



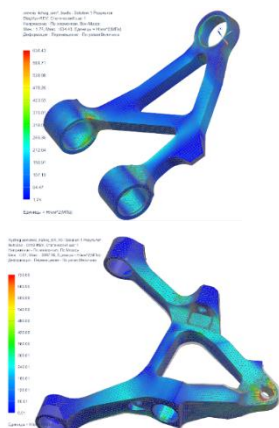
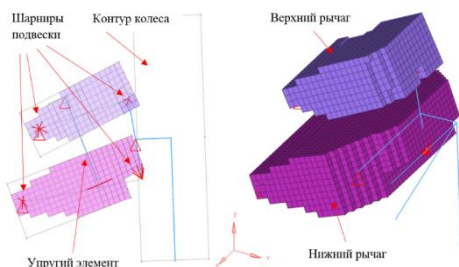
«БОЛЬШАЯ КРАСНАЯ КНОПКА 2: Возвращение»

Топологическая оптимизация конструкций

Топологическая оптимизация

Проектирование новых изделий,
исследование силовых схем

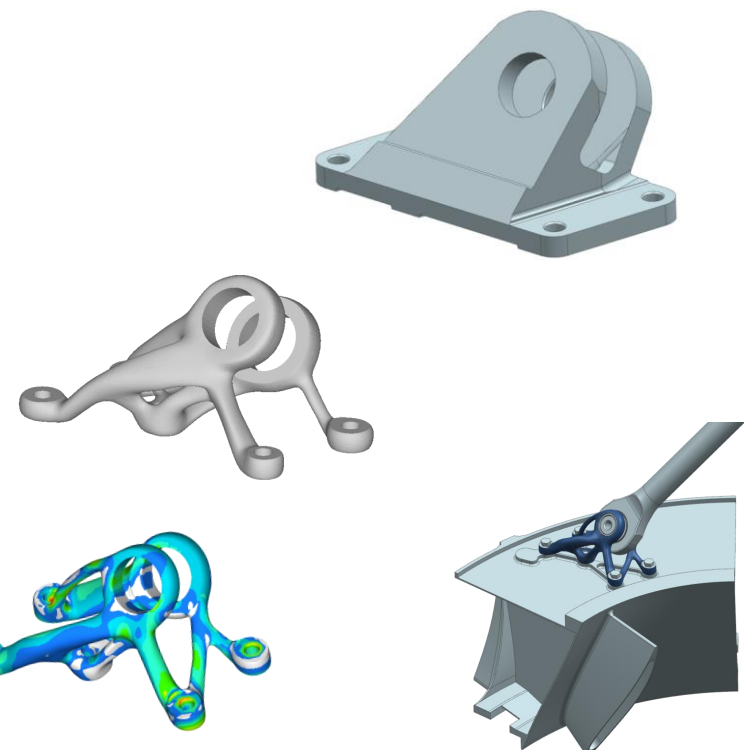
Оптимизация существующего
оборудования/работающих изделий



Определение области проектирования, постановки задачи, граничных и начальных условий

МКЭ, алгоритм оптимизации, пост-обработка результатов

Интерпретация результатов, конструкторская обработка, проверочные расчёты





**ALTAIR complex, crash relevant
vehicle front structure of a VW
CADDY I youngtimer**

<http://www.3iprint.de/en/>



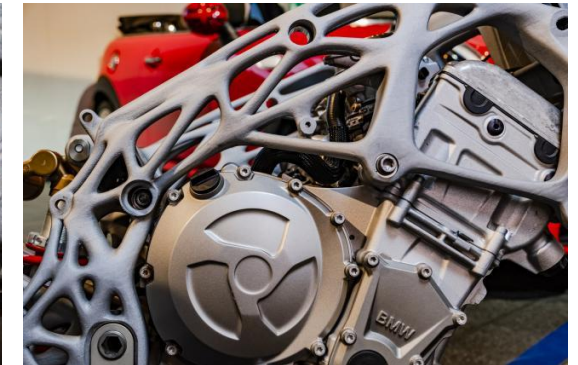
**AUTODESK (FUSION360)
PAX CHAIR FRAME**



<https://all3dp.com/skateboard-trucks-optimized-for-downhill-racing-with-metal-3d-printing/>

**BMW 3D PRINTED
S1000RR SPORT BIKE**

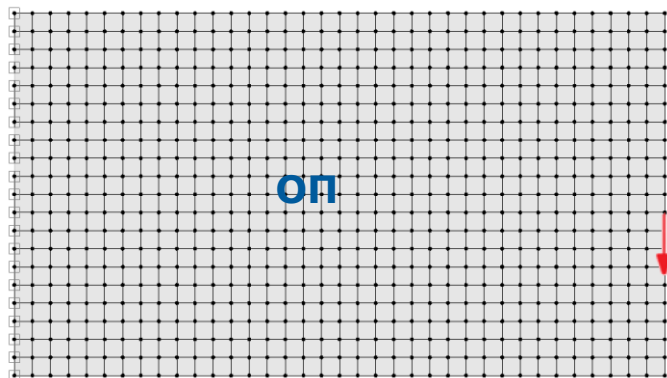
<https://3dprintingindustry.com/news/bmw-demos-3d-printed-s1000rr-sport-bike-following-12-3-million-investment-132331/>





Дискретная постановка задачи

Задача: найти такое распределение материала в области проектирования (ОП), чтобы целевая функция была минимальна при заданных ограничениях и нагрузках



$$C = \frac{N!}{(N-M)!M!}$$

$$N = 10, M = 5 \Rightarrow C = 252$$

$$N = 100, M = 50 \Rightarrow C = 10^{29}$$



$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{\rho} F(\rho) \\ \text{Г.У.:} \quad \sum_{i=1}^N v_i * \rho_i \leq f * V_0, \\ \quad \quad \quad \mathbf{K} * \mathbf{U} = \mathbf{F} \\ \rho_i = \begin{cases} 1, & \text{есть материал} \\ 0, & \text{нет материала} \end{cases} \end{array} \right.$$

Много вариантов решения даже для средних по размерности задач.
Для снижения ресурсоемкости используются градиентные методы решения.

Градиентная постановка задачи

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{\rho} \Phi(\rho) \\ \text{Г.У.:} \quad \sum_{i=1}^N v_i * \rho_i \leq f * V_0 \\ \quad \quad \quad \mathbf{K} * \mathbf{U} = \mathbf{F} \\ \quad \quad \quad 0 \leq \rho_e \leq 1 \end{array} \right.$$

Анализ чувствительностей:

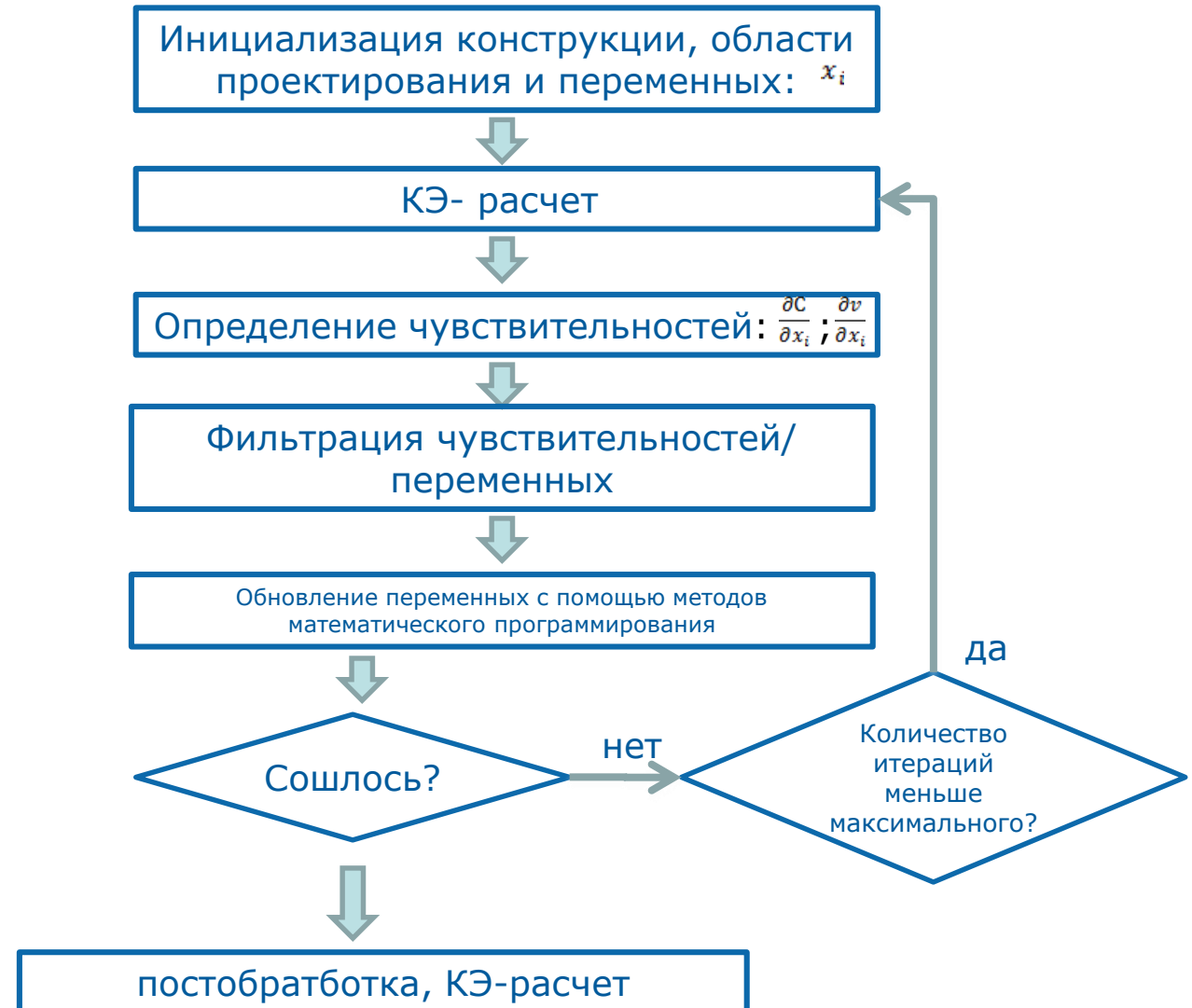
$$\frac{d\Phi}{d\rho_i} = \frac{\partial F}{\partial \rho_i} + \lambda^t * \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \rho_i} * U + \frac{\partial F}{\partial \rho_i} \right)$$

