



Российские САЕ-системы на службе промышленности²⁰²⁰

Топологическая оптимизация – большая красная кнопка или новое направление развития в области прочностного анализа?

Прокопов Владимир

Руководитель отдела прочностных расчетов

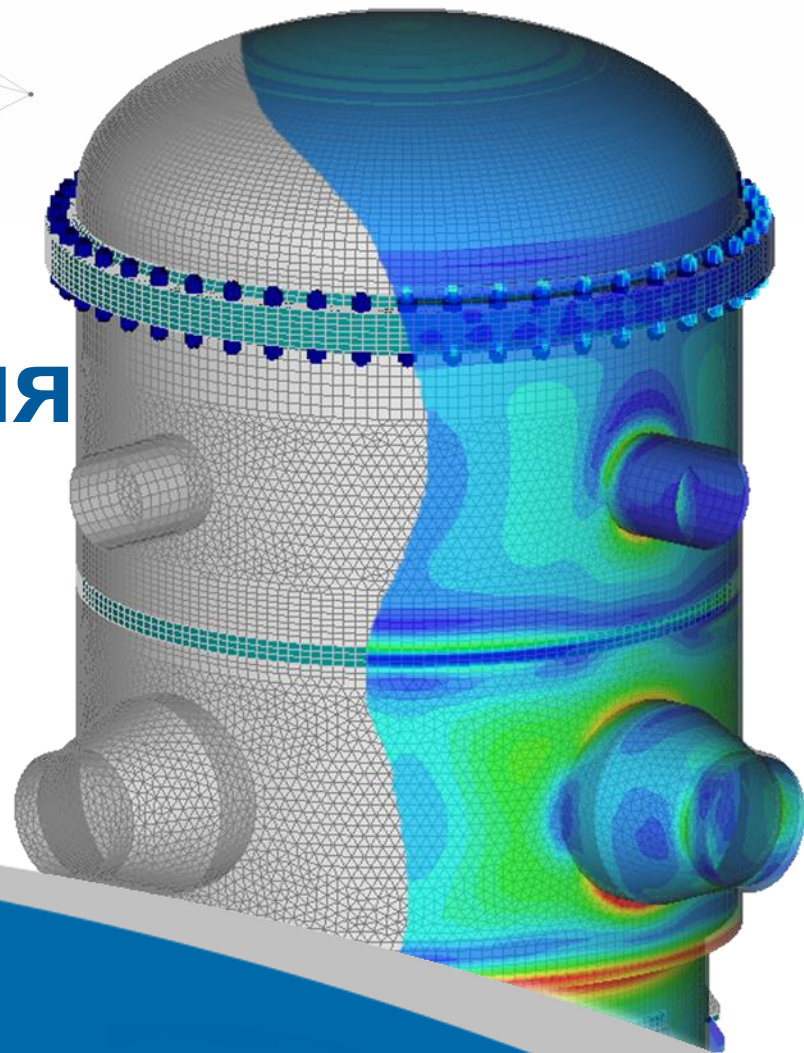


НТЦ «АПМ» - ведущий разработчик ПО для инженерных расчетов



Топологическая оптимизация

Что это? Актуальность. Технология.





Цели и задачи

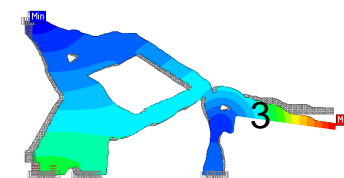
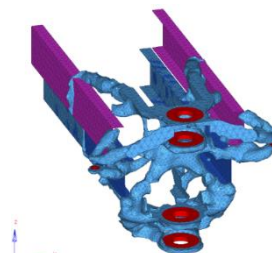
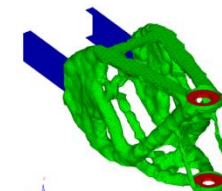
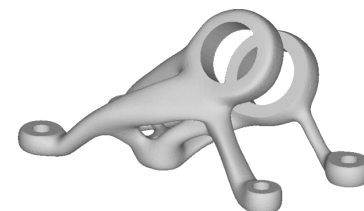
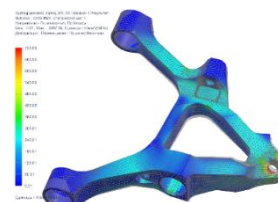
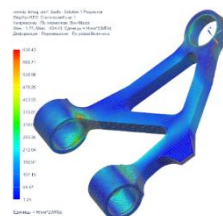
- Проектирование оптимальных конструкций с учетом новых и развитием существующих производственных и вычислительных технологий
- Повышение энергоэффективности полного жизненного цикла изделия
- Обеспечение конкурентоспособности проектируемой и изготавливаемой продукции

Задачи:

- Получить силовую схему (силовые линии) принципиально нового изделия
- Определить резервы по облегчению существующего изделия
- Увидеть потенциальные варианты упрощения конструкции:
сложная сборка -> в единая деталь
сложная деталь -> в простую сборку

Решение:

- ✓ Облик/очертания новой или оптимизированной детали



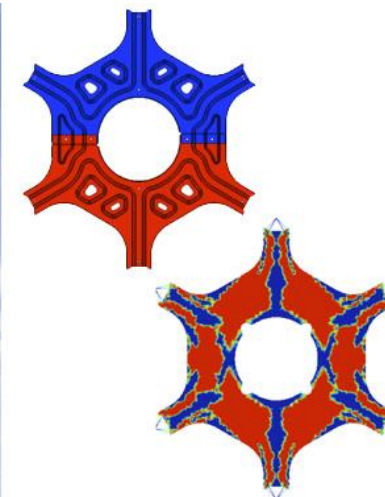
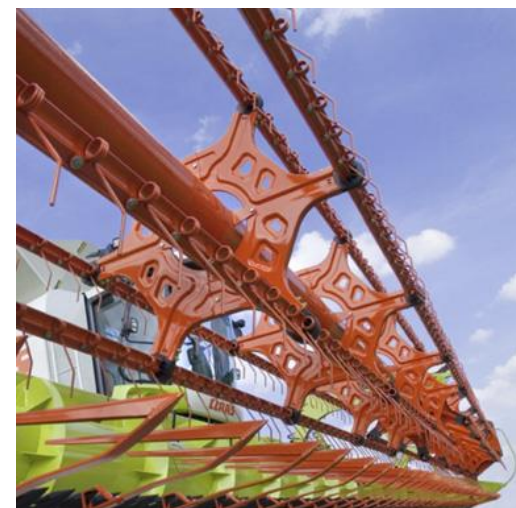


Мировая практика



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

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



<https://altairhyperworks.com/industry/Heavy-Industry-Off-Highway>



**BMW 3D PRINTED
S1000RR SPORT BIKE**

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

<https://www.assemblymag.com/articles/94984-generative-design-software-is-transforming-the-design-process>

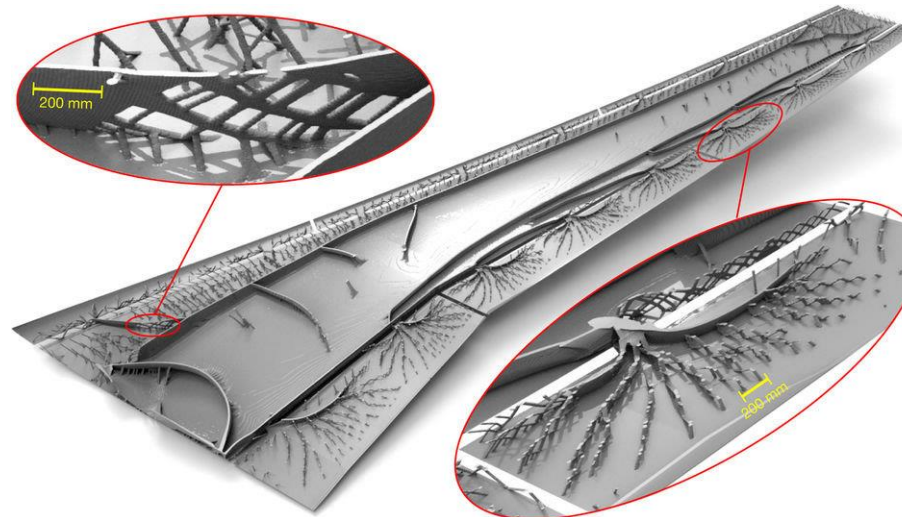




Мировая практика



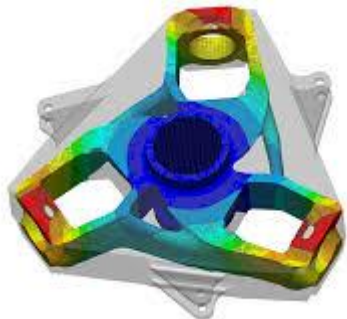
<http://parametricju.org/2018/06/11/topology-optimization-minimal-surfaces/>



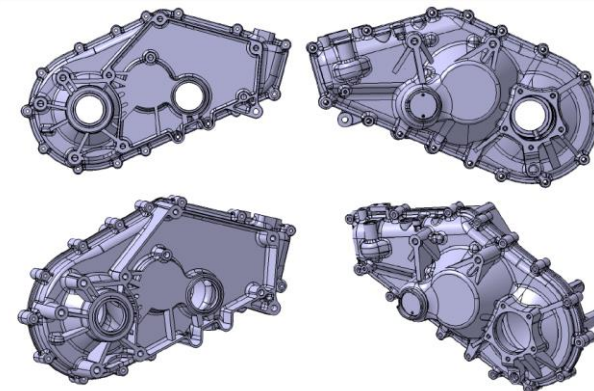
<http://www.topopt.mek.dtu.dk>
<https://techxplore.com/news/2017-10-supercomputer-tool-optimize-airplane-wing.html>



<https://www.altair.com/customer-story/zaha-hadid-3d-printed-chair>



<https://www.ansys.com/blog/topology-optimization-weight-automotive-design>

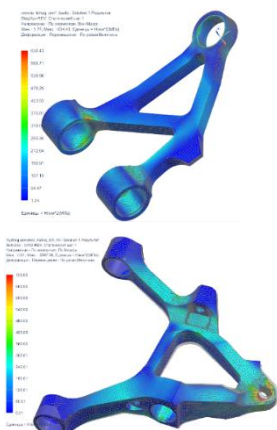
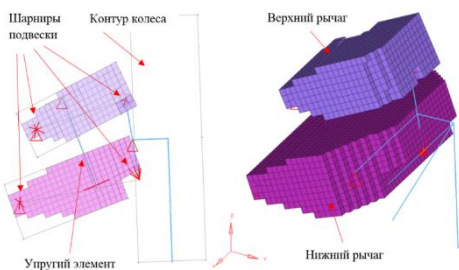


Master of Science Thesis
 TRITA-ITM-EX 2018:724
 KTH Industrial Engineering and
 Management
 Machine Design
 SE-100 44 STOCKHOLM



Направления использования

Проектирование новых изделий, исследование силовых схем

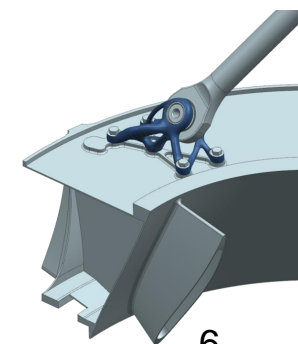
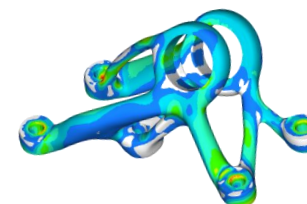
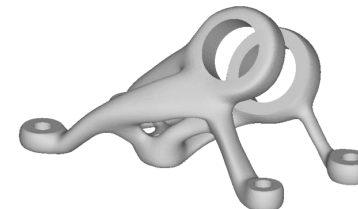
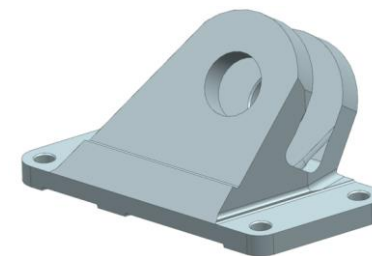


Оптимизация существующего оборудования/работающих изделий

Определение области проектирования, постановки задачи, граничных и начальных условий

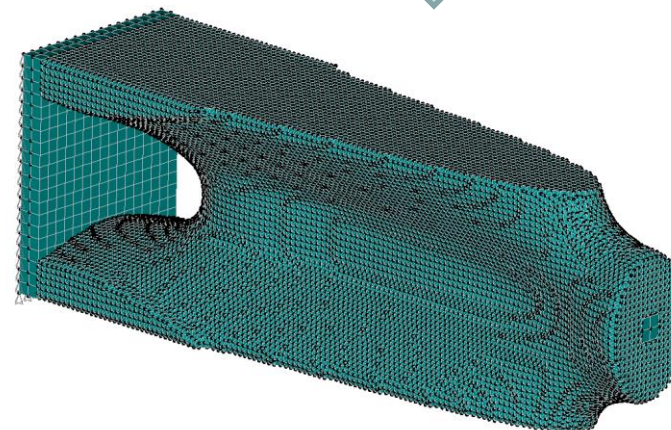
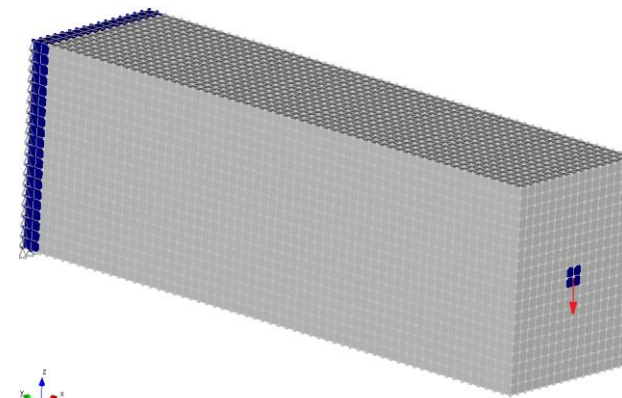
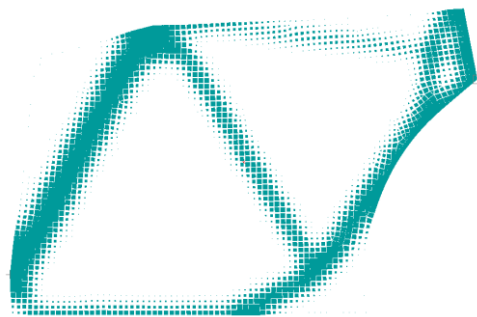
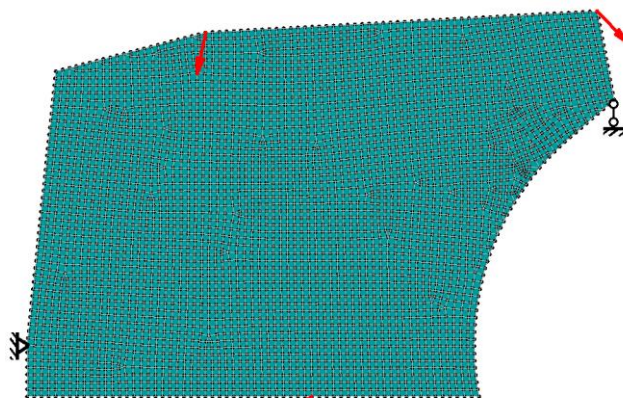
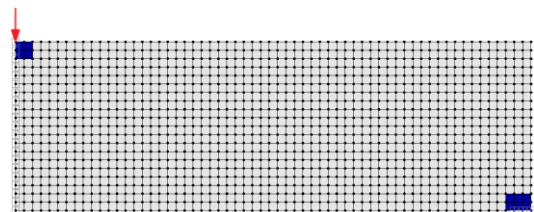
МКЭ, алгоритм оптимизации, пост-обработка результатов

