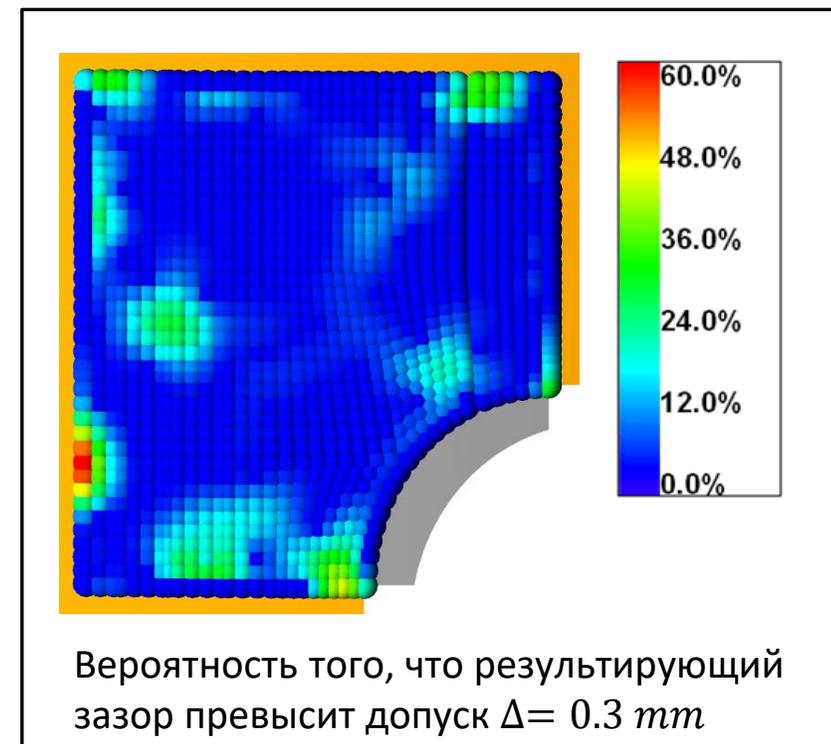
Этап 1. Облако начальных зазоров



Этап 2. Облако результирующих зазоров



Этап 3. Анализ результатов



# Создание набора начальных зазоров

- Процедура измерения не предусмотрена
- Процесс сборки только разрабатывается



Малый набор доступных измерений (~10 шт.)

1. Модель начального зазора на основе случайного поля:

$$g_{RF}(x, y) = \mu(x, y) + \xi(x, y)$$

$\mu(x, y)$  — детерминированное скалярное поле

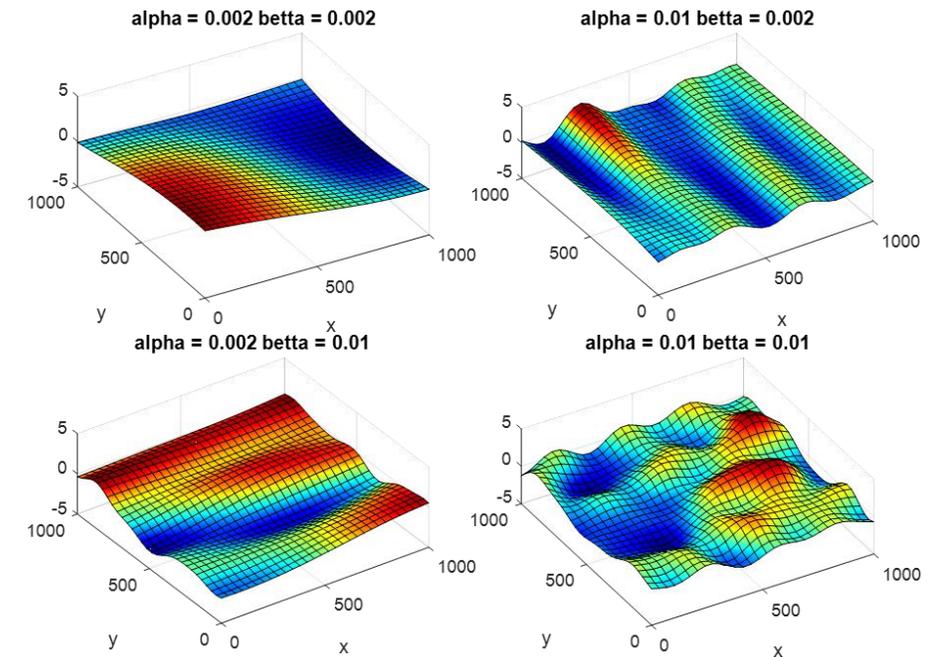
$\xi(x, y)$  — гауссово случайное поле

2. Модель начального зазора на основе разложения по базису:

$$g_{MD}(x, y) = \sum_{k=1}^K \lambda_k e_k(x, y)$$

$e_1(x, y), e_2(x, y), \dots$  — набор ортонормированных функций

$\lambda_k, \lambda_2, \dots$  — случайные коэффициенты



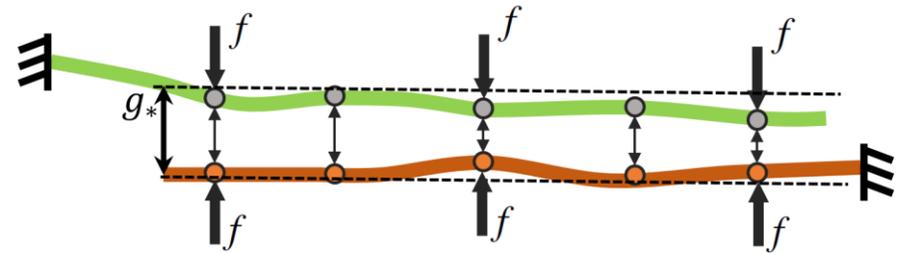
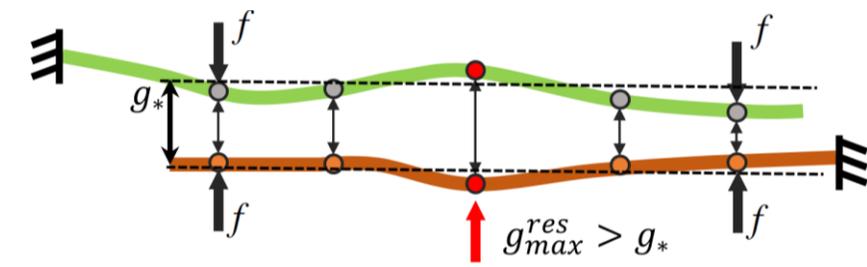
Примеры реализаций случайного поля с разными параметрами

# Оптимизация сборочного процесса

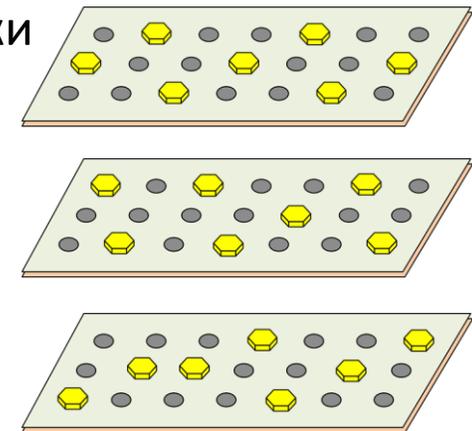
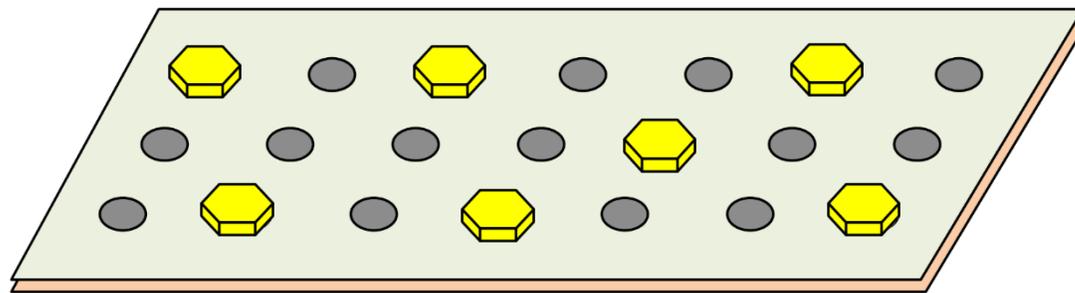
- При поиске расстановки 150 ВКЭ среди 300 отверстий возникает  $C_{300}^{150} \approx 9.3 \cdot 10^{88}$  вариантов
- Задача комбинаторной оптимизации

Задача оптимизации - поиск расстановки минимального размера:

определить число ВКЭ  $n_*$  и их расположение  $H^0$  так, чтобы максимальное значение результирующего зазора  $g_{max}^{res}$  не превышало заданного значения  $g_*$