Постановка задачи

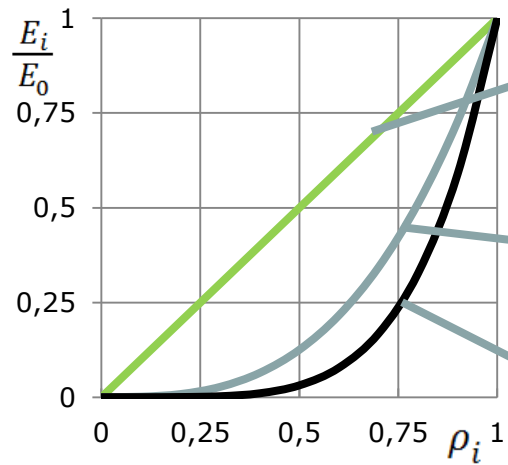
$$\left\{ \begin{array}{l} \min_x c(x) = U^T * K * U = \sum_{e=1}^N E_e(\rho_i) * u_e^t * k_0 * u_e \\ \text{Г.У.: } \sum_{i=1}^N v_i * \rho_i \leq f * V_0 \\ K * U = F \\ 0 \leq \rho_i \leq 1 \end{array} \right.$$

Задача: минимизация податливости конструкции при заданном конечном объеме.

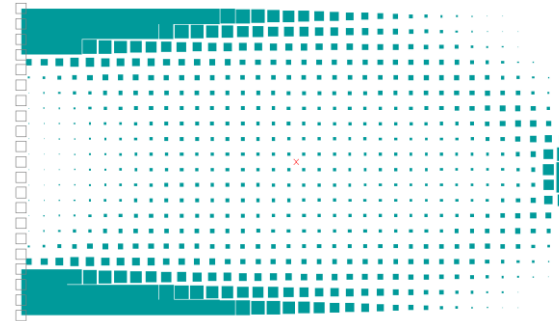
Каждому элементу присваивается значение плотности ρ , которое определяет его вклад, в общую жесткость.



$$E_i = \rho_i^p(E_0)$$

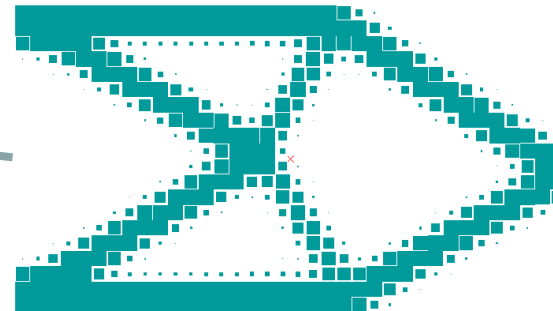


Для того, чтобы было нерационально оставлять элементы с промежуточной плотностью, их жесткость зависит от плотности по степенному закону.



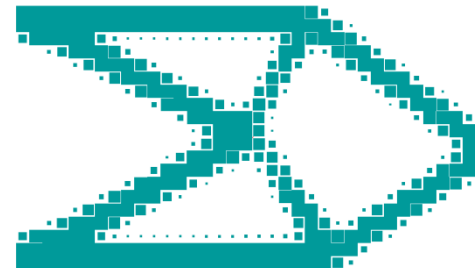
$p=1$

Размытые границы



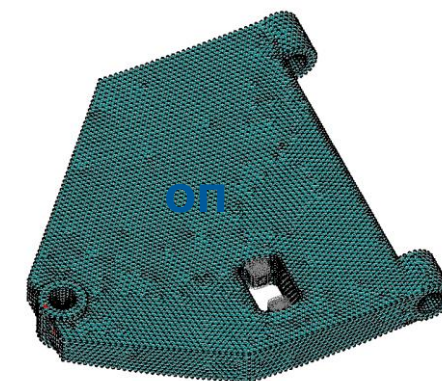
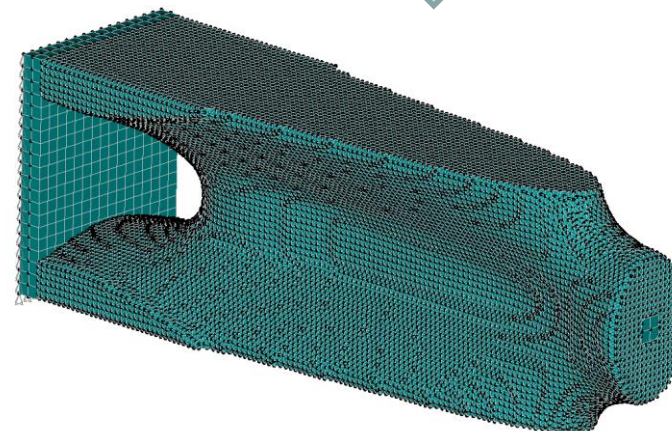
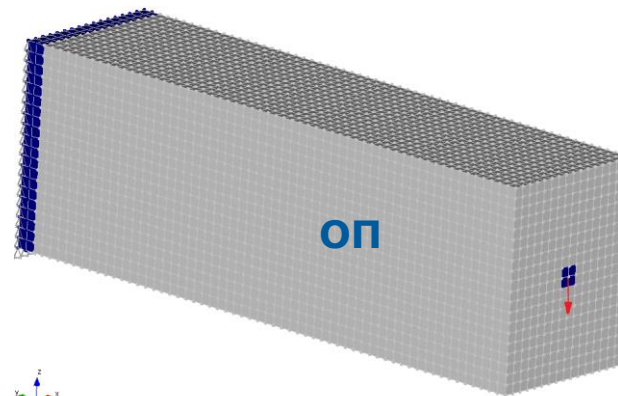
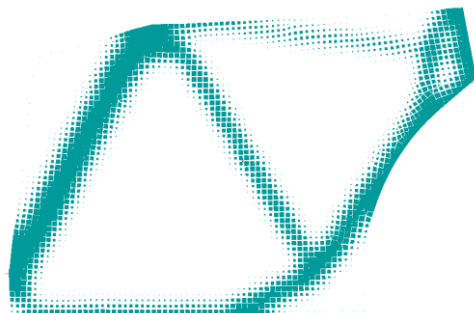
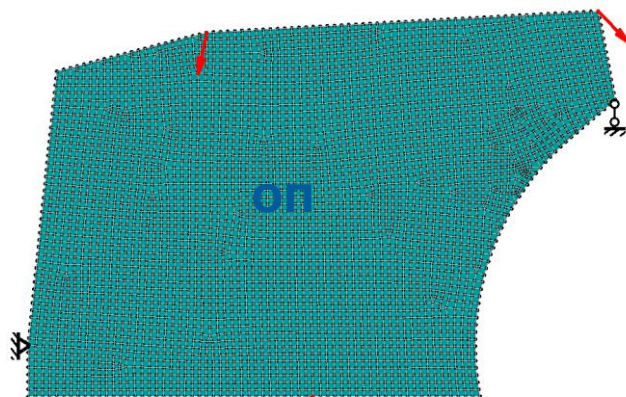
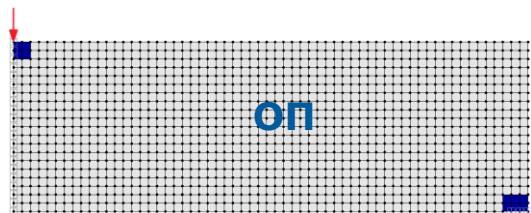
$p=3$