Интерпретация результатов, конструкторская обработка, проверочные расчёты



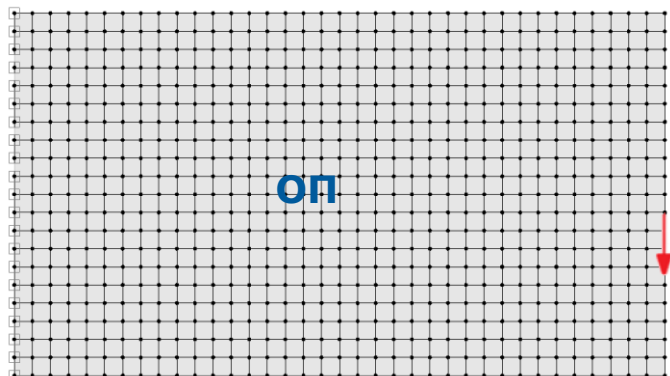


Классические задачи





Дискретная постановка задачи



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

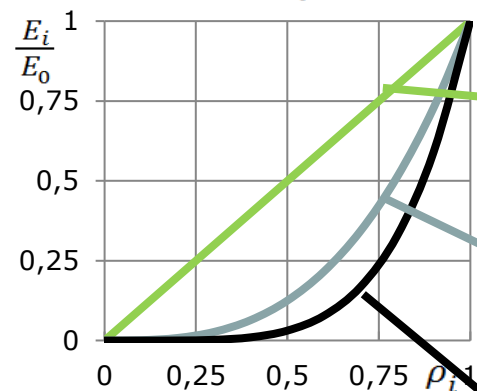
Технология





Технология

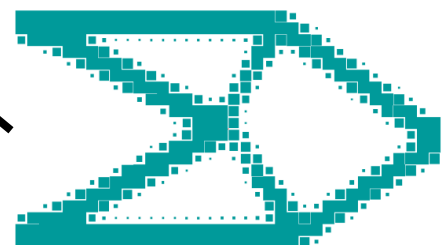
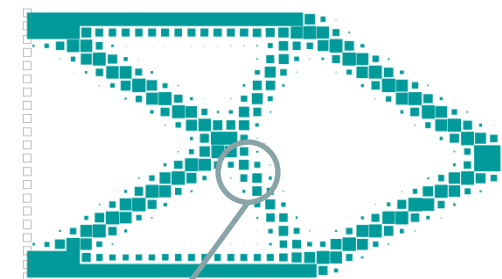
$$E_i = \rho_i^p(E_0)$$



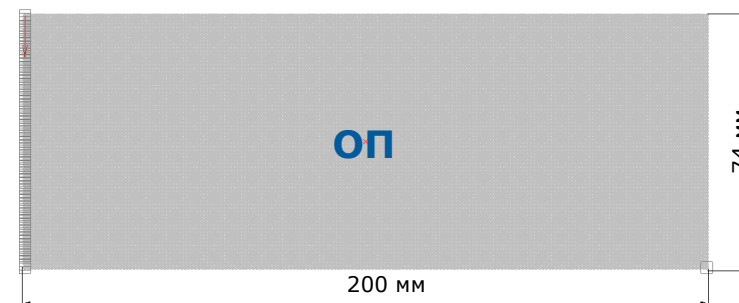
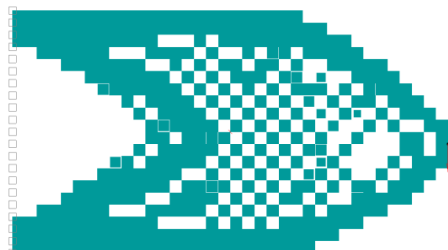
$p=1$

$p=3$

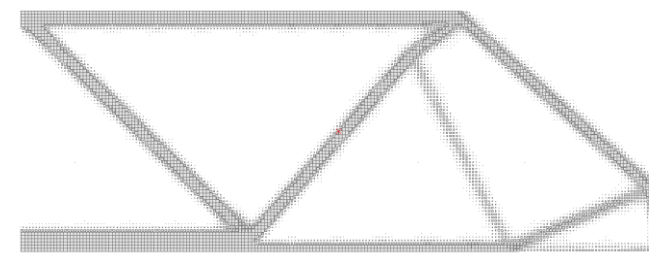
$p=5$



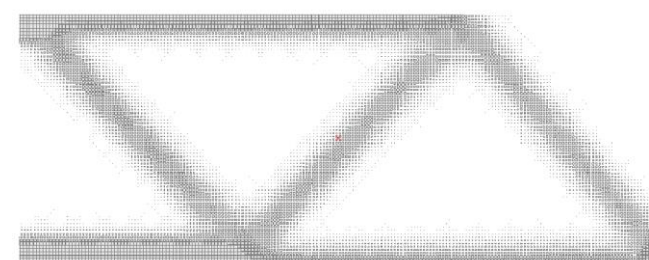
Проблема
«шахматной
доски»



$R_{\min}=3$



$R_{\min}=6$

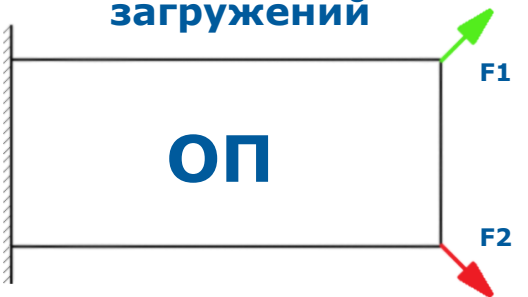




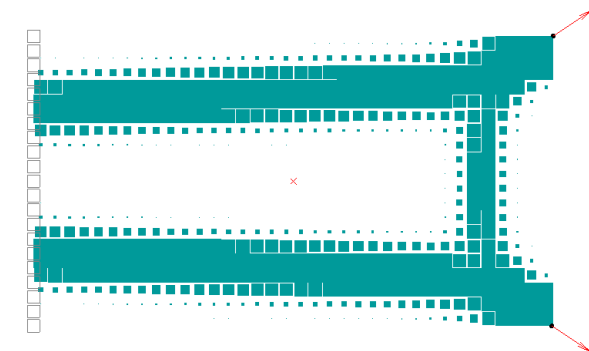
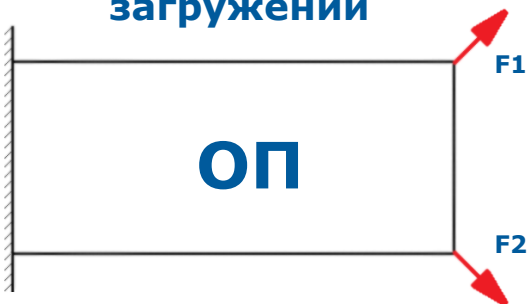
одно загрузение



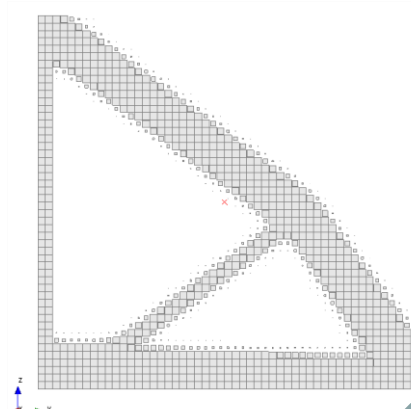
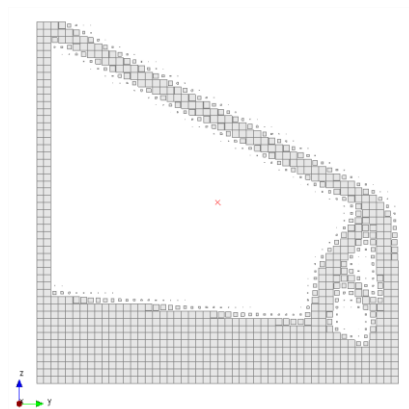
одно из двух
загрузений