- Необходимо вычислять значение функции цели для каждой расстановки



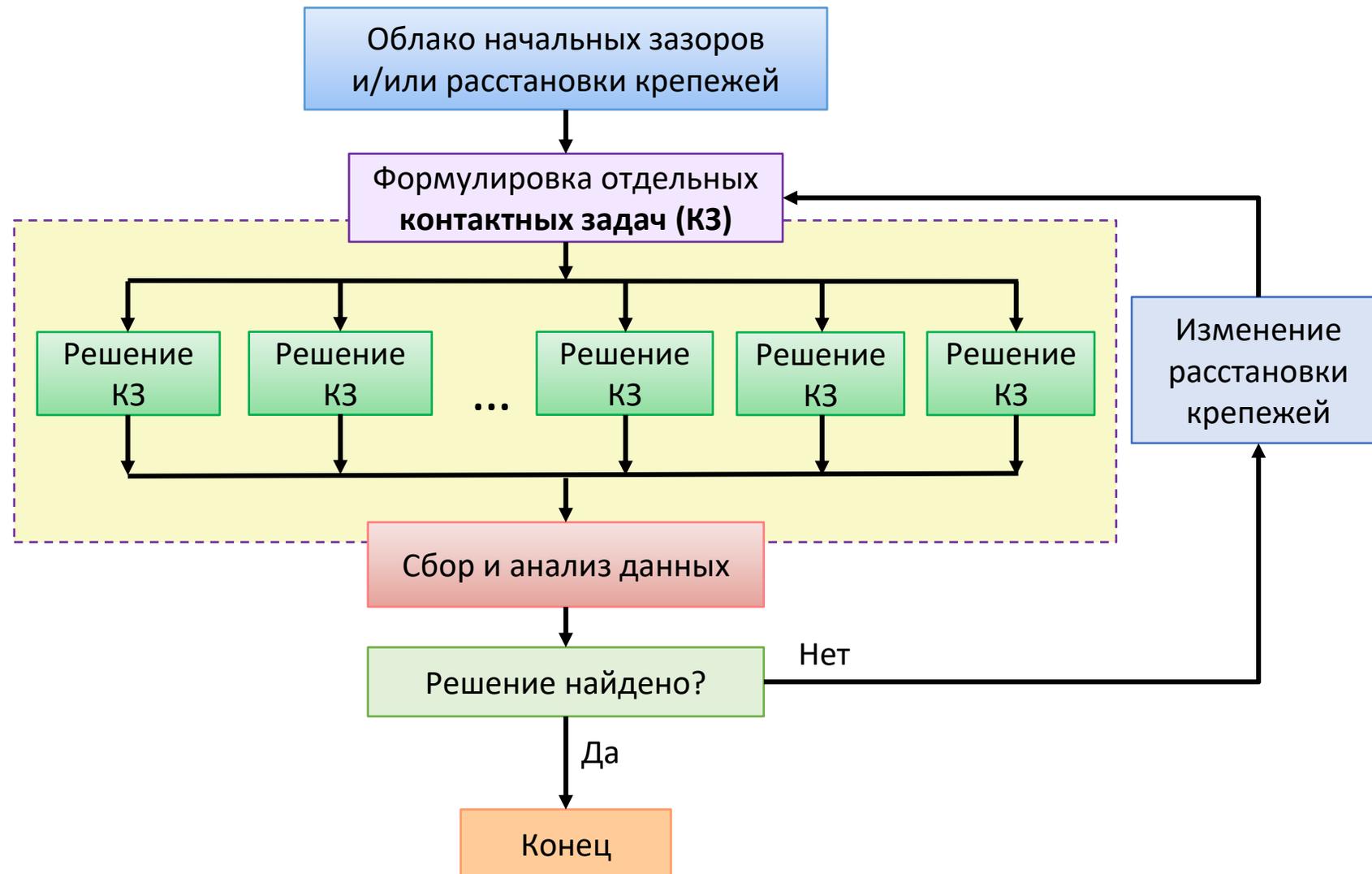
# Параллельные вычисления



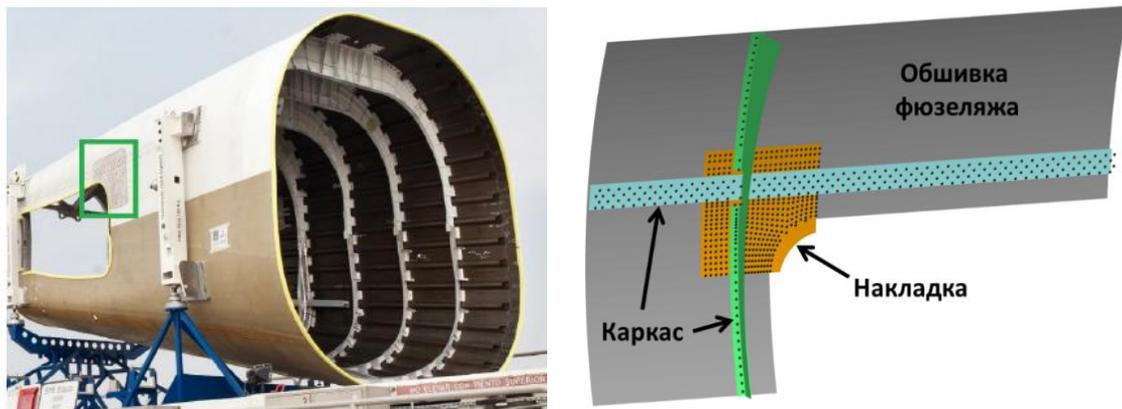
Суперкомпьютерный центр  
«Политехник RSC PetaStream»