Оптимальный вариант

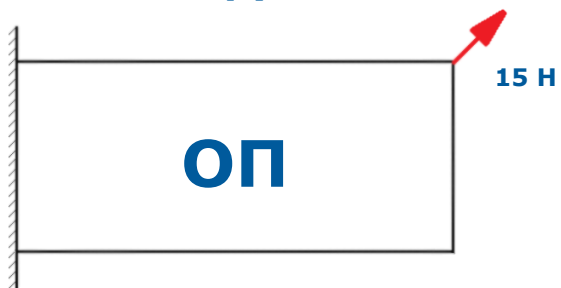


$p=5$

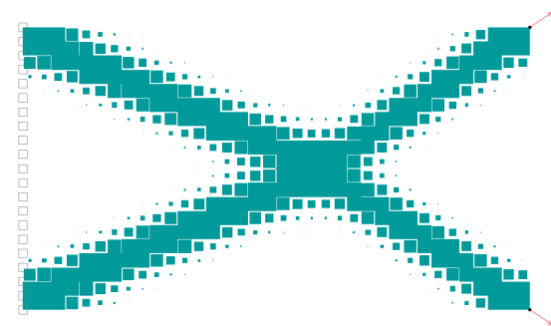
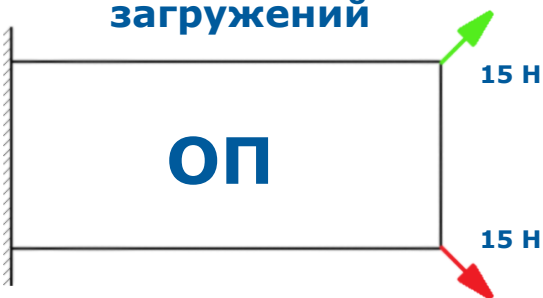
Самые резкие границы, но сложно добиться сходимости



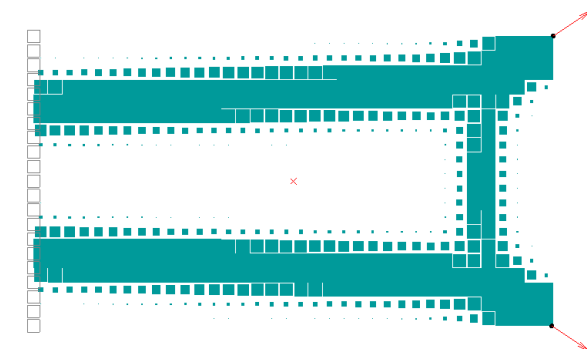
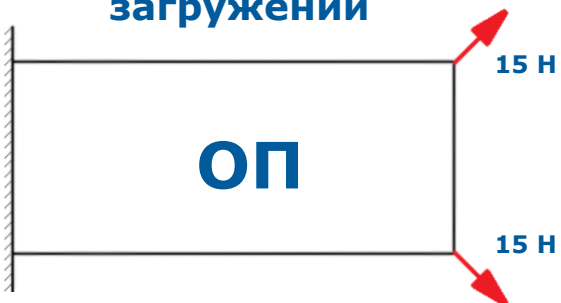
одно загрузение



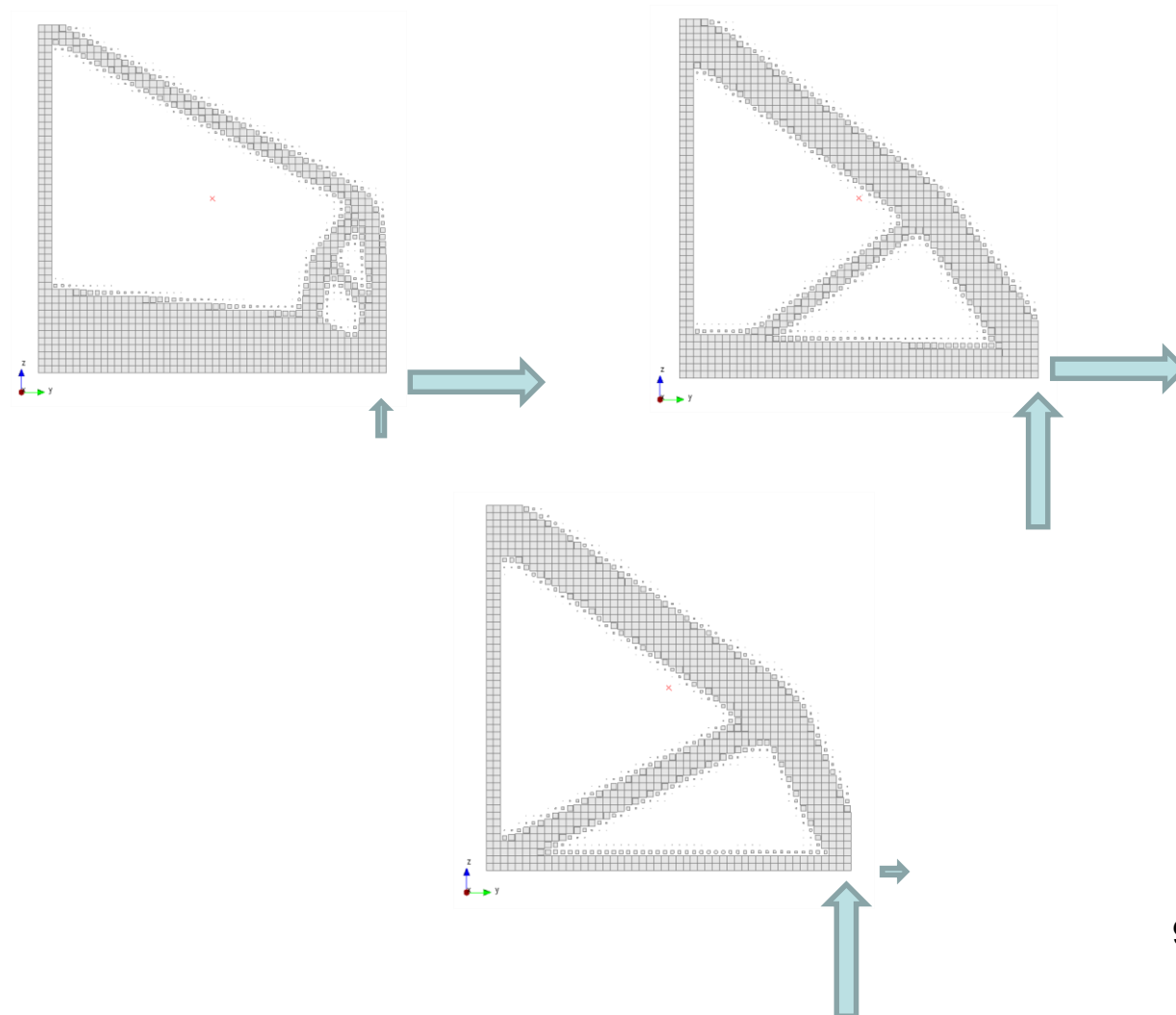
одно из двух загрузений



комбинация загрузений



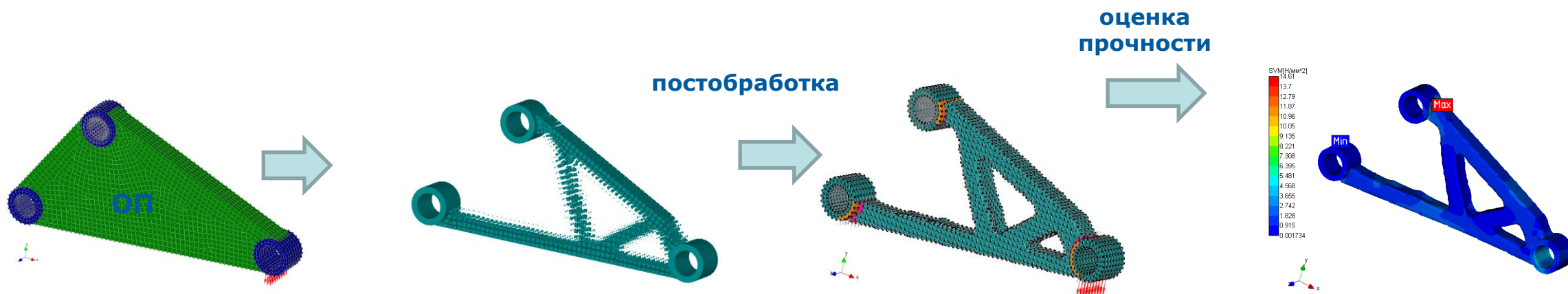
одно из двух загрузений



ТО без неизменяемых элементов

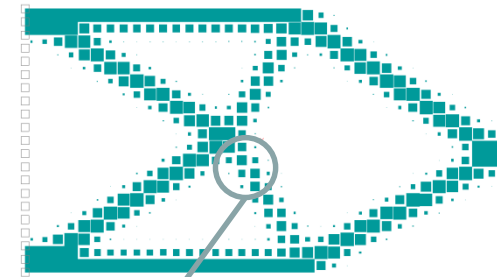


ТО с неизменяемыми элементами

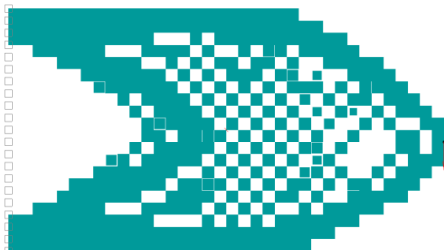


Фильтрация чувствительностей

$$\frac{d\hat{\Phi}}{d\rho_i} = \frac{\sum_{f=1}^N \hat{H}_f * \rho_f * \frac{d\Phi}{d\rho_f}}{\rho_f * \sum_{f=1}^N \hat{H}_f}$$