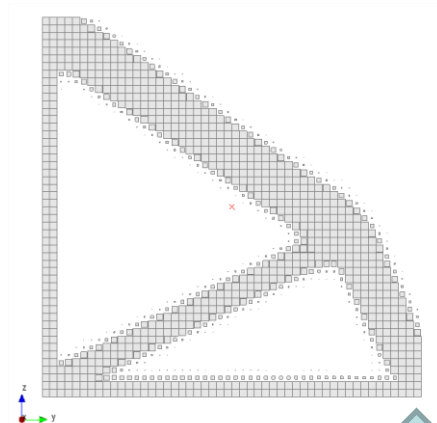
комбинация
загрузений



Технология



одно из двух загрузений



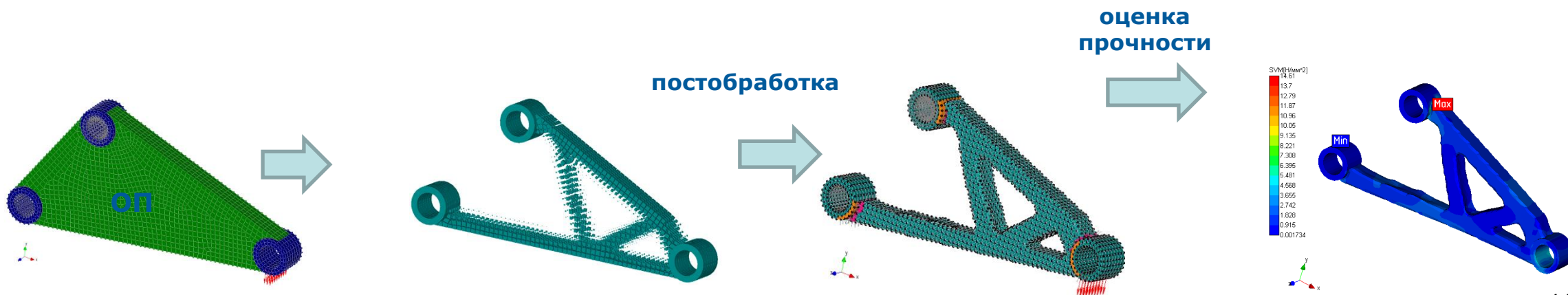


ТО без неизменяемых элементов

Технология



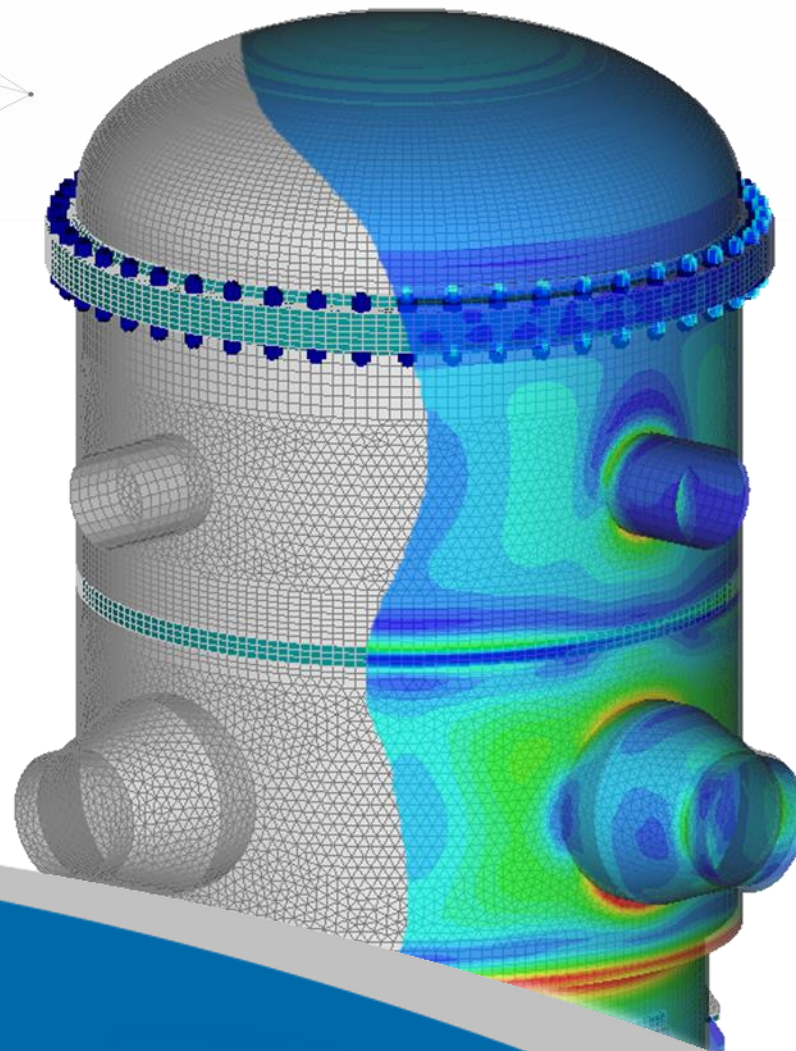
ТО с неизменяемыми элементами





Постановка задачи

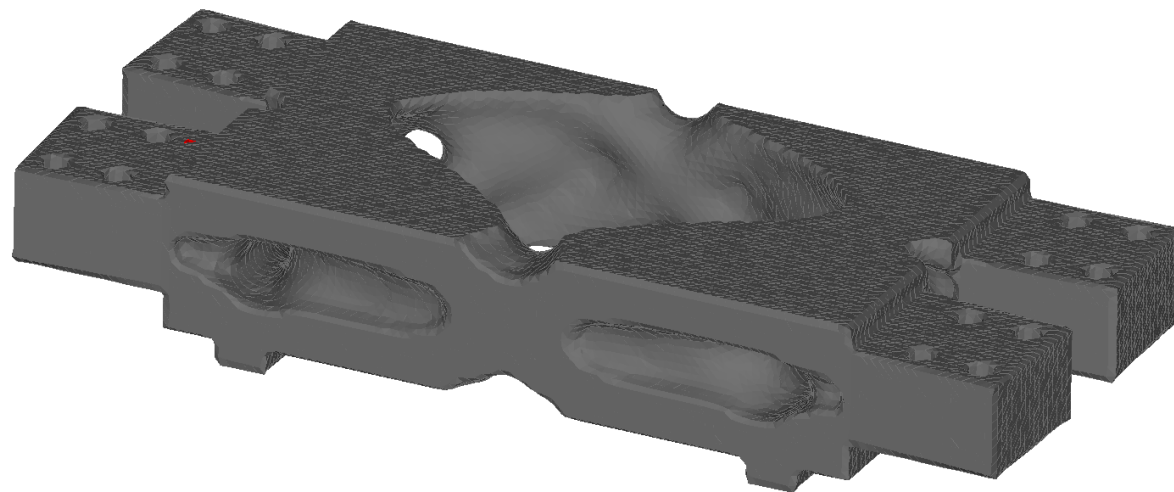
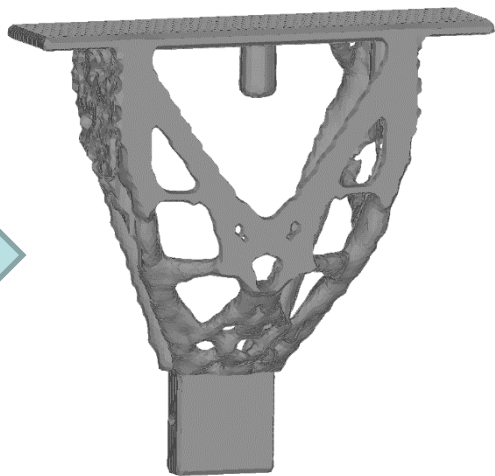
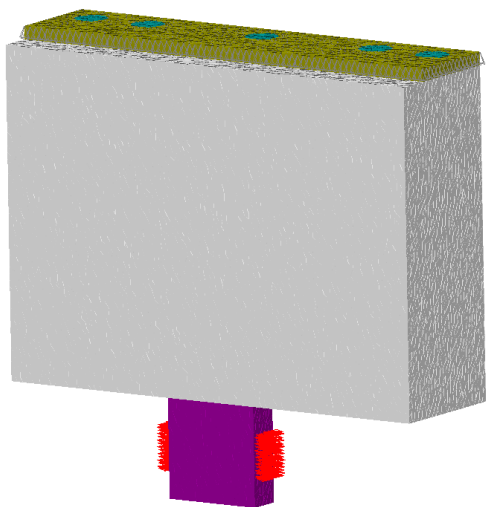
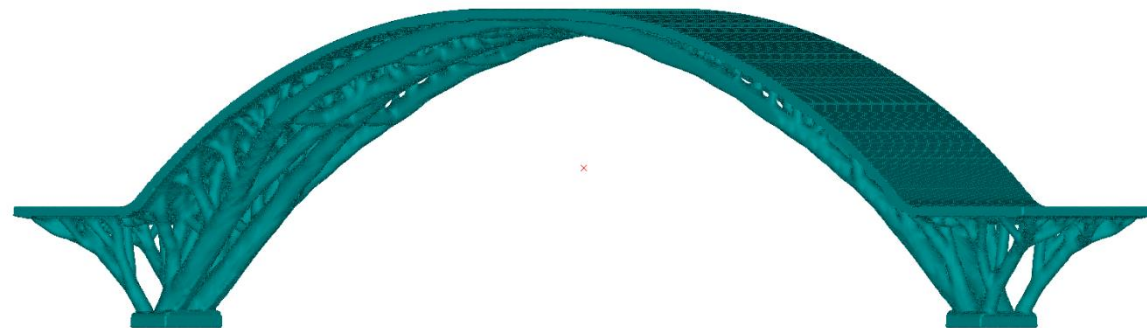
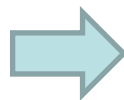
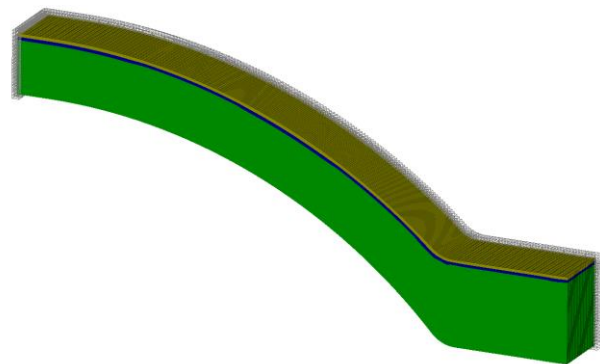
17я версия продукта





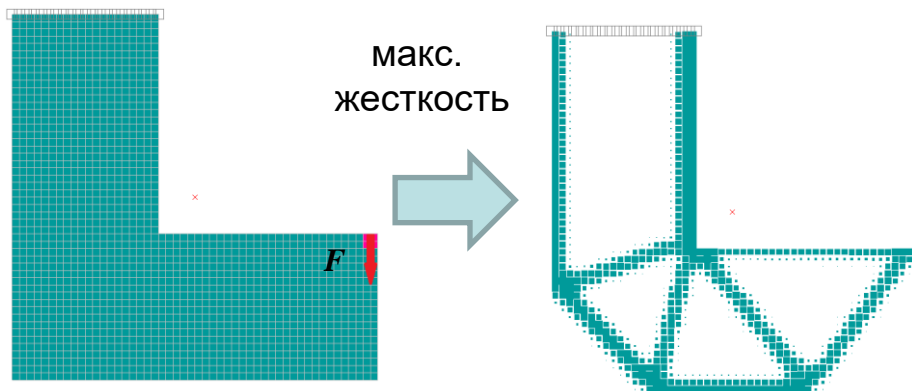
Максимизация жесткости + ограничение массы

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





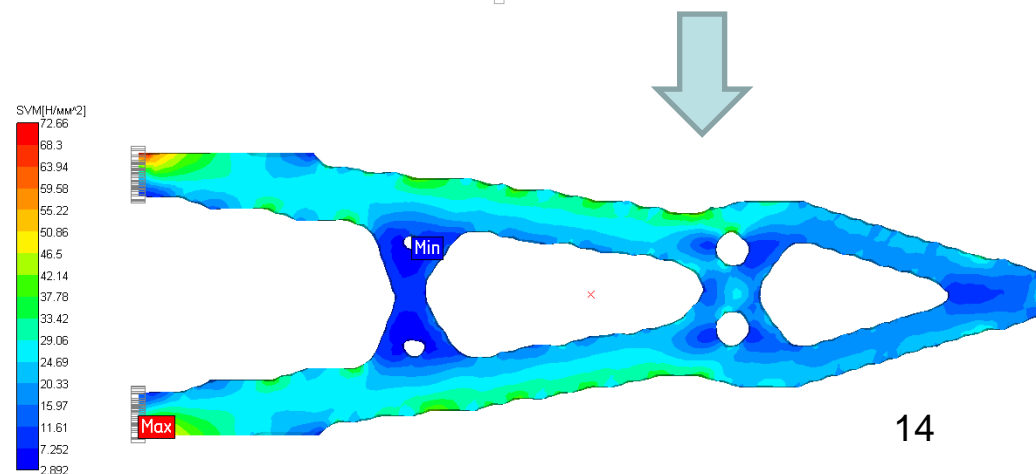
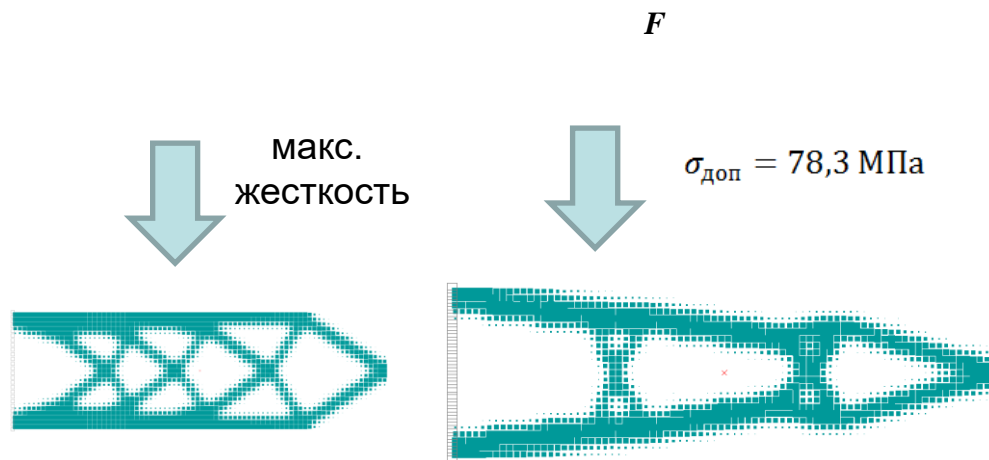
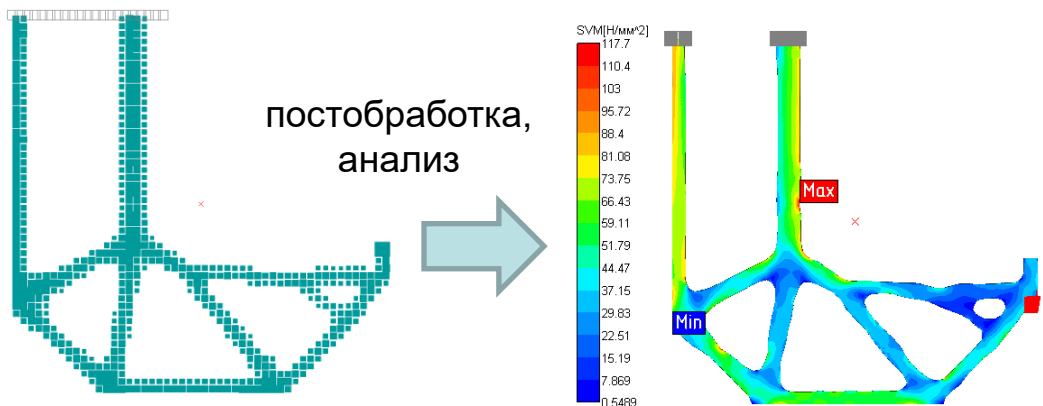
Минимизация массы + ограничение напряжений



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

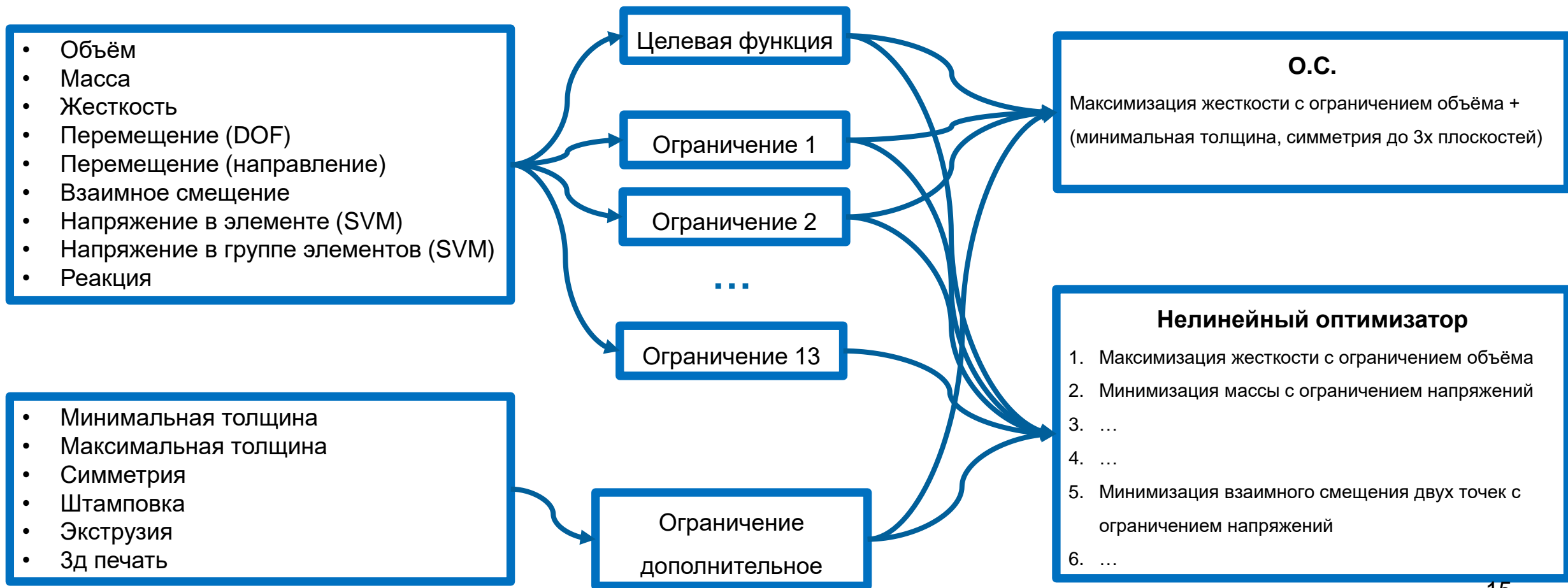
$$\sigma_j^{\text{rp}} = \sum_{l=1}^{n_j} ((\sigma_l^{\text{SVM}})^P)^{\frac{1}{P}}$$

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





Технология

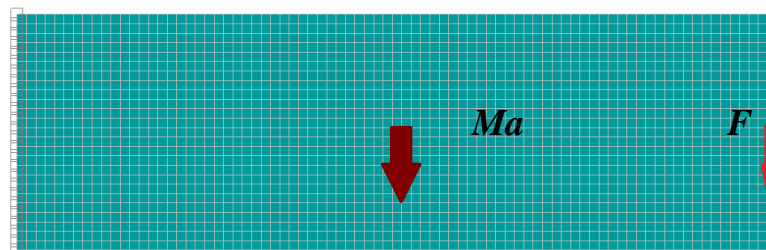




Учет объемных сил

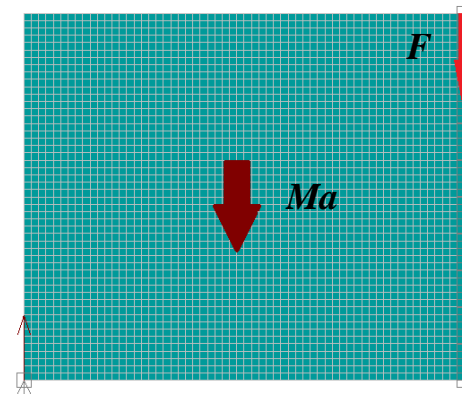
Постановка задачи (макс. жесткости):

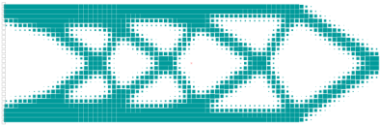
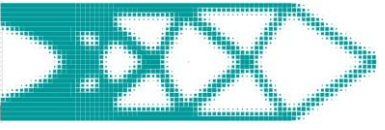
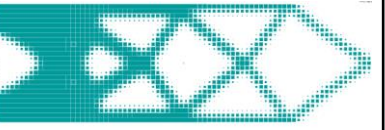
$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \mathbf{u}_i^T \mathbf{k}_i(\rho_i) \mathbf{u}_i \\ \sum_{i=1}^N v_i(\rho_i) = V_0 \\ \mathbf{K}(\boldsymbol{\rho}) * \mathbf{u} = \mathbf{F}(\boldsymbol{\rho}) \\ 0 < \rho_i < 1, \quad i = 1..N \end{cases}$$