Tornado:

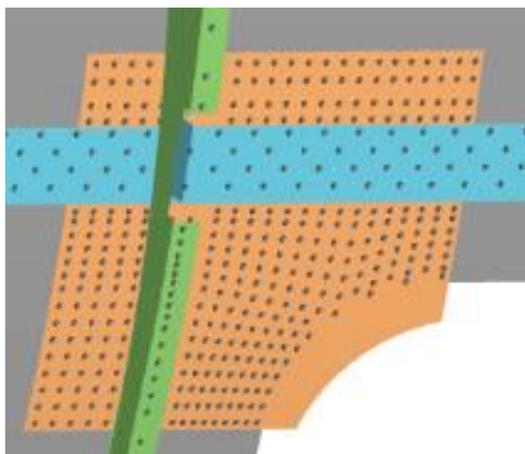
- nodes: 612
- cpu: 2 x Intel Xeon CPU E5-2697 v3 @ 2.60GHz
- cores/hwthreads: 28 / 28
- mem: 64G
- net: 56Gbps FDR Infiniband



# Практическое применение



Хвостовая часть самолета A350-900 (слева) и часть модели (справа)

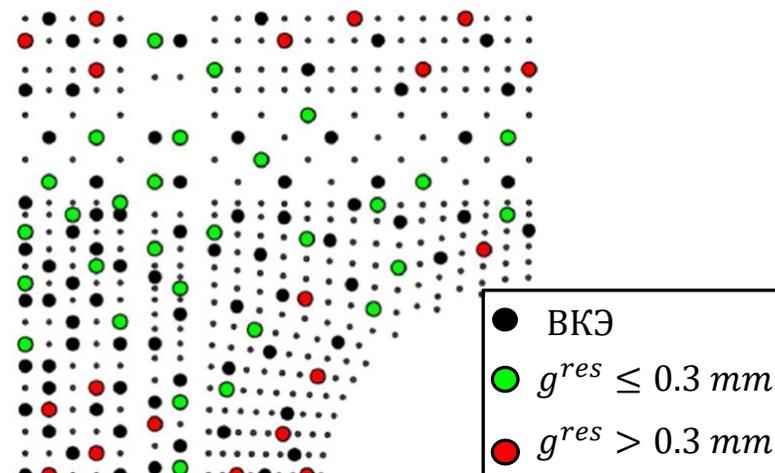


Зона стыка

Требуется определить минимальное число и положение ВКЭ, обеспечивающих результирующий зазор (при сверлении) не более чем **0.3 мм**

Исходно:

- 283 отверстий
- 76 ВКЭ установлено
- 48 отверстий должны быть рассверлены



Зазоры в рассверливаемых отверстиях для исходной расстановки

# Практическое применение

## Результаты оптимизации



Найденные расстановки

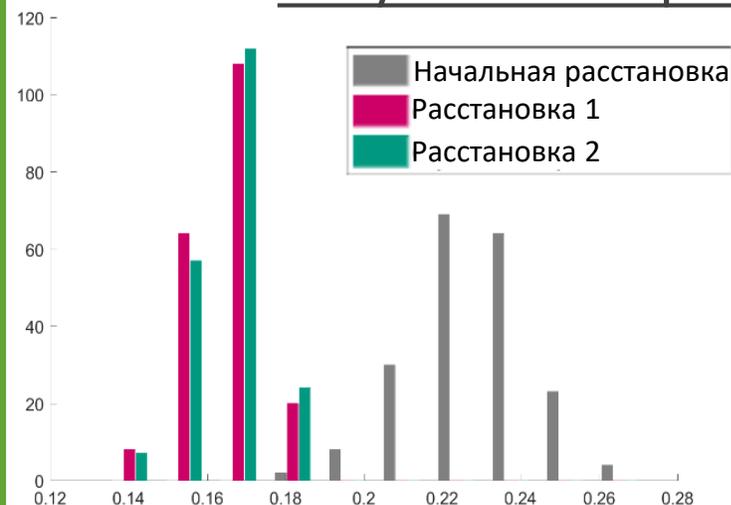
■ Геодезический алгоритм

● Метод локальных вариаций

Время работы алгоритмов

Алгоритм	Время, с	Число ВКЭ
Начальная расстановка	-	76
Метод локальных вариаций	4 дня	53
Геодезический алгоритм	110 минут	50