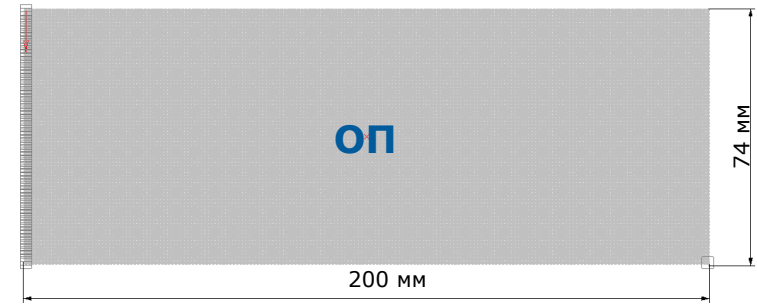


Проблема «шахматной доски»

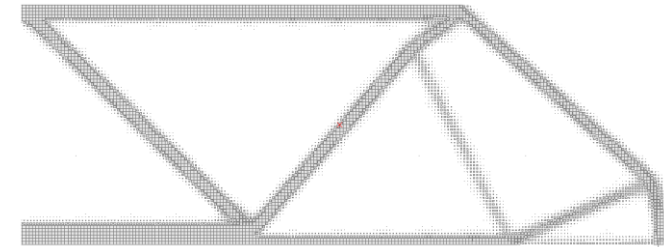


Фильтрация плотностей

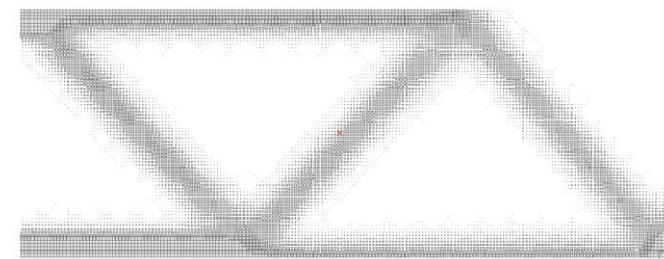
$$E_i = \hat{\rho}_i^p(E_0) \quad \hat{\rho}_e = \frac{\sum_{f=1}^N \hat{H}_{e,f} * \rho_f}{\sum_{f=1}^N \hat{H}_{e,f}}$$



$R_{\min}=3$

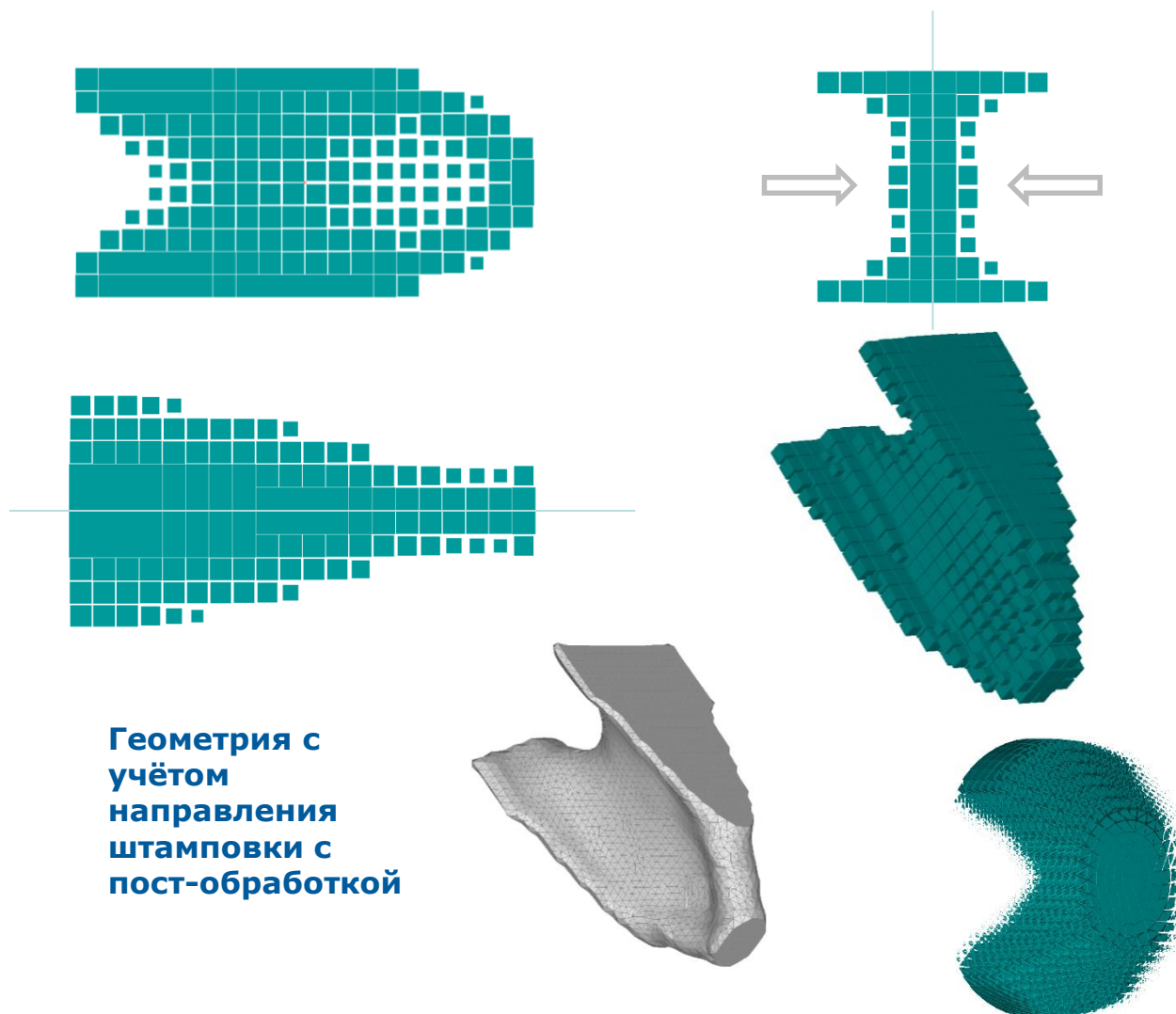
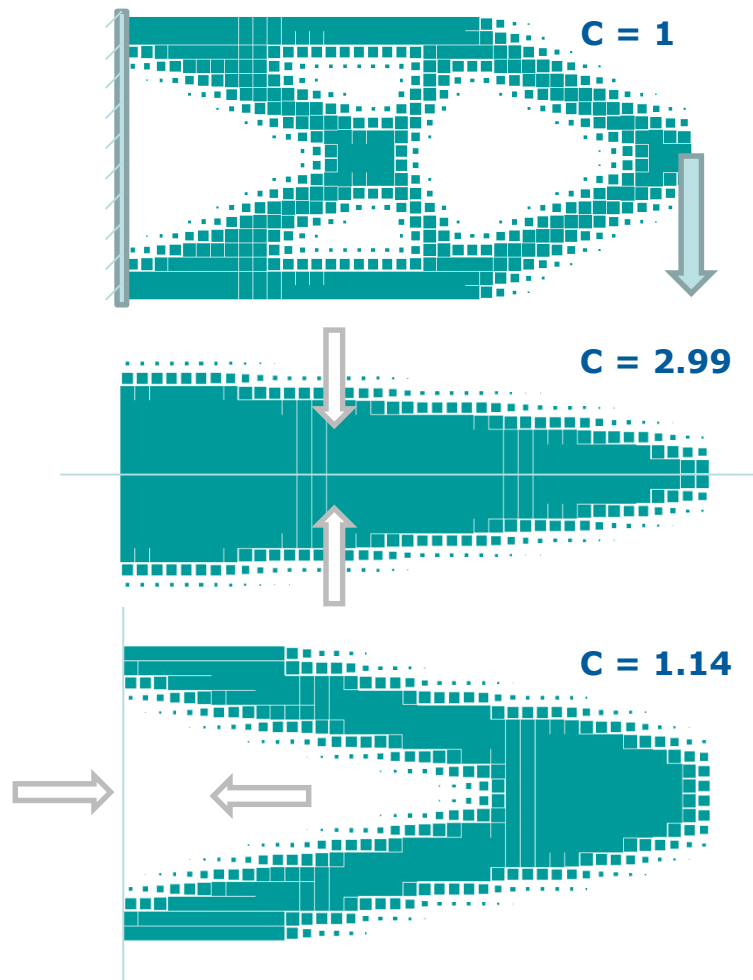