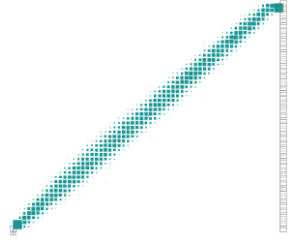
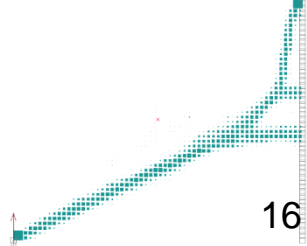


Постановка задачи (мин. массы):

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

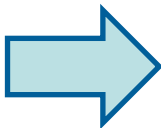
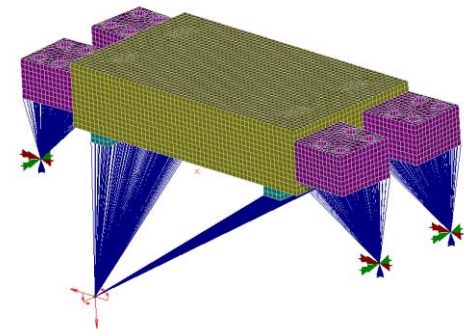


	$\sum_{i=1}^N m_i(\rho_i) a_i = 0$	$\sum_{i=1}^N m_i(\rho_i) a_i = F$	$\sum_{i=1}^N m_i(\rho_i) a_i = 4F$
Конструкция			

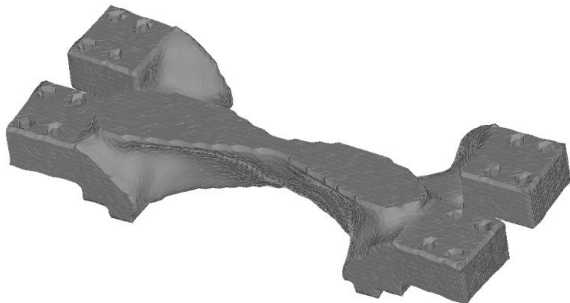
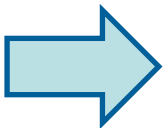
	$\sum_{i=1}^N m_i(\rho_i) a_i = 0$	$\sum_{i=1}^N m_i(\rho_i) a_i = F$
Конструкция		



Ограничение реакций



$$\begin{cases} \min E_{\text{констр}} \\ \sum\limits_1^N m_i(\rho) < 0.5M_0 \\ Rz_1(\rho) < 11000\text{H} \\ Rz_2(\rho) < 11000\text{H} \end{cases}$$

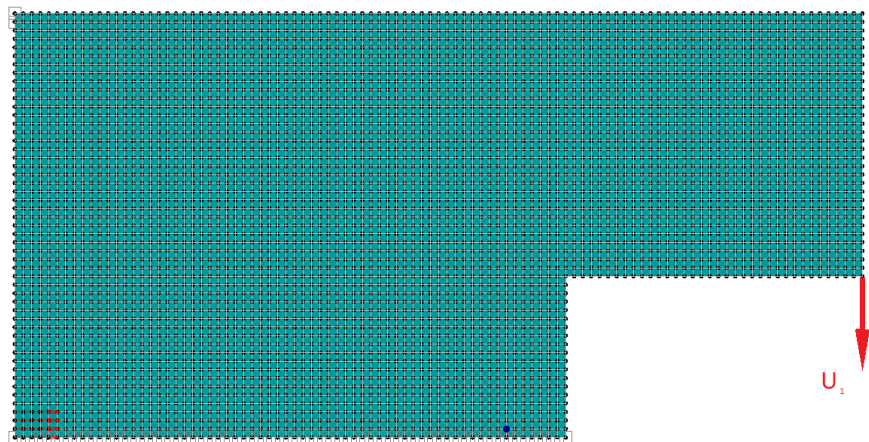


Без ограничения реакций в опорах					С ограничением вертикальных реакций в опорах			
Опора №	P.C. 1	P.C. 2	P.C. 3	P.C. 4	P.C. 1	P.C. 2	P.C. 3	P.C. 4
0(Rz)	17066 H	17066 H	-8608.3 H	-8608.3 H	10823 H	-17 H	-9840 H	-1148 H
1(Rz)	-17107 H	-17107 H	-8805.7 H	-8805.7 H	-8982 H	-353 H	-9459 H	-10797 H

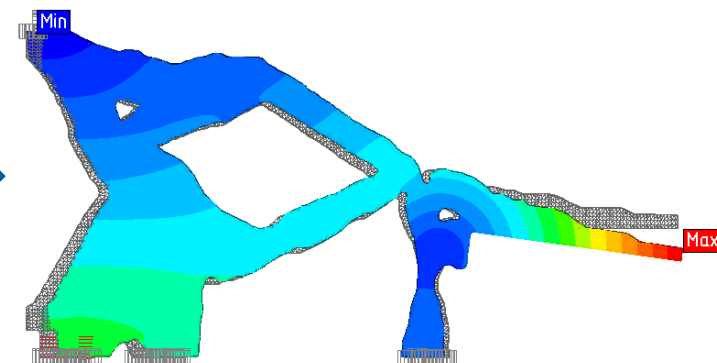


Отклик «перемещение»

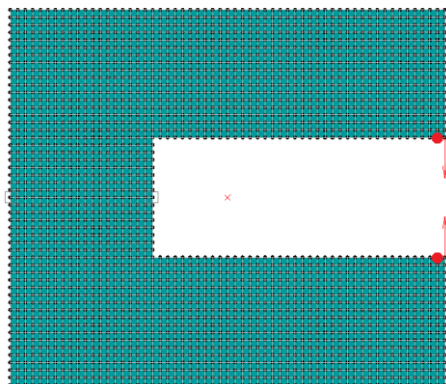
Проектирование «упругих механизмов»



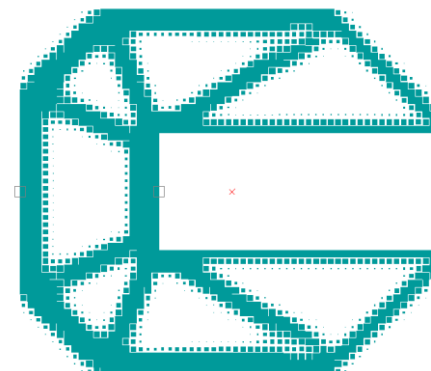
$$\begin{cases} \max U_1 \\ \sum_1^N m_i(\rho) < 0.35M_0 \end{cases}$$



Минимизация взаимного смещения двух узлов

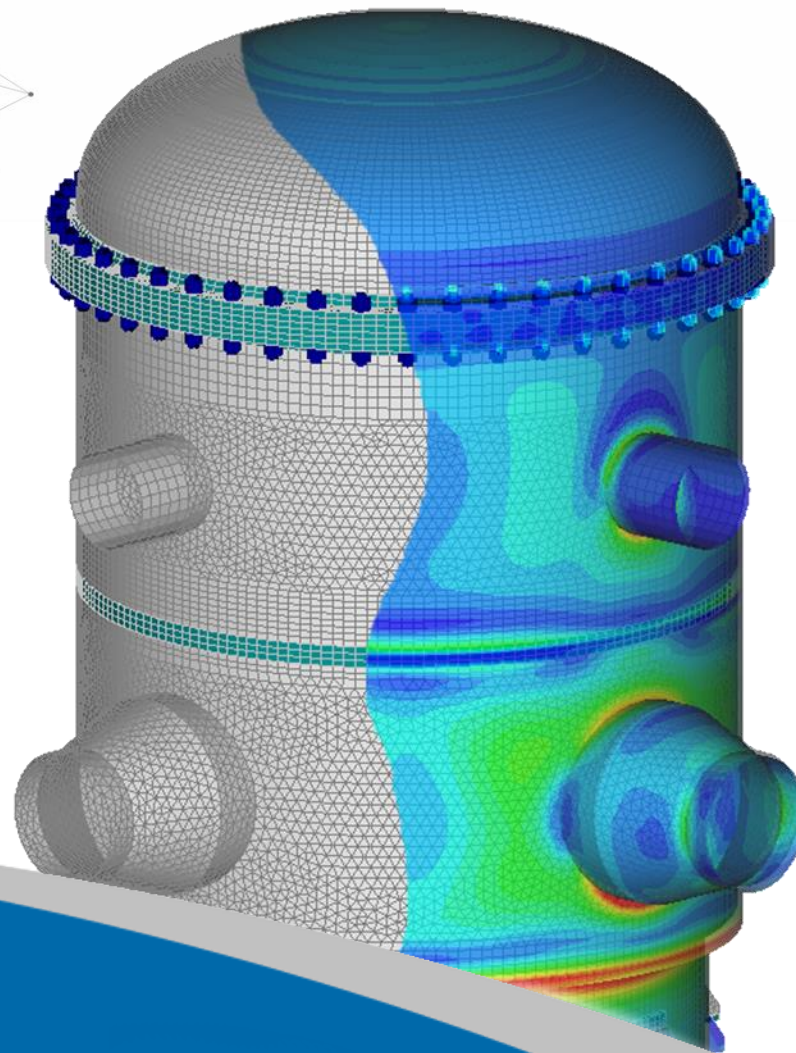


$$\begin{cases} \min \Delta U_1 \\ \sum_1^N m_i(\rho) < 0.50M_0 \end{cases}$$



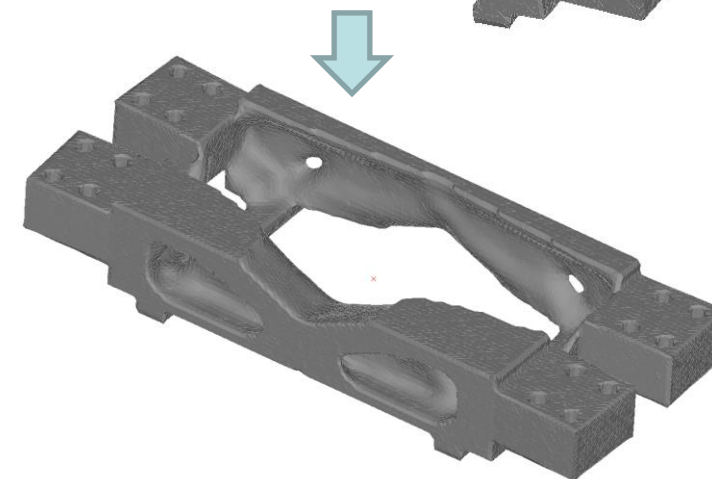
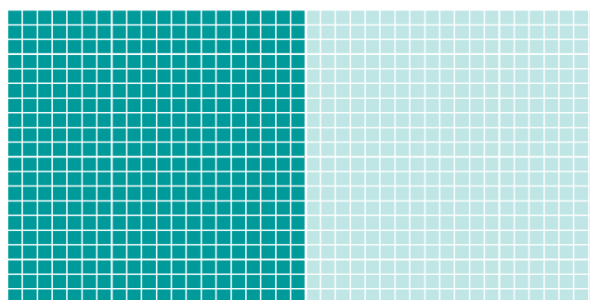
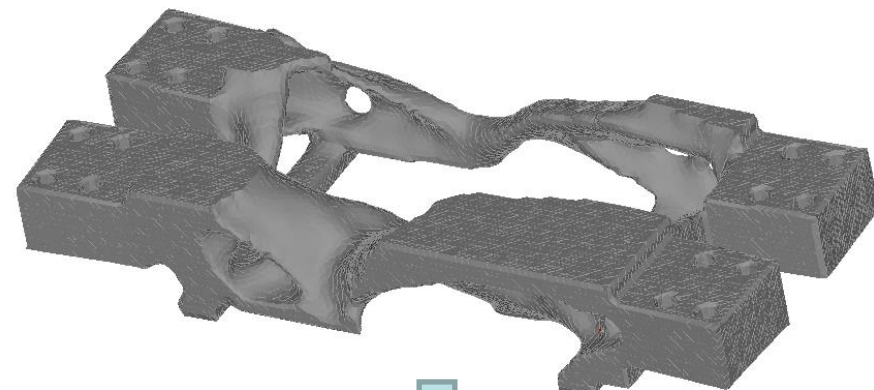
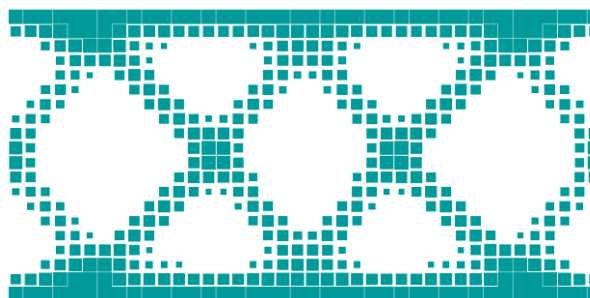
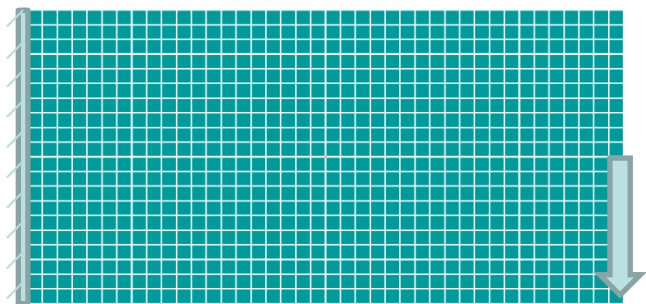


Технологические ограничения





Симметрия



ПРИМЕНЕНИЯ:

для задач с симметричным решением:

- уменьшение числа проектных переменных
- гарантия симметрии

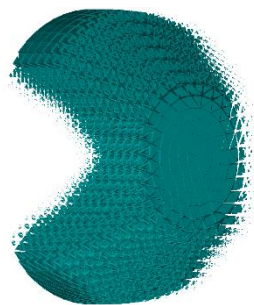
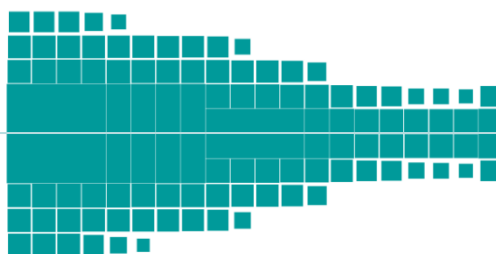
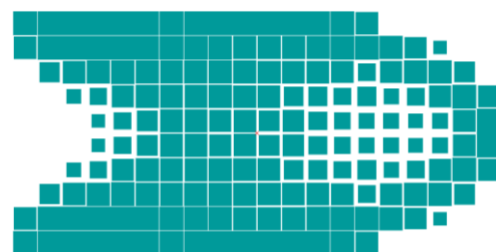
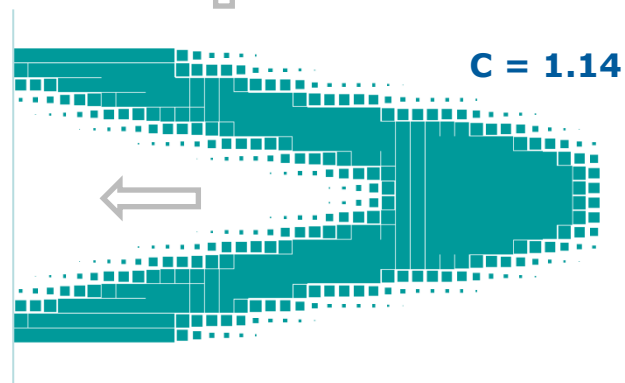
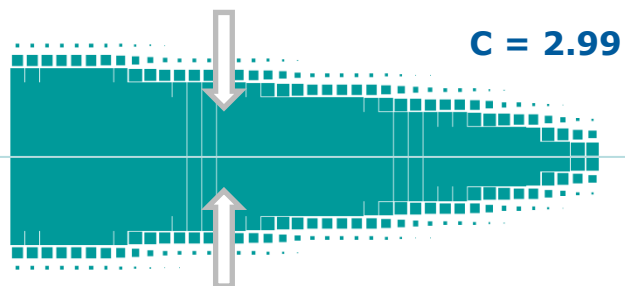
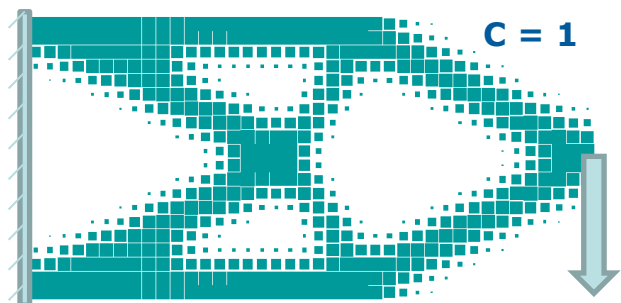
для задач с несимметричным решением:

- возможность сделать его симметричным

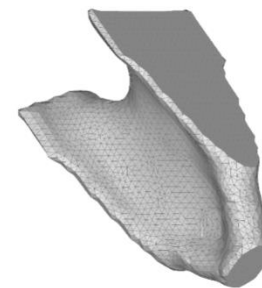
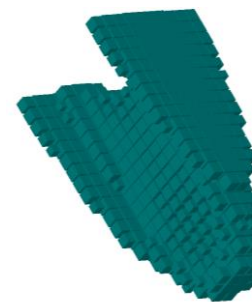
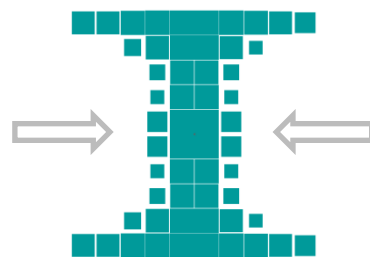
До 3 плоскостей симметрии



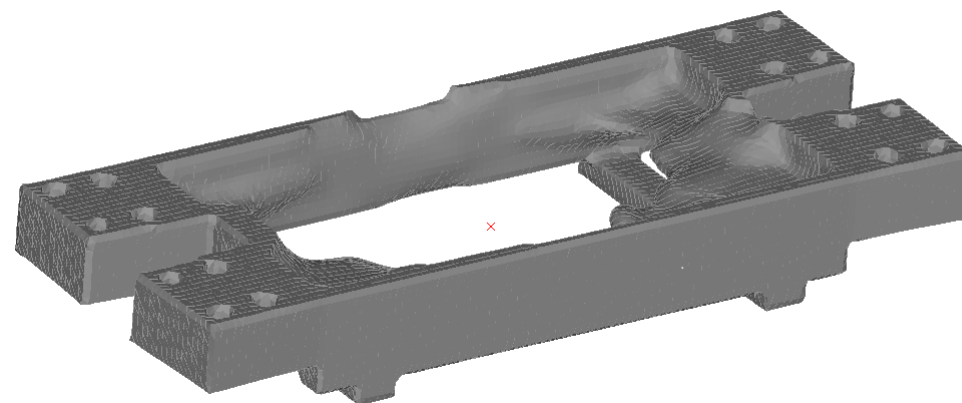
Исходная задача без ограничений



Геометрия с учётом направления штамповки

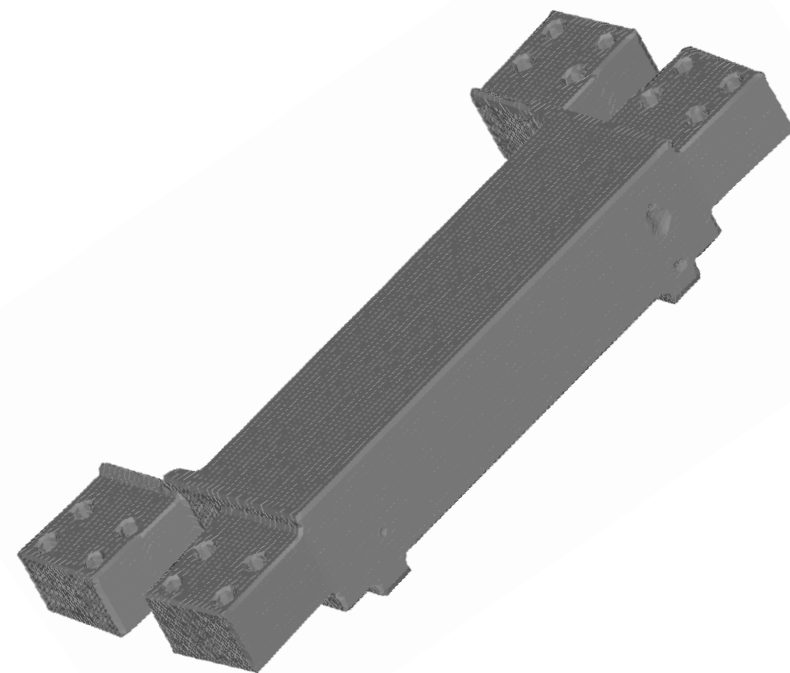
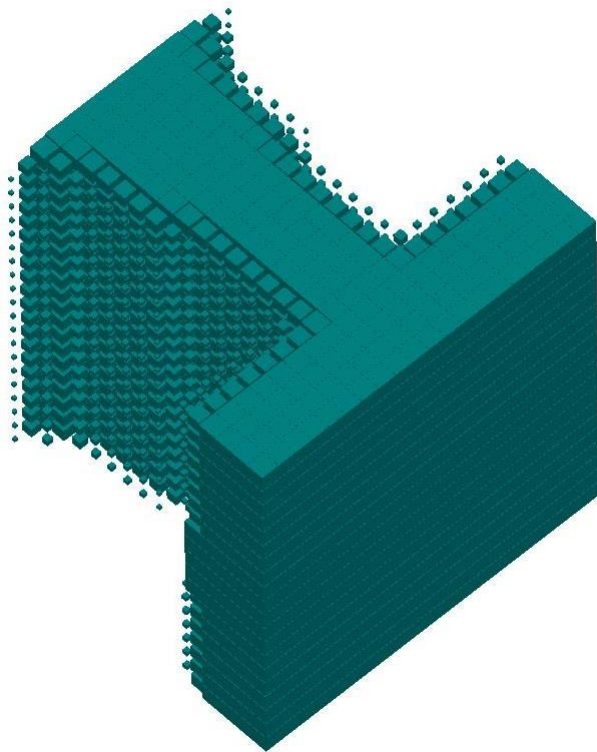
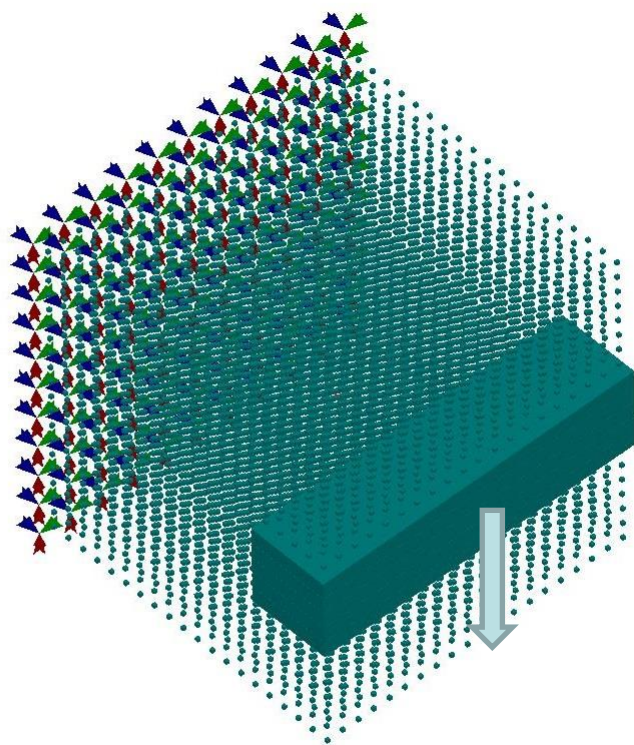


Штамповка





Экструзия

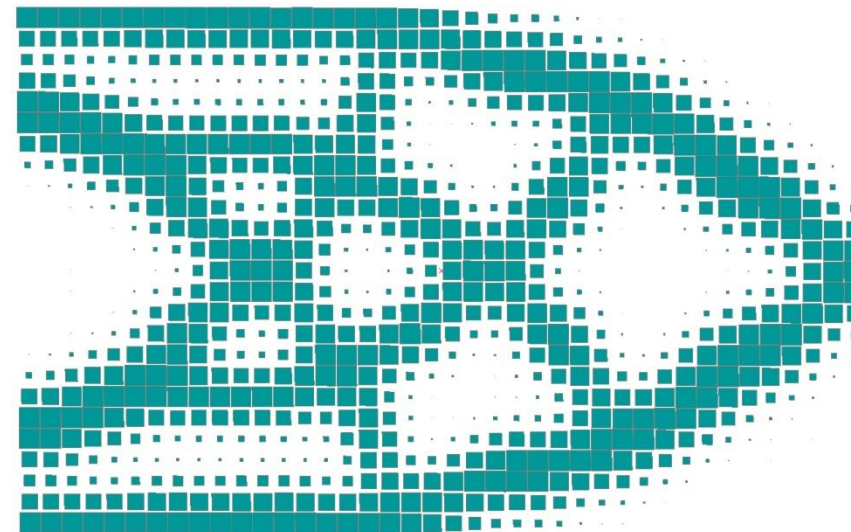
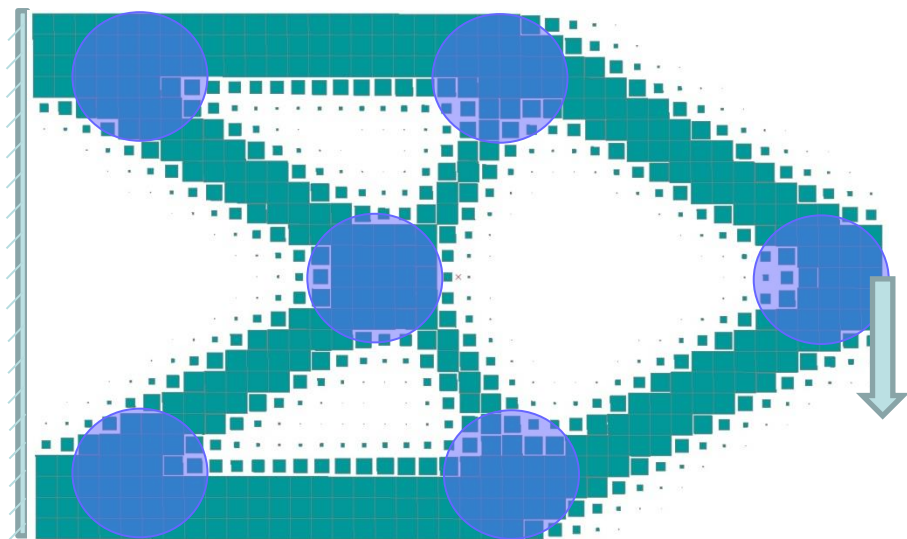
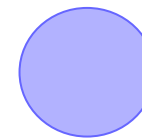




Максимальная толщина

Исходная задача
без ограничений

$R_{\max} = 3.1 \text{ мм}$

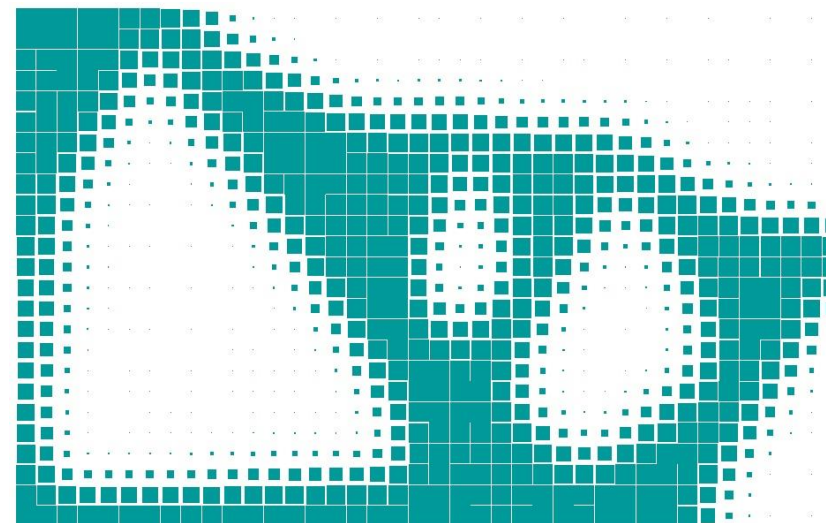
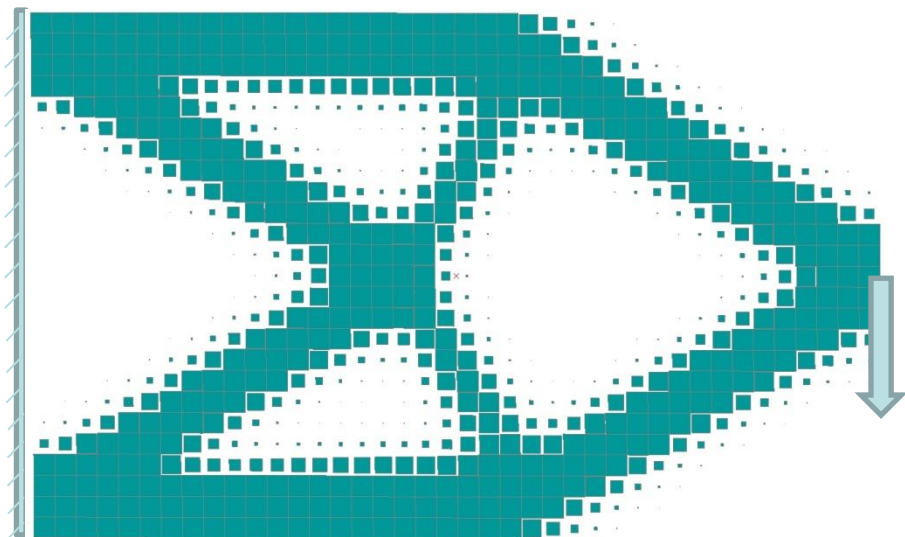