## Результаты верификации



Распределение зазора (мм) в отверстиях при сверлении

$T_1$  - время в последовательной версии  
 $T_p$  - время в многопроцессорной версии

Модель	N	Время, с.		Ускорение $S = T_1/T_p$
		$T_1$	$T_p$	
1800 узлов	20	100.3	9.6	10.5
	50	250.9	9.5	26
	100	501.7	9.6	52.2
	200	1003.4	10.1	99.3
7000 узлов	20	1469	157	9.3
	50	7346	279	27.0
	100	14692	279	52.7
	200	29384	326	90.6

Время на верификацию по облаку из  $N$  начальных зазоров

# Заключение

- Комплекс ASRP разработан для моделирования сборочных процессов в авиастроении
- Разработанные методы анализа позволяют проводить верификацию сборочных технологий с учетом возможных отклонений
- Встроенные инструменты для оптимизации расстановок крепежных элементов позволяют ускорить сборочный процесс
- Специальные численные методы и использование параллельных вычислений позволяют проводить анализ в режиме реального времени

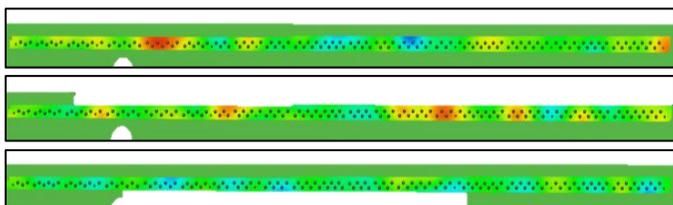
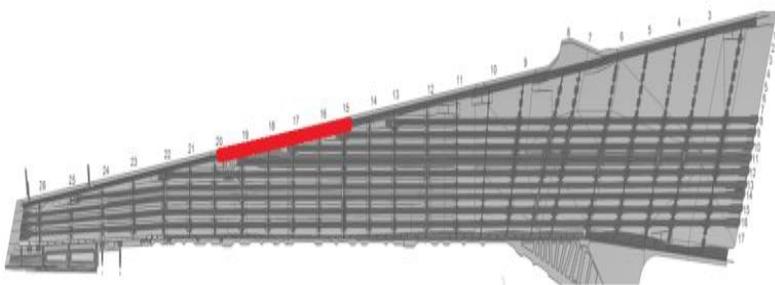
ASRP – это удобный инструмент для инженерной разработки сборочных технологий

Спасибо за внимание!

# Практическое применение

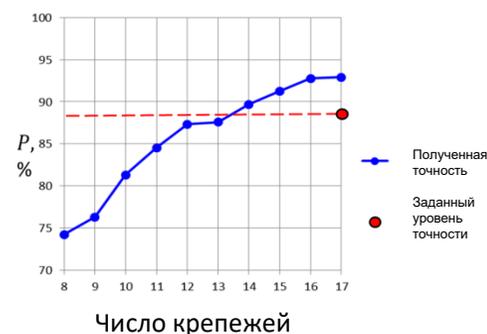
## Сборка крыла А320 (присоединение панелей к каркасу)

Задача: определить минимальное число крепежей



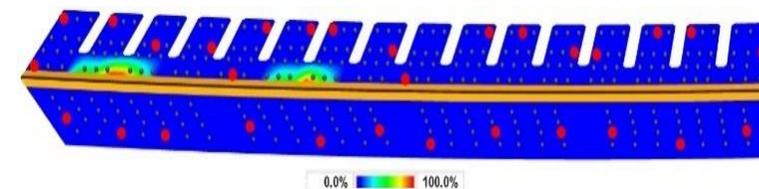
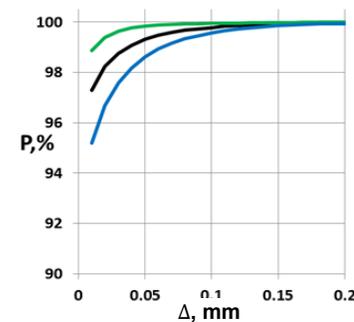
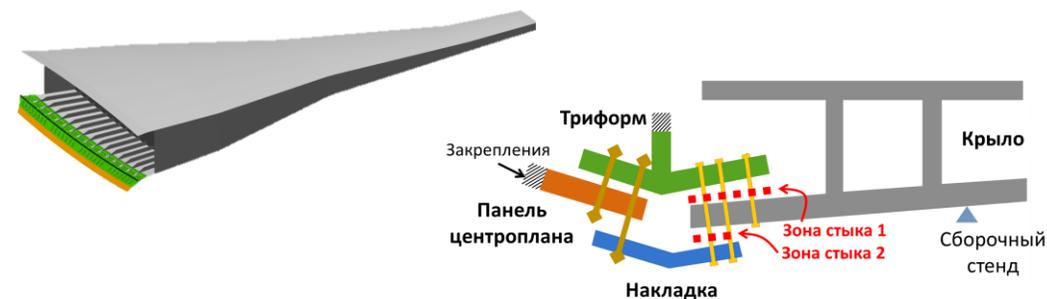
Примеры реализаций начального зазора