$R_{\min}=6$

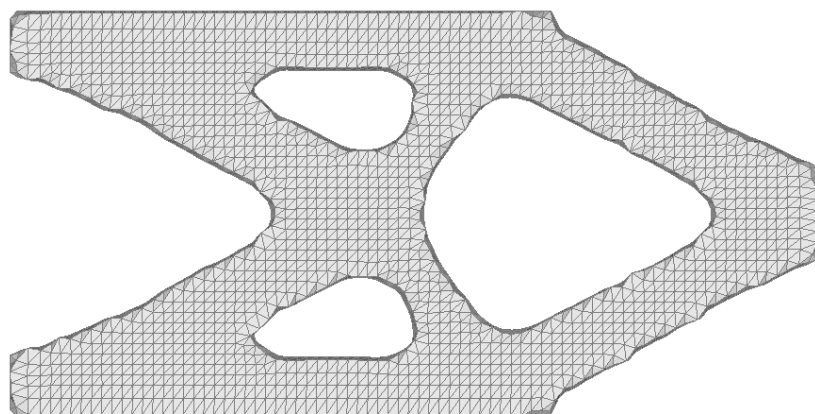
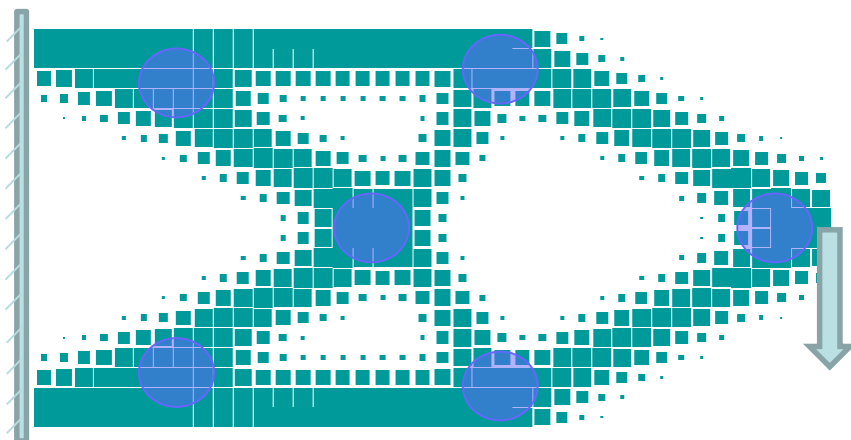


Такая структура не является оптимальной и её невозможно интерпретировать

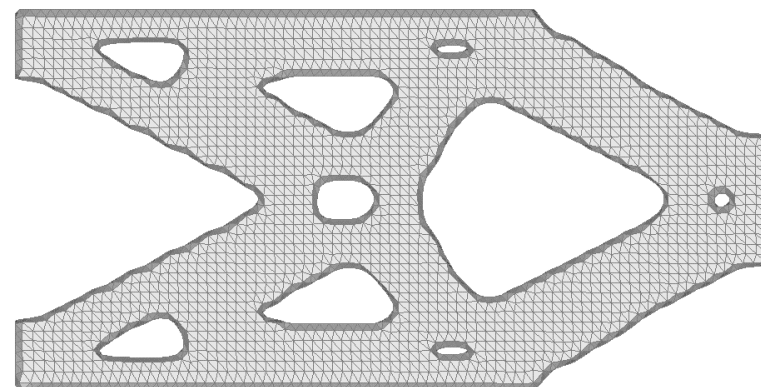
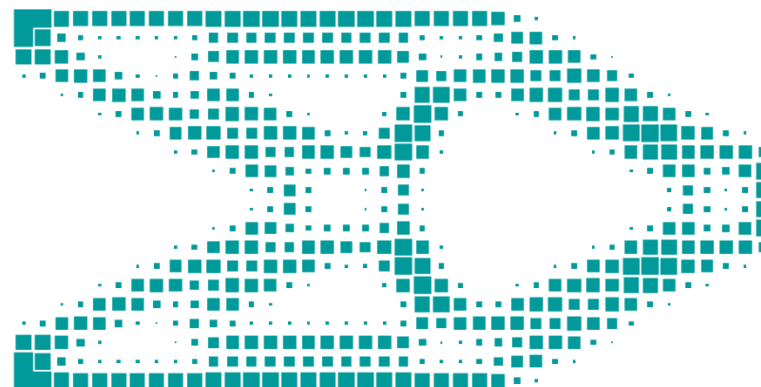
Исходная задача без
ограничений

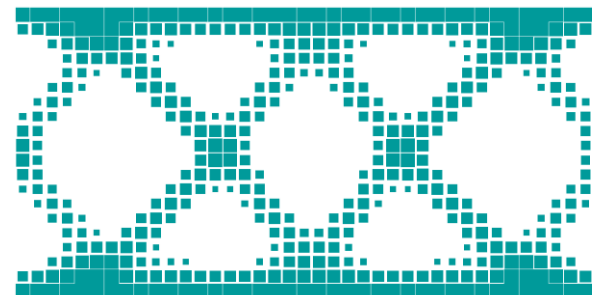
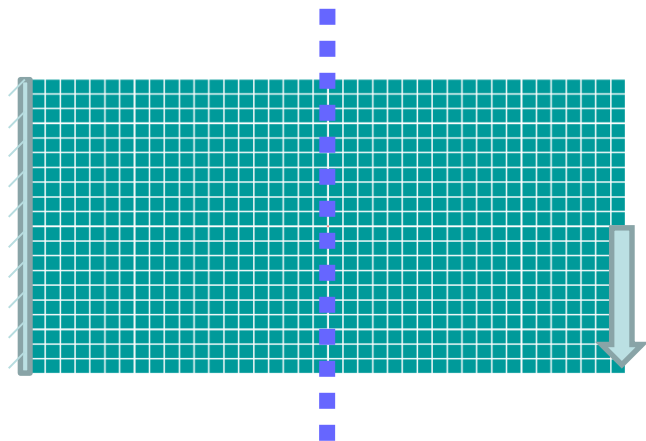


Исходная задача
без ограничений



$R_{\max} = 2.1 \text{ мм}$





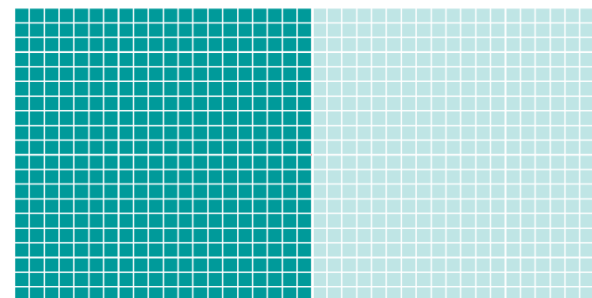
ПРИМЕНЕНИЯ:

для задач с симметричным решением:

- уменьшение числа проектных переменных
- гарантия симметрии

для задач с несимметричным решением:

- возможность сделать его симметричным



Управляющий параметр:
пороговое значение ОД - задает границу поверхности равных плотностей. Все точки с большей ОД будут лежать внутри поверхности, с меньшей ОД – снаружи.



0.1

Управляющий параметр:
шаг дискретизации - определяет размер ячейки новой поверхностной сетки, и, как следствие, размер элементов на поверхности объемной сетки



3.0 мм

Оптимальные значения



0.5



1.2 мм



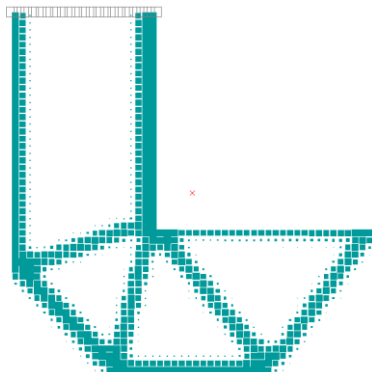
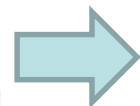
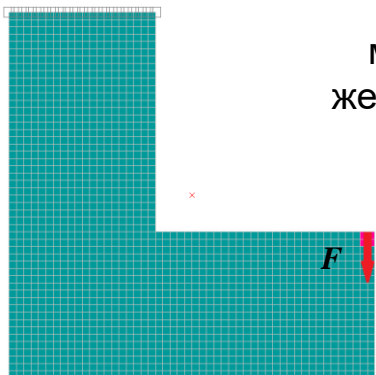
0.9



0.5 мм

Постановка задачи

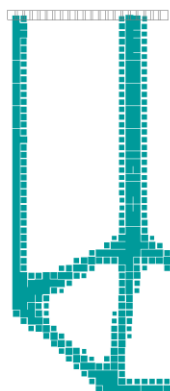
макс.
жесткость



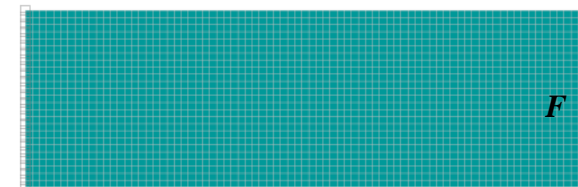
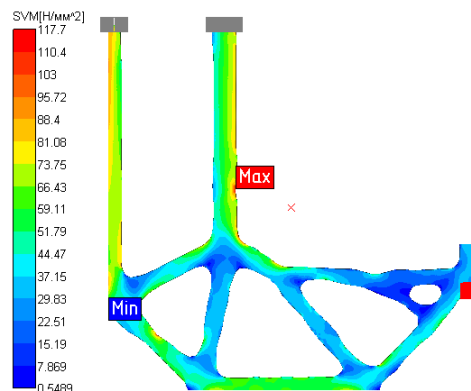
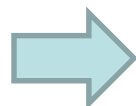
$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^N m_i(\rho_i) \\ \sigma_j^{\text{gp}} < \sigma_{\text{доп}}, \quad j = 1..k \\ 0 < \rho_i < 1, \quad i = 1..N \end{cases}$$

$$\sigma_j^{\text{gp}} = \sum_{l=1}^{n_j} ((\sigma_l^{\text{SVM}})^P)^{\frac{1}{P}}$$