Аддитивные технологии (ограничение угла)

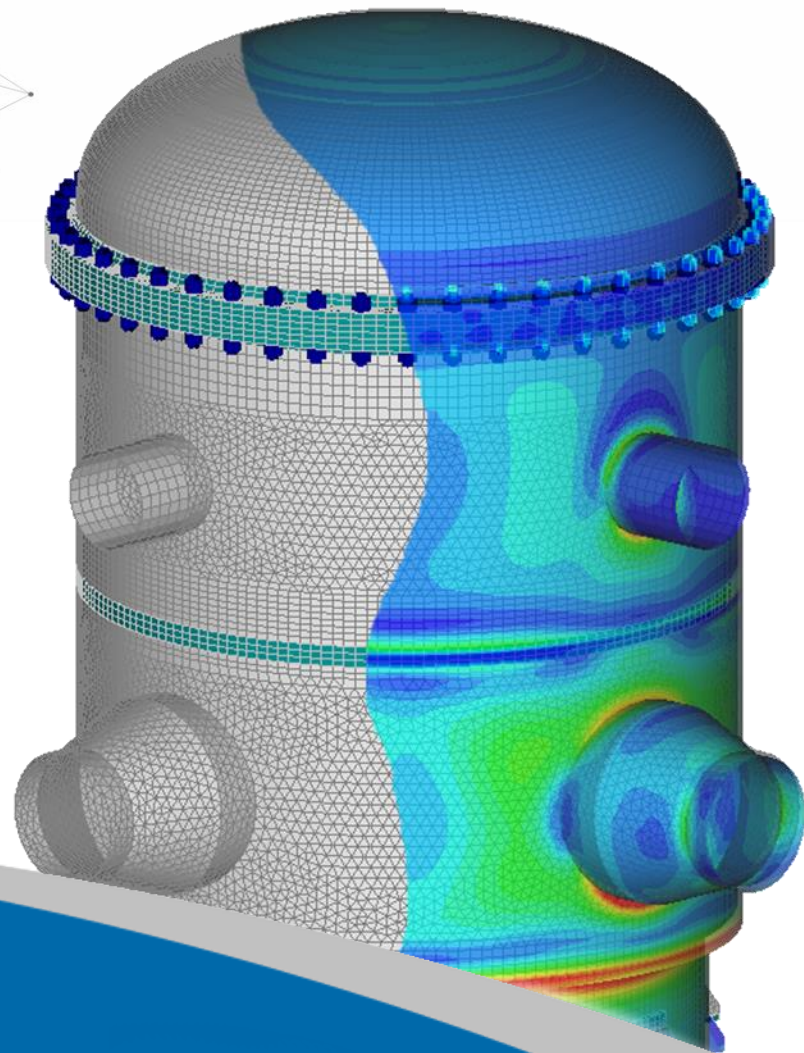
Исходная задача
без ограничений

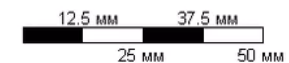
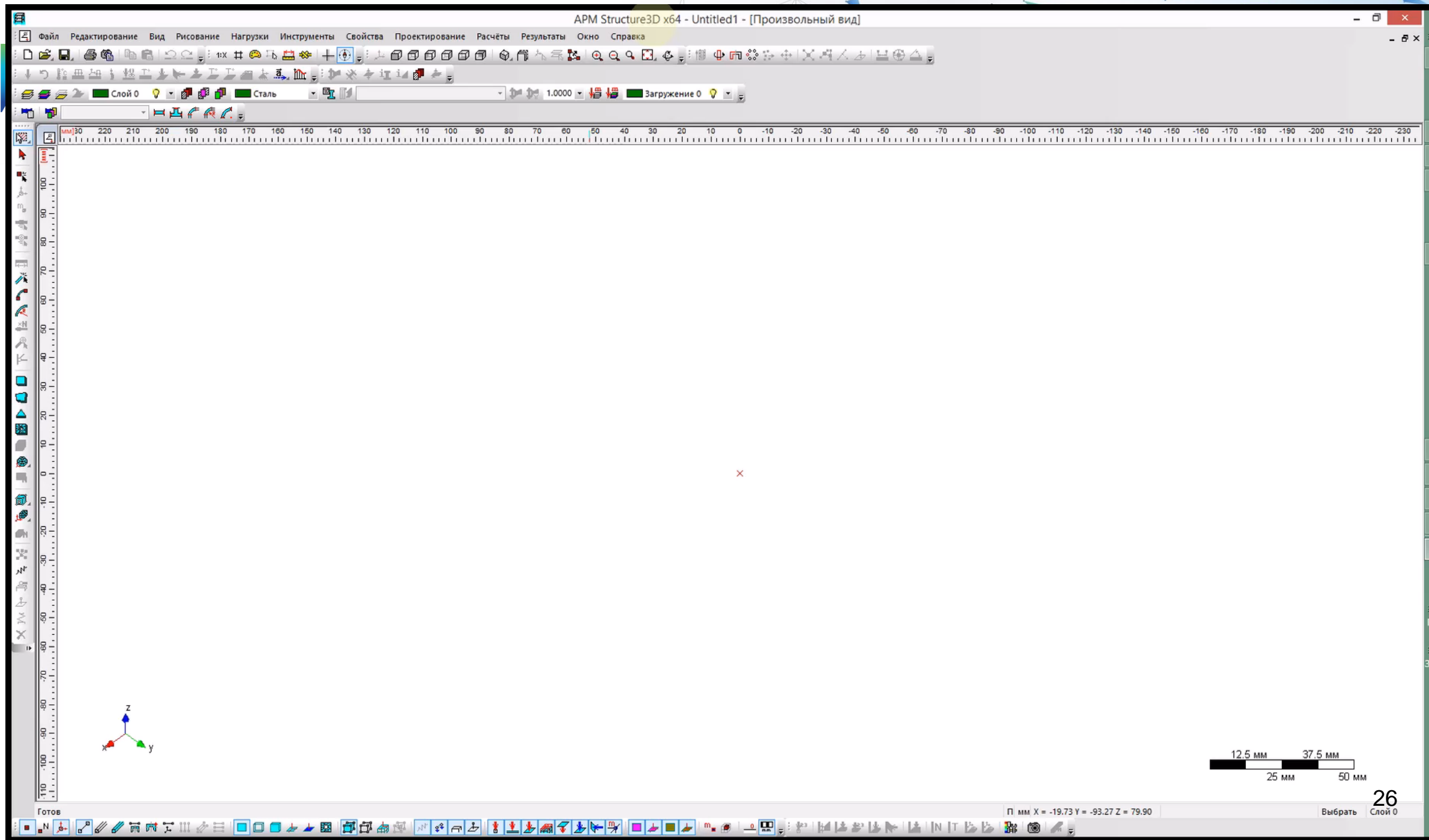
V T





Это просто

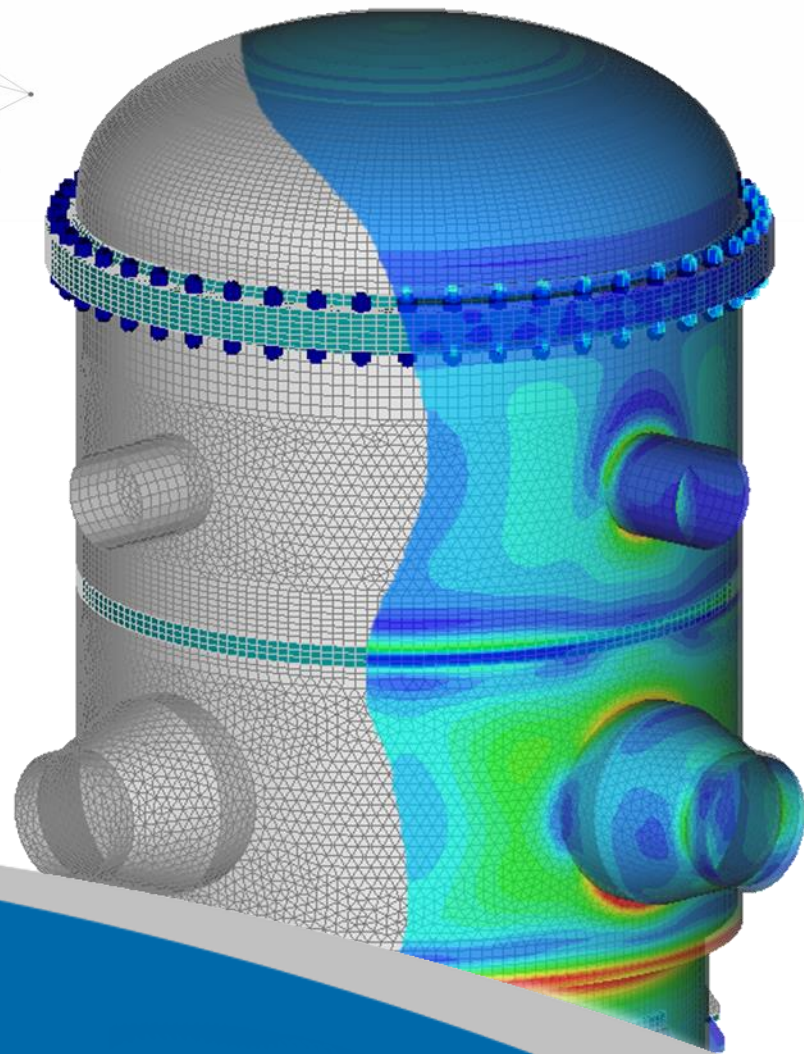


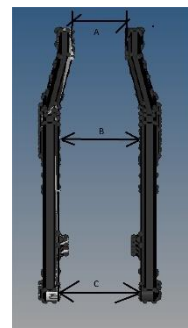
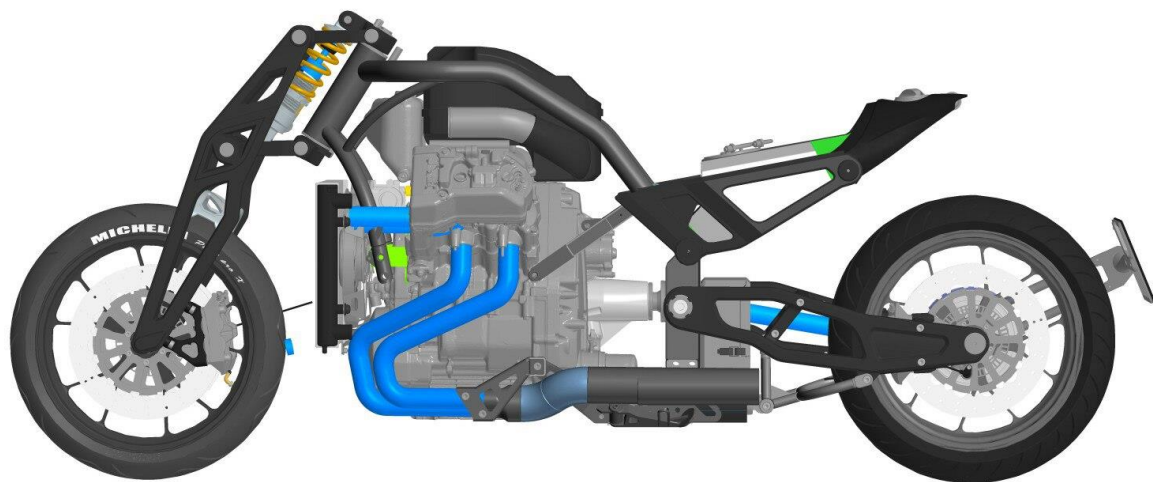