Оценка качества,  $P(0.2)$



## Присоединение крыла к фюзеляжу А350 (нижнее)

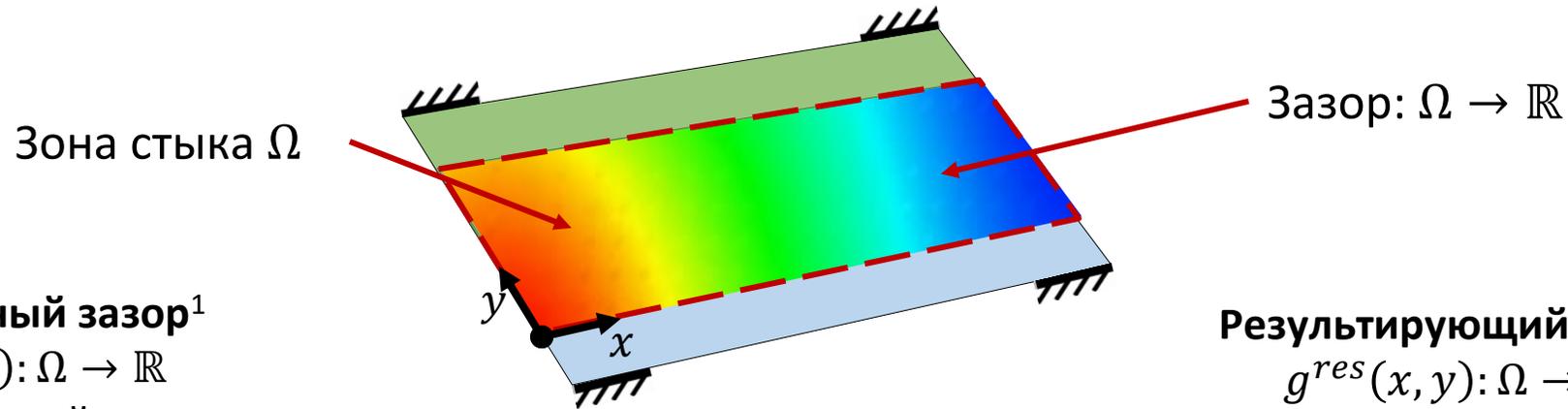
Задача: проанализировать качество соединения для нового процесса сборки



Статистические критерии качества

# Учет сборочных отклонений

**Зазор** между деталями – расстояние между точками поверхностей деталей в нормальном направлении к зоне возможного контакта (зоне стыка)  $\Omega \subset \mathbb{R}^2$  с локальной системой координат:

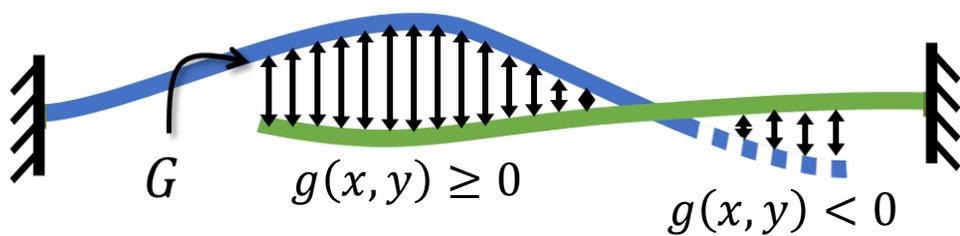


**Начальный зазор<sup>1</sup>**

$$g(x, y): \Omega \rightarrow \mathbb{R}$$

«виртуальный» зазор

без учета контактного взаимодействия



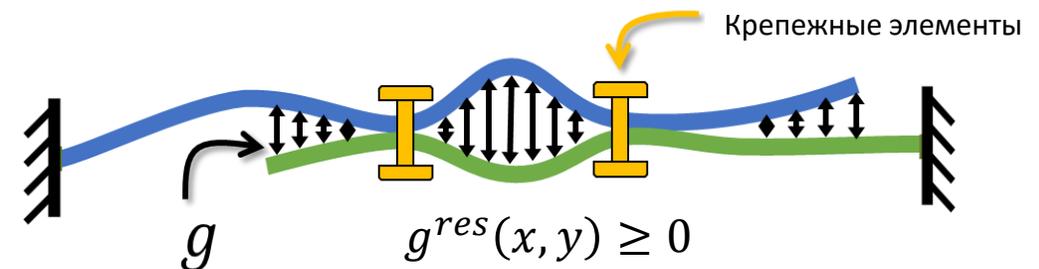
- Определяется независимыми отклонениями деталей
- Модуль определяет расстояние, а знак – расположение деталей без учета их взаимодействия