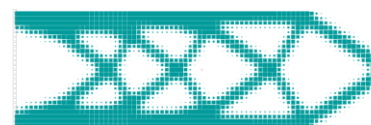
$\sigma_{\text{доп}} = 117,5 \text{ МПа}$



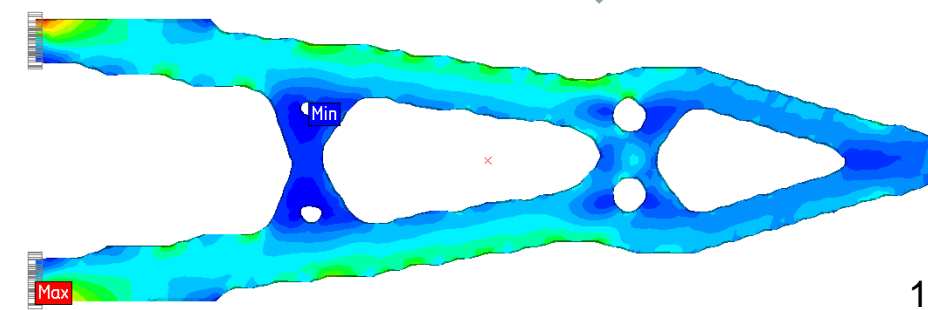
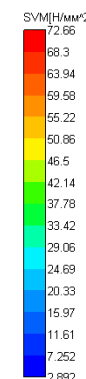
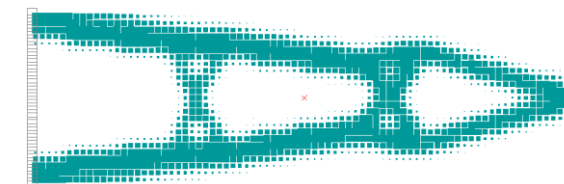
постобработка,
анализ



макс.
жесткость

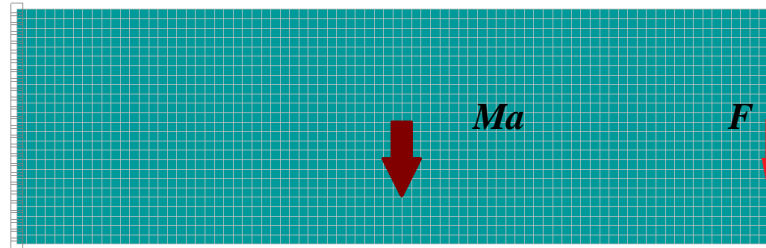


$\sigma_{\text{доп}} = 78,3 \text{ МПа}$



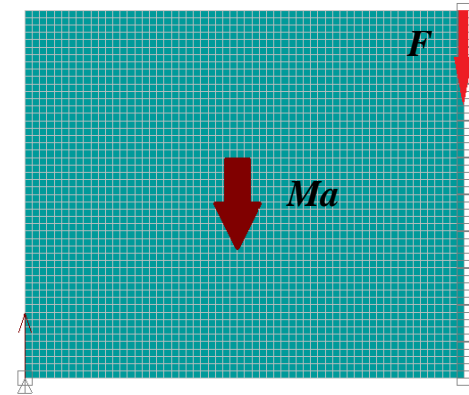
Постановка задачи (макс. жесткости):

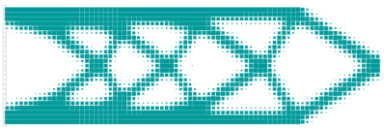
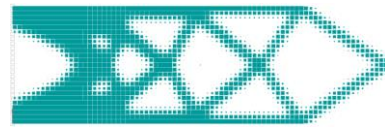
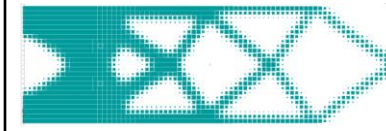
$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \mathbf{u}_i^T \mathbf{k}_i(\rho_i) \mathbf{u}_i \\ \sum_{i=1}^N v_i(\rho_i) = V_0 \\ \mathbf{K}(\boldsymbol{\rho}) * \mathbf{u} = \mathbf{F}(\boldsymbol{\rho}) \\ 0 < \rho_i < 1, \quad i = 1..N \end{cases}$$

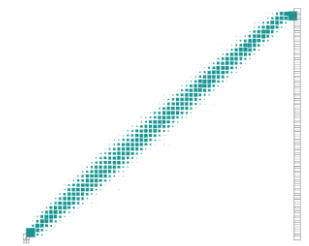
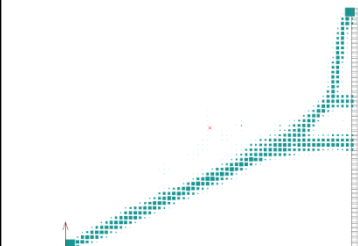


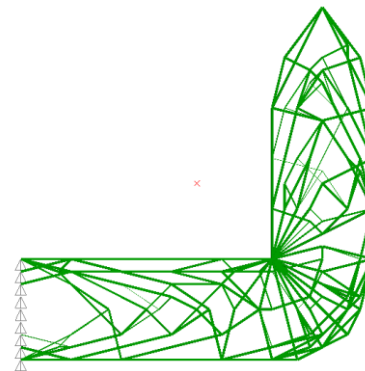
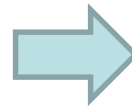
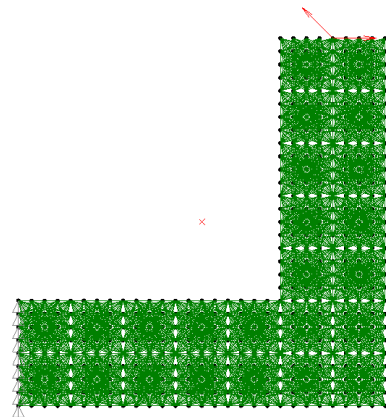
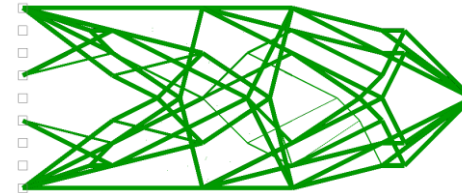
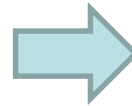
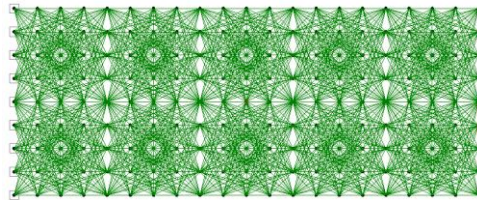
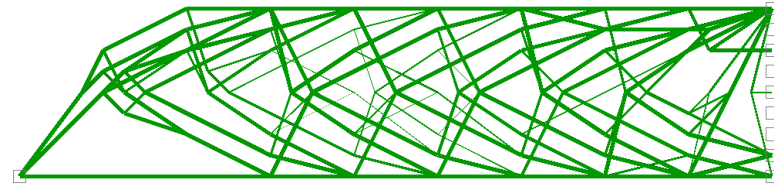
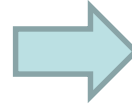
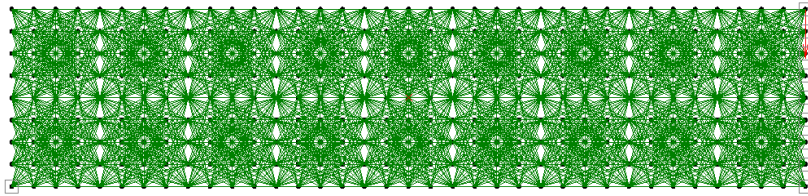
Постановка задачи (мин. массы):