Примеры

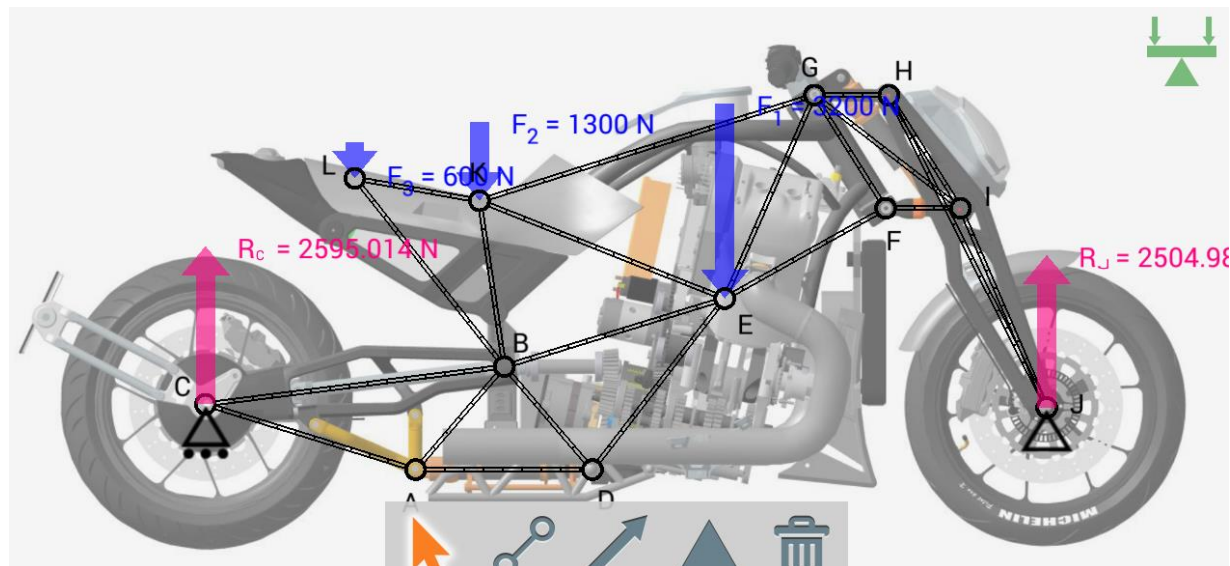
Практика





Русский мотоцикл

Исходная задача
вариант исполнения



КЭ модель,
пространство
проектирования

Результаты
линейного
статического анализа

Русский мотоцикл

Карты распределения
эквивалентных
напряжений

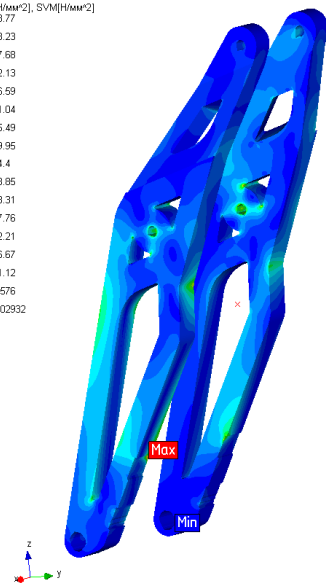
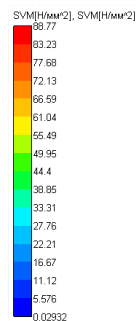
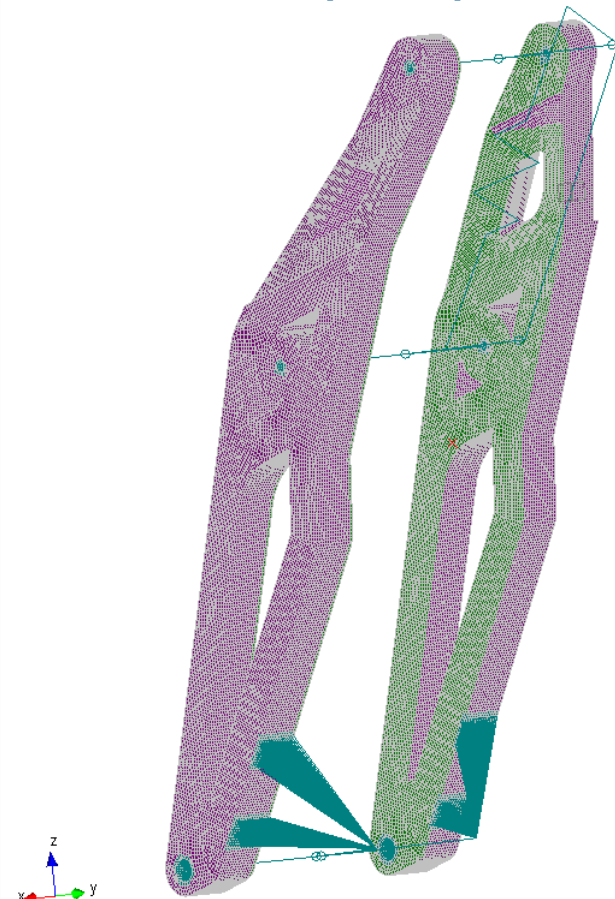


Таблица: Нагрузки на узлы: Загружение: Загружение 0

N	Тип	Номер узла	Проекция			Модуль
			на x	на y	на z	
0	сила, Н	287712	0.00	7500.00	4754.00	8879.78
1	сила, Н	287709	0.00	0.00	2400.00	2400.00
2	сила, Н	287710	0.00	0.00	2400.00	2400.00

Таблица: Нагрузки на узлы: Загружение: Загружение 1

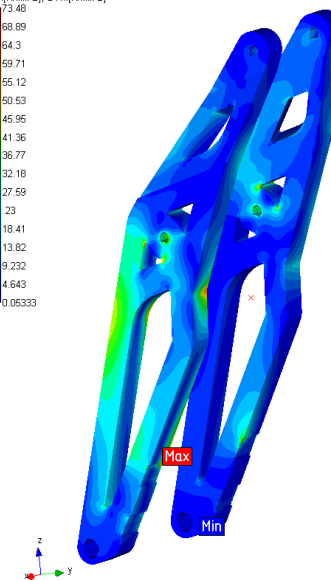
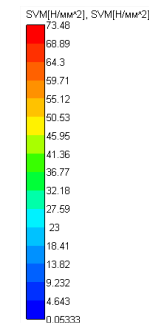
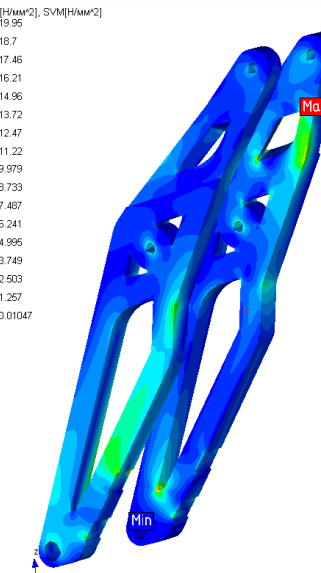
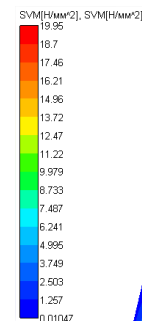
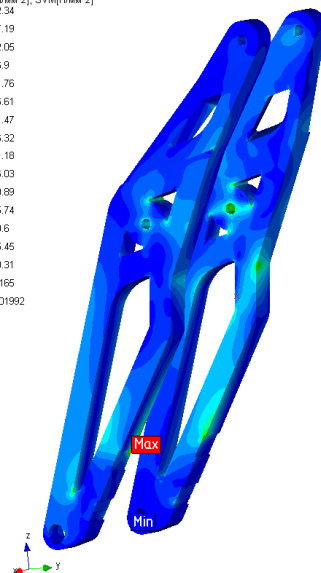
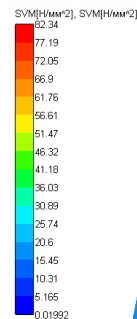
N	Тип	Номер узла	Проекция			Модуль
			на x	на y	на z	
0	момент, Н*мм	287712	0.00	290.00	0.00	290.00
1	сила, Н	287712	1000.00	6000.00	4000.00	7280.11
2	сила, Н	287709	0.00	0.00	2400.00	2400.00
3	сила, Н	287710	0.00	0.00	2400.00	2400.00

Таблица: Нагрузки на узлы: Загружение: Загружение 2

N	Тип	Номер узла	Проекция			Модуль
			на x	на y	на z	
0	сила, Н	287712	0.00	0.00	2500.00	2500.00

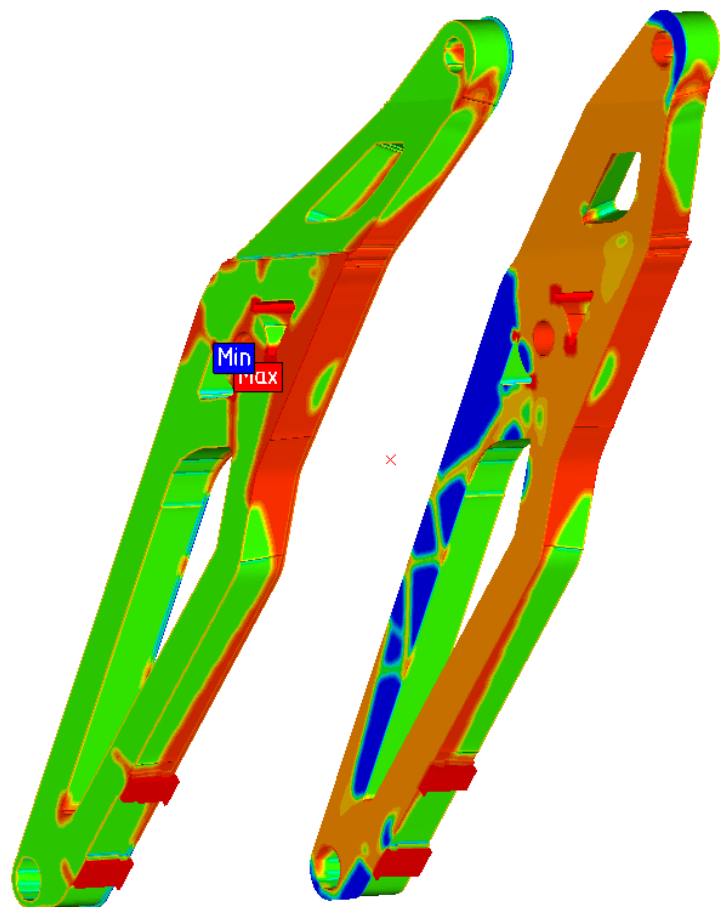
Таблица: Нагрузки на узлы: Загружение: Загружение 3

N	Тип	Номер узла	Проекция			Модуль
			на x	на y	на z	
0	сила, Н	287712	-1000.00	6000.00	4000.00	7280.11
1	момент, Н*мм	287712	0.00	-290.00	0.00	290.00
2	сила, Н	287709	0.00	0.00	2000.00	2000.00
3	сила, Н	287710	0.00	0.00	2000.00	2000.00

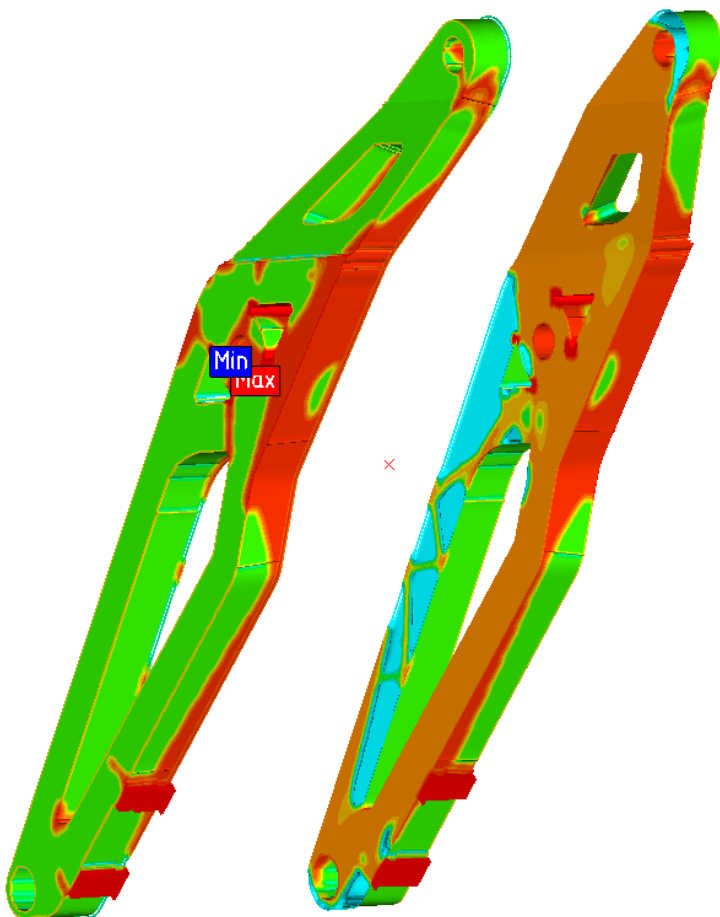




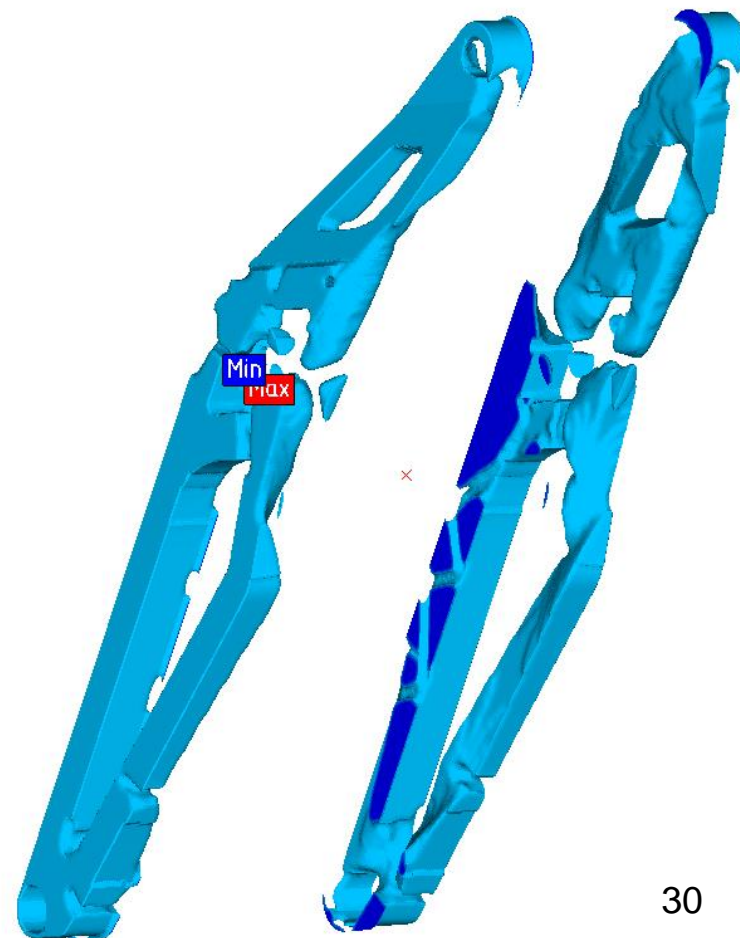
Карта распределения
объёмной доли
(«плотности»)



Материал необходимо
оставить



Материал, который
можно убрать





**Исходная геометрия
ноги вилки, дизайн
которой необходимо
сохранить**



**Упрощённая
геометрия**



**Результаты расчёта топологической оптимизации,
после полуавтоматической постобработки и
интерпретации конструктором – консервативный
подход**



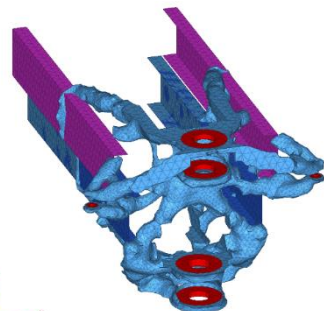
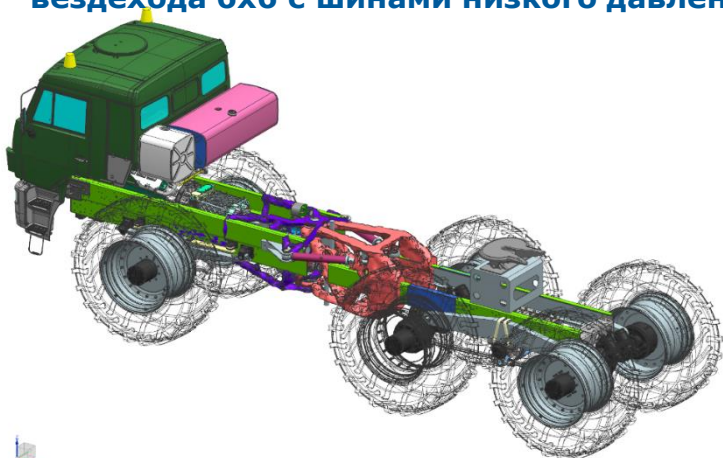


Узел в компоновке несущей системы
вездехода 6х6 с шинами низкого давления

Передний силовой узел

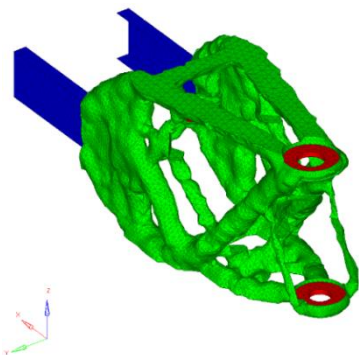
КАМАЗ

Сочлененная рама вездехода 6х6



Виртуальный
автомобиль: (нагрузки)