**Результирующий зазор**

$$g^{res}(x, y): \Omega \rightarrow \mathbb{R}$$

реальный зазор

с учетом контактного взаимодействия



- Вычисляется из решения контактной задачи<sup>2</sup>
- Характеризует качество сборки
- Имеет случайный характер

[1] Yastrebov, V. Computational contact mechanics: geometry, detection and numerical techniques, 2011.

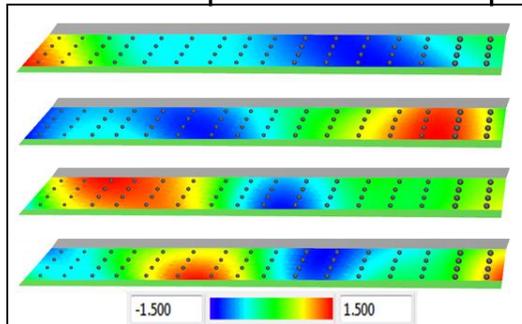
[2] Petukhova, M. et al. Numerical approach for airframe assembly simulation, 2014.



# Создание набора начальных зазоров

Если процедура измерения начального зазора не включена в технологический процесс или процесс сборки только разрабатывается, то набор доступных измерений может быть небольшим ( $\approx 10$  шт.)

Этап 1. Набор начальных зазоров



Методы моделирования отклонения поверхности детали:

- методы на основе случайных распределений [1]
- методы на основе разложения по набору некоторых режимов [2]

1. Schleich et al. *Skin model shapes: a new paradigm shift for geometric variations modelling in mechanical engineering*, 2014.

2. Samper *Modeling of 2D and 3D Assemblies Taking Into Account Form Errors of Plane Surfaces*, 2009.

# Метод 1: на основе случайного поля

Начальный зазор как сумма двух компонент:

$$g_{RF}(x, y) = \mu(x, y) + \xi(x, y)$$

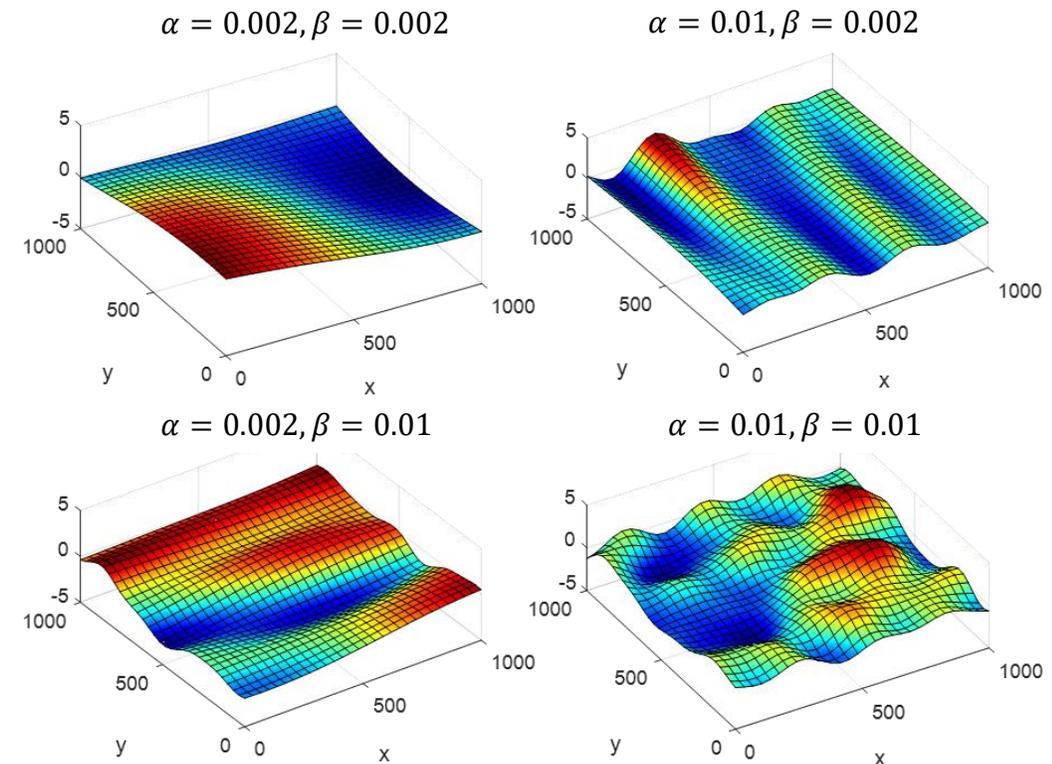
$\mu(x, y)$  – детерминированное скалярное поле, моделирует регулярную компоненту зазора