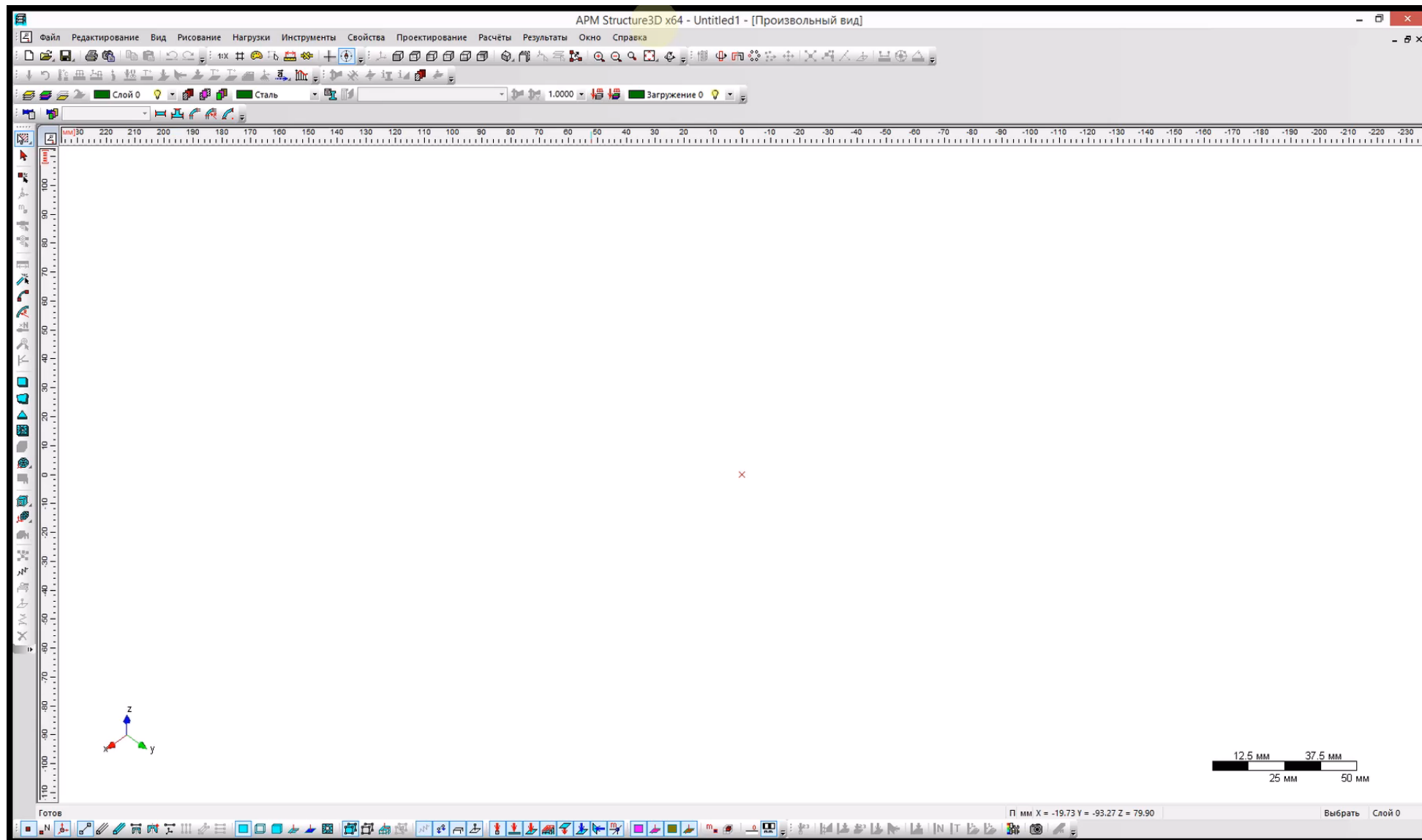
$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^N m_i(\rho_i) \\ \sigma_j^{\text{gp}} < \sigma_{\text{доп}}, \quad j = 1..k \\ \mathbf{K}(\boldsymbol{\rho}) * \mathbf{u} = \mathbf{F}(\boldsymbol{\rho}) \\ 0 < \rho_i < 1, \quad i = 1..N \end{cases}$$

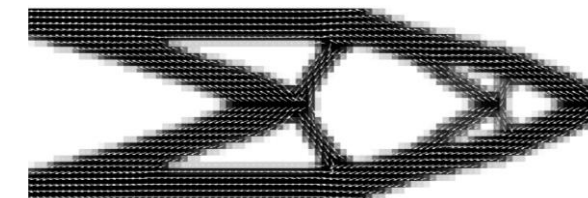
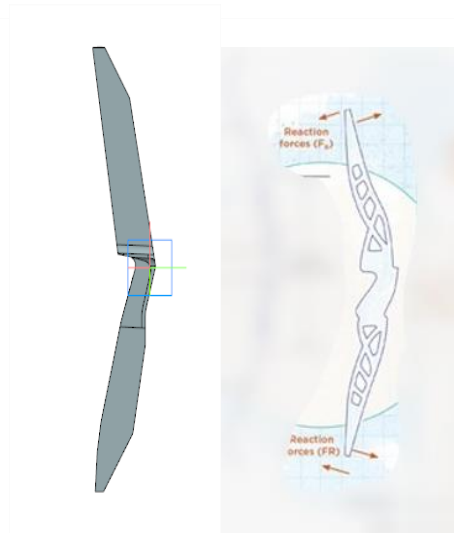


	$\sum_{i=1}^N m_i(\rho_i) a_i = 0$	$\sum_{i=1}^N m_i(\rho_i) a_i = F$	$\sum_{i=1}^N m_i(\rho_i) a_i = 4F$
Конструкция			

	$\sum_{i=1}^N m_i(\rho_i) a_i = 0$	$\sum_{i=1}^N m_i(\rho_i) a_i = F$
Конструкция		



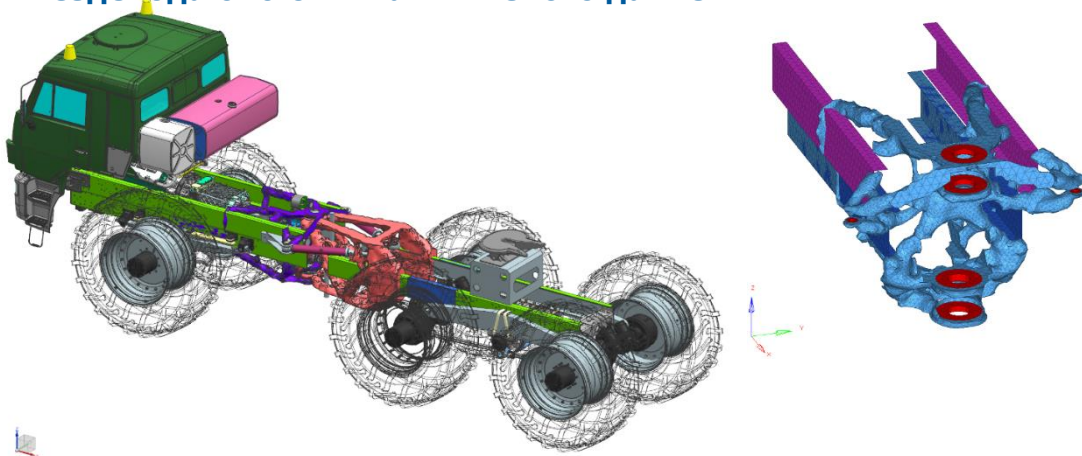




Сочлененная рама вездехода 6х6

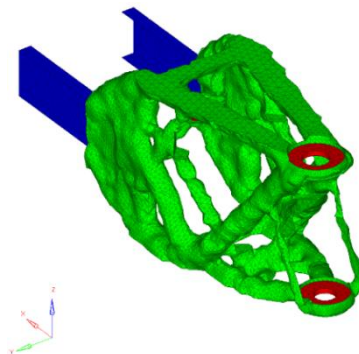
Узел в компоновке несущей системы вездехода 6х6 с шинами низкого давления

Передний силовой узел



Виртуальный автомобиль: (нагрузки)