Задний силовой узел





Сочлененная рама вездехода 6х6 КАМАЗ

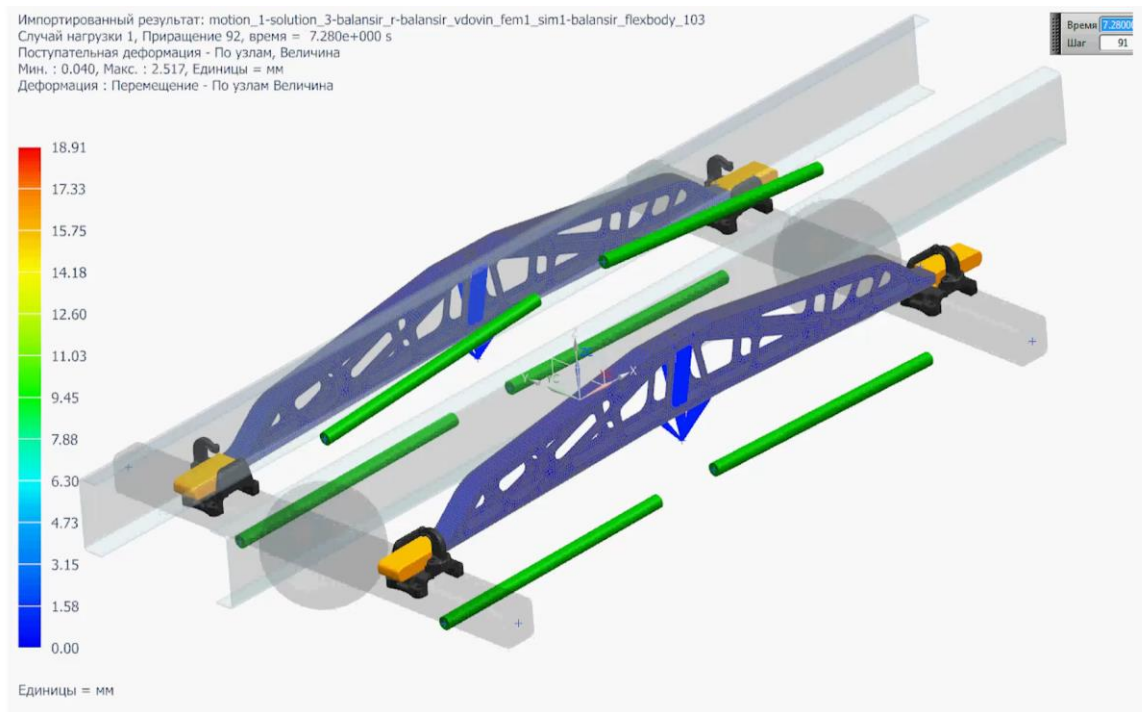




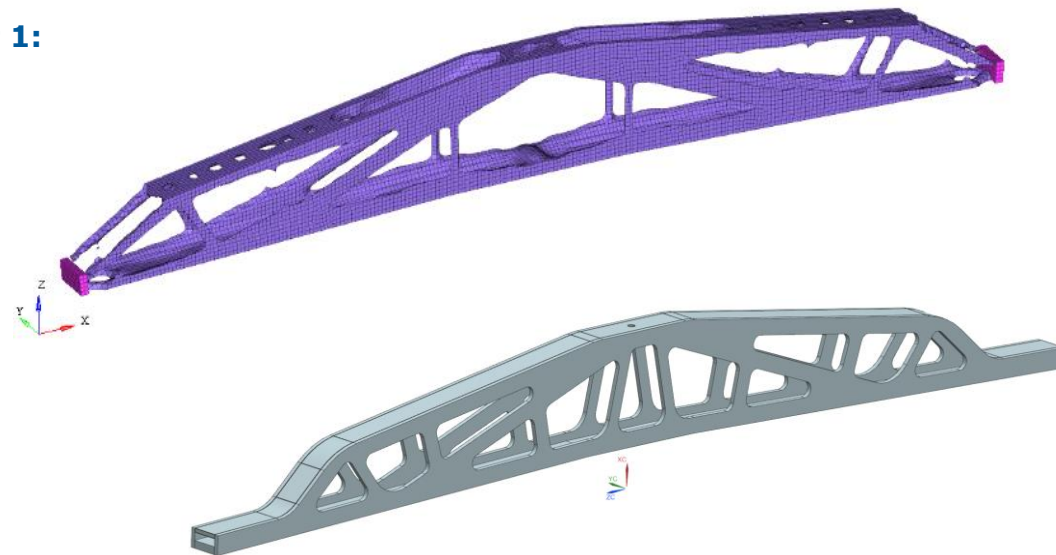
Балансир подвески вездехода 6x6

Силовая схема балансира подвески

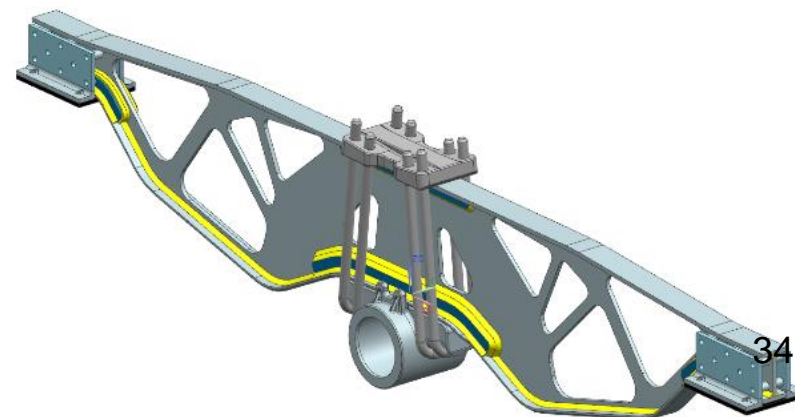
Виртуальный стенд для расчета нагрузок на заднюю балансирующую подвеску



Вариант 1:

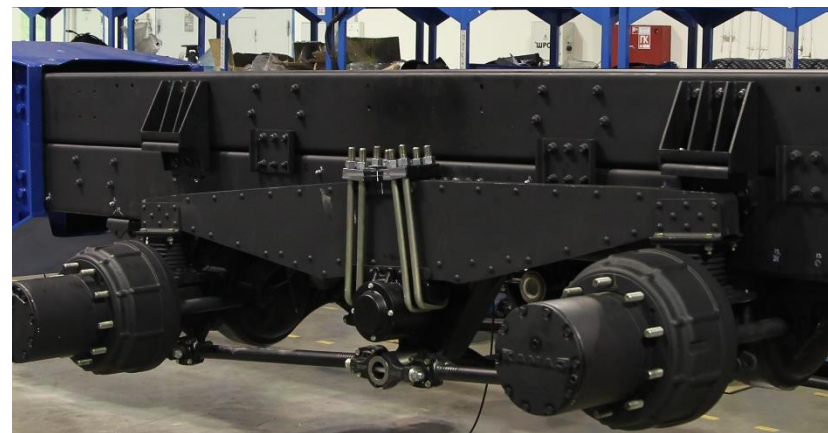


Вариант 2:

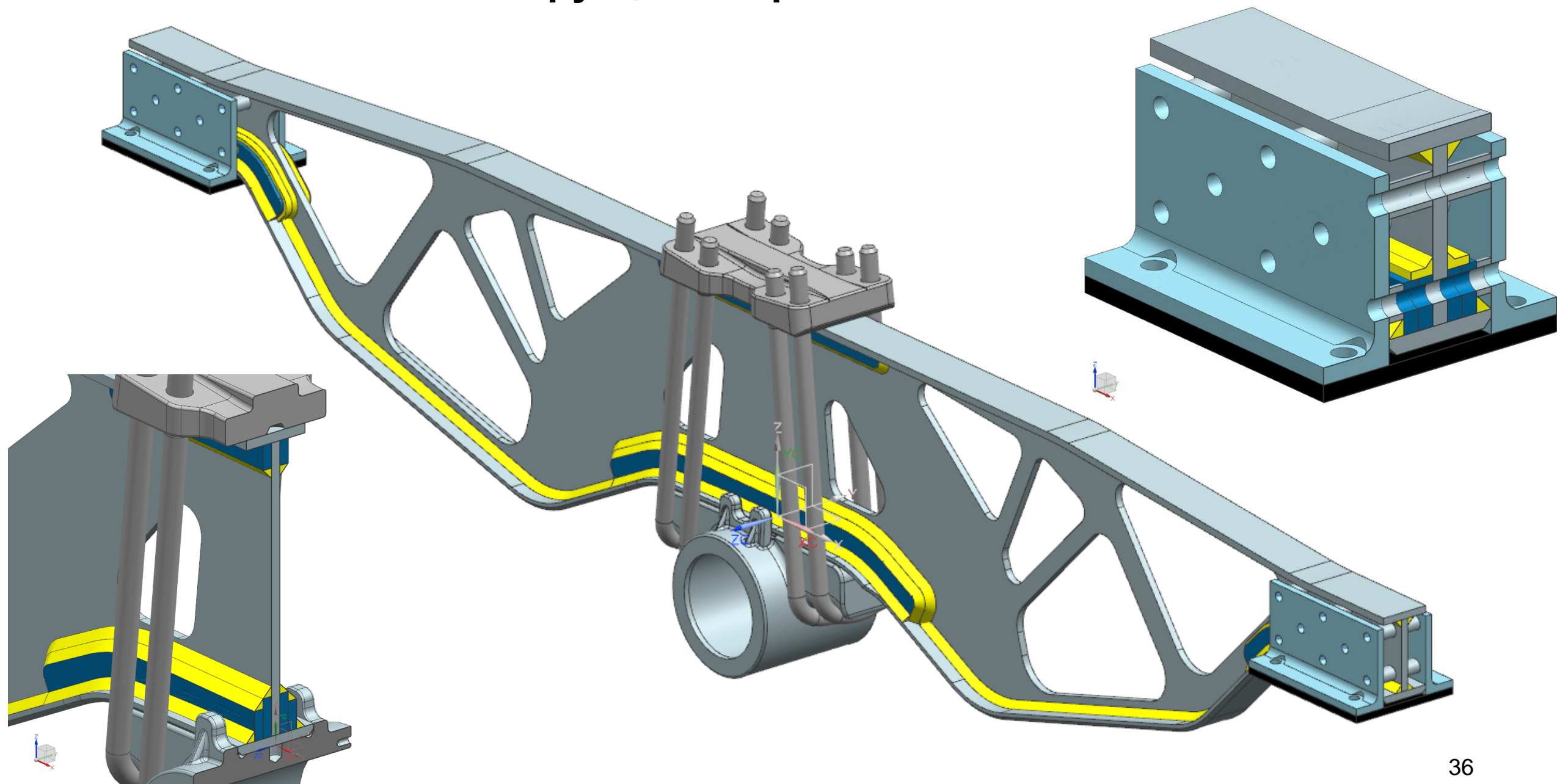




Балансир подвески вездехода 6х6



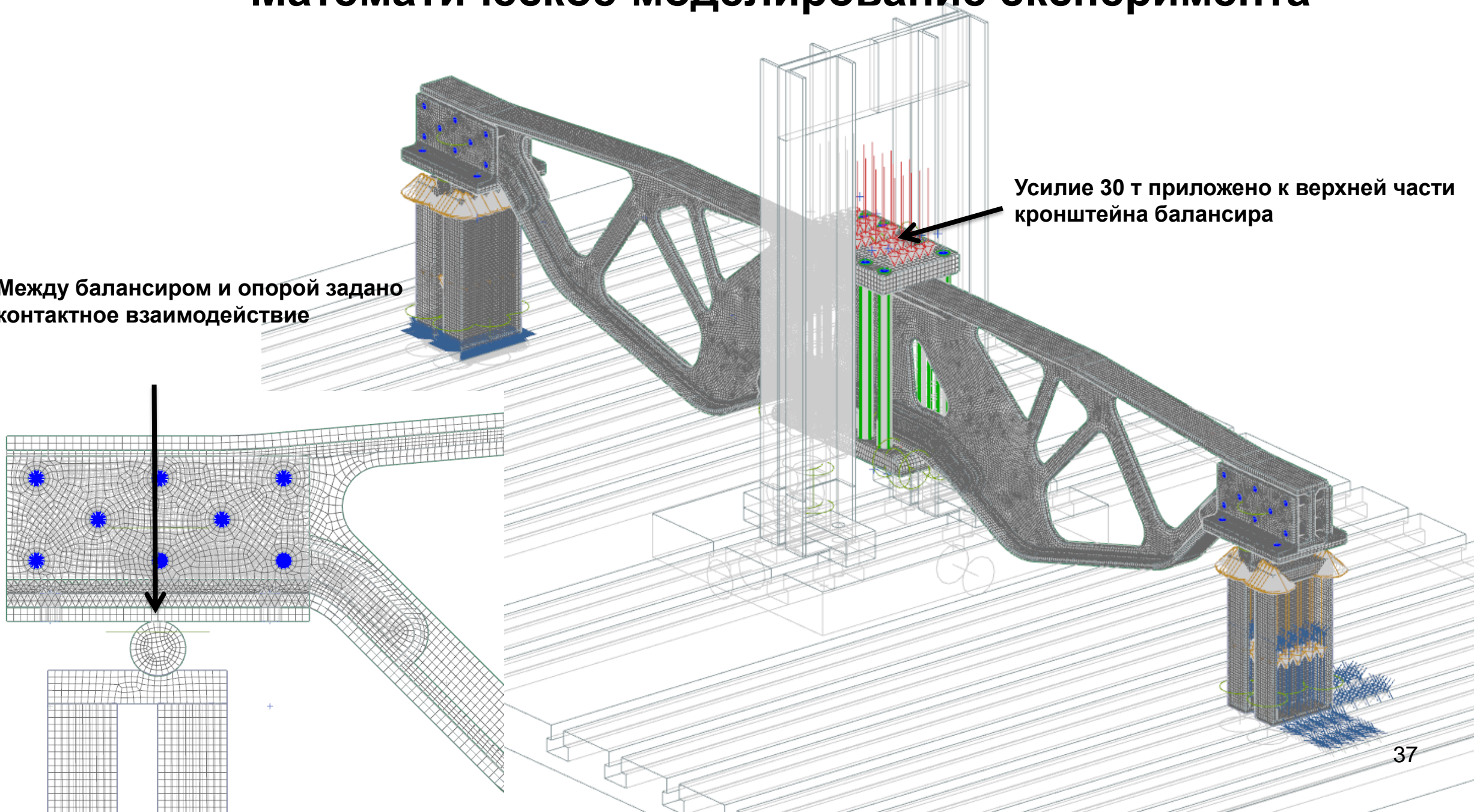
Конструкция сварного балансира