$\xi(x, y)$  – гауссово случайное поле, передает случайную компоненту зазора; однородное и анизотропное с нулевым средним, дисперсией  $\sigma^2$  и корреляционной функцией с параметрами  $(\alpha, \beta)$ :

$$\mathcal{K}(\vec{r}; \alpha, \beta) = \sigma^2 e^{-\alpha^2 r_x^2 / 2 - \beta^2 r_y^2 / 2}$$

$$r_x = |x_2 - x_1|, r_y = |y_2 - y_1|$$

Параметры модели:  $\mu(x, y), \sigma^2, \alpha, \beta$ .



Примеры реализаций случайного поля  $\xi(x, y)$  с разными параметрами  $(\alpha, \beta)$

# Метод 2: на основе собственных форм

Начального зазор в виде разложения в ряд по набору функций:

$$g_{MD}(x, y) = \sum_{k=1}^K \lambda_k e_k(x, y)$$

Набор собственных форм свободных колебаний деталей (из модального анализа МКЭ)

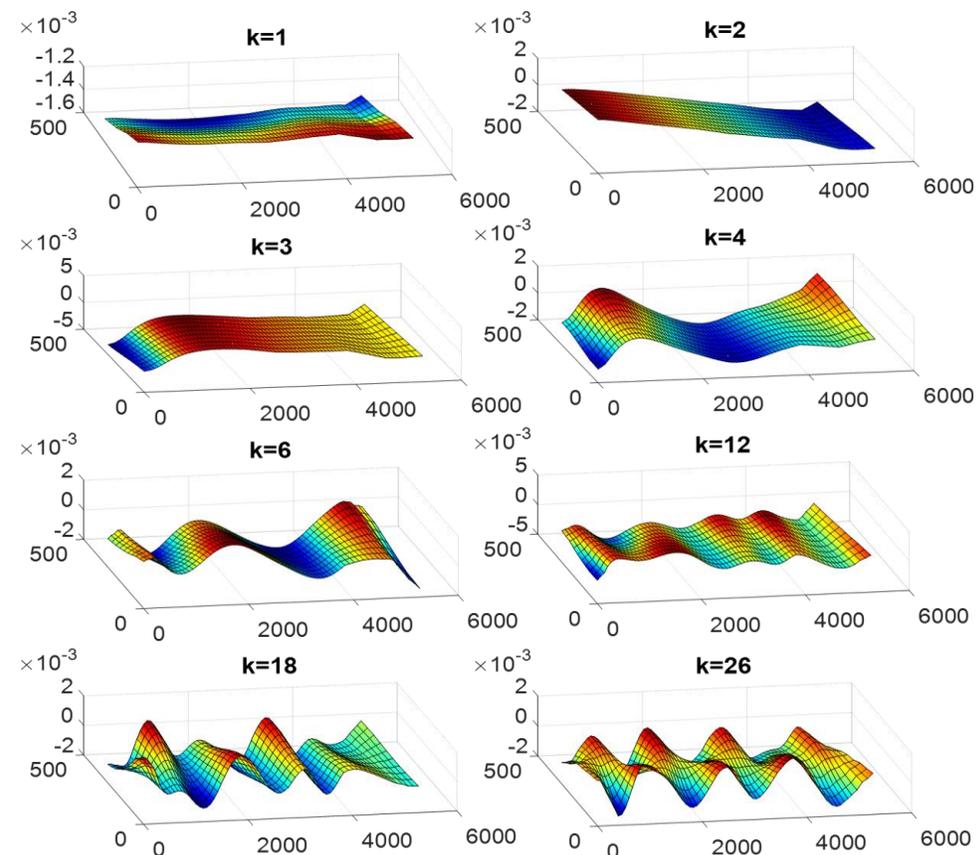


Набор **ортонормированных** функций в пространстве  $L^2(\Omega): \{e_1(x, y), e_2(x, y), \dots\}$

Параметры модели:

$K \in \mathbb{N}$  — число функций

$\vec{\lambda} \in \mathbb{R}^K$  — распределение случайного вектора коэффициентов



Ортонормированные функции (формы поведения зазора)  $e_k(x, y)$