Задний силовой узел



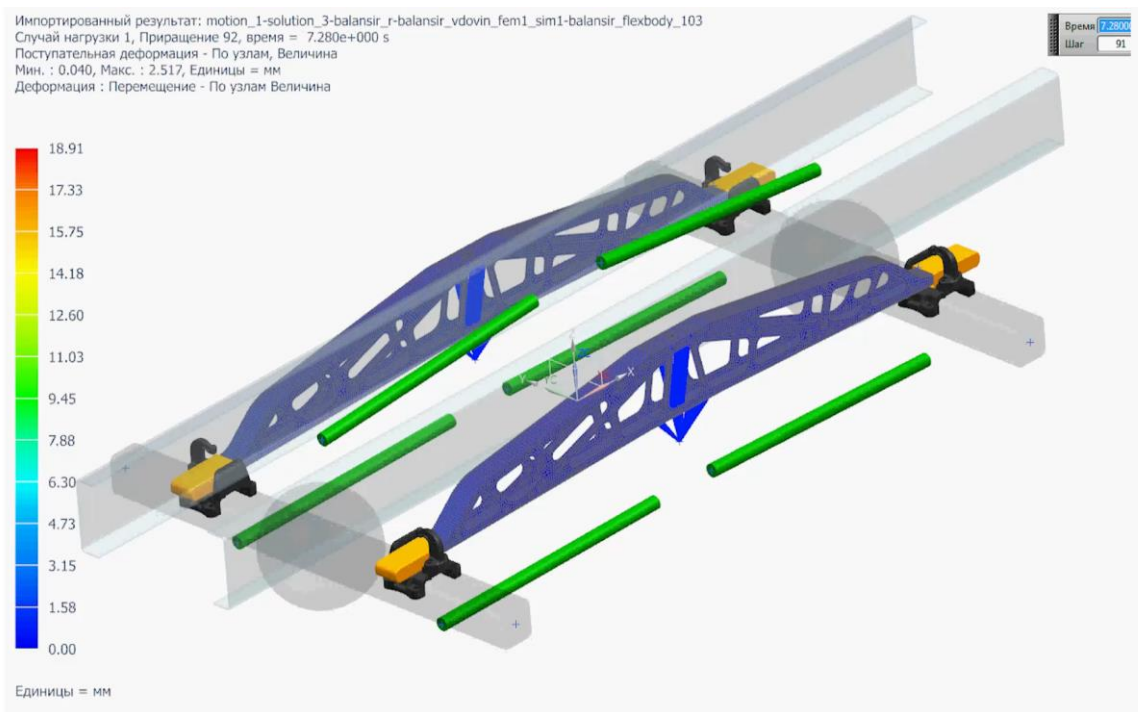
Сочлененная рама вездехода 6х6



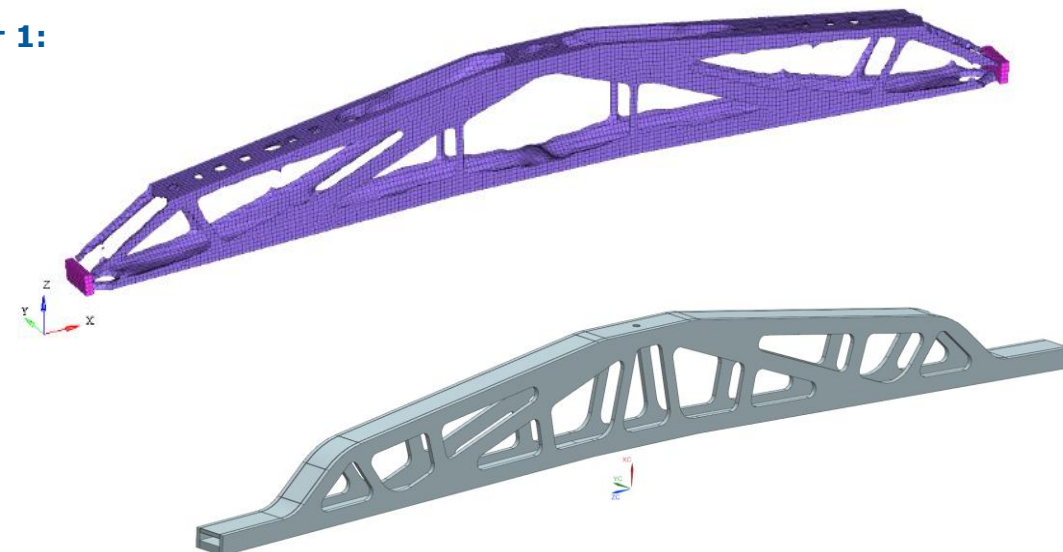
Балансир подвески вездехода 6x6

Силовая схема балансира подвески

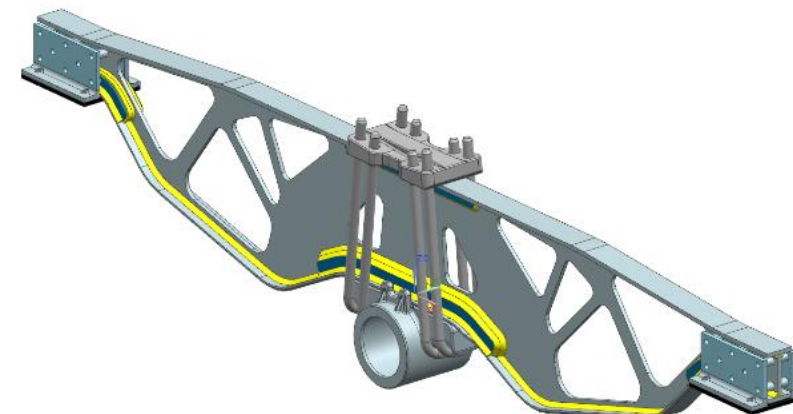
Виртуальный стенд для расчета нагрузок на заднюю балансирующую подвеску



Вариант 1:



Вариант 2:



Балансир подвески вездехода 6х6

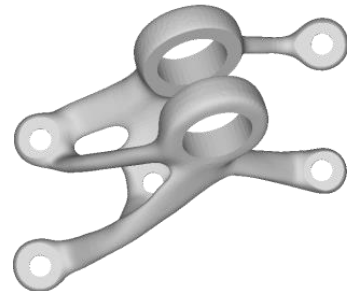
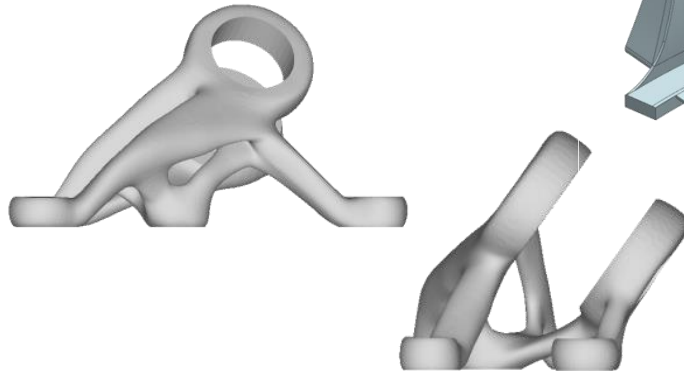
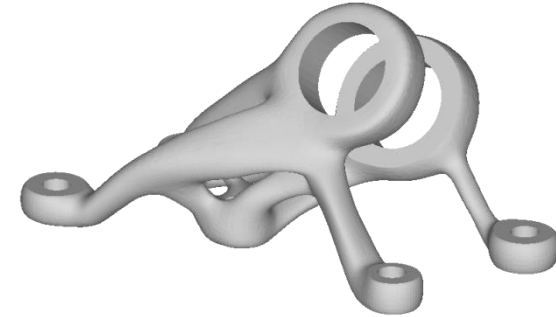


ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРОНШТЕЙНА ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

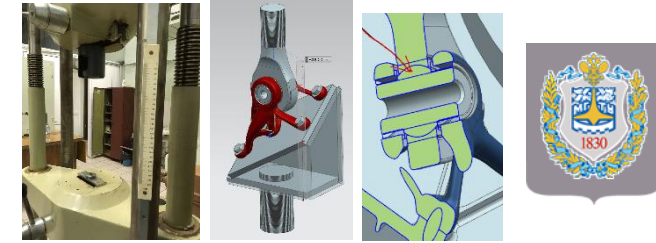


Количество элементов: 180170
Количество узлов: 110610

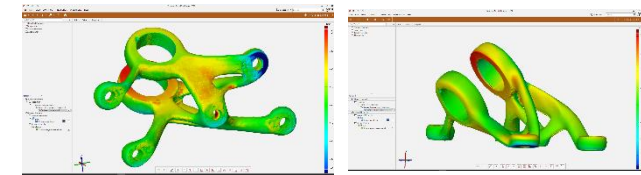
Результат оптимизации



Деталь в составе компоновки



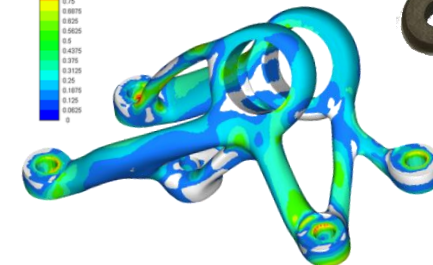
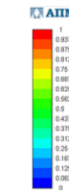
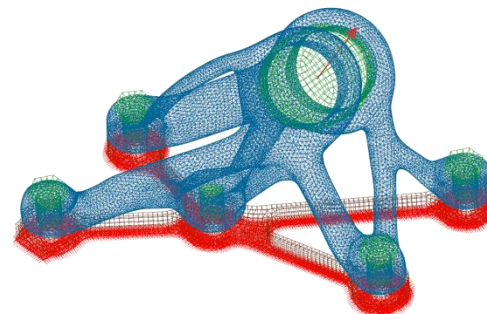
RANGE vision



В результате оптимизации:

1. **Масса конструкции снижена на 69,8%**
(с 3,03 кг до 0,92 кг)
2. **Конструкция выдерживает максимальные нагрузки** с минимальным запасом прочности $n=1,069$.
3. Нелинейный расчет при сжатии показал **отсутствие потери устойчивости** элементов конструкции кронштейна при сжатии.
4. Действующие напряжения порядка предела прочности титана ВТ-6, **рекомендуется применить титан в качестве конструкционного материала**, тем самым снизить массу еще в 1,4 раза без потери прочности.

Проверочный расчет





Спасибо за внимание!

**Компания НТЦ «АПМ»
(научно-технический центр)
Московская область, г. Королев
Октябрьский бульвар, д. 14, офис 6
Тел.: (498) 600-25-10, (495) 514-84-19
Internet: [www. apm.ru](http://www.apm.ru), www.cae.apm.ru
E-mail: com@apm.ru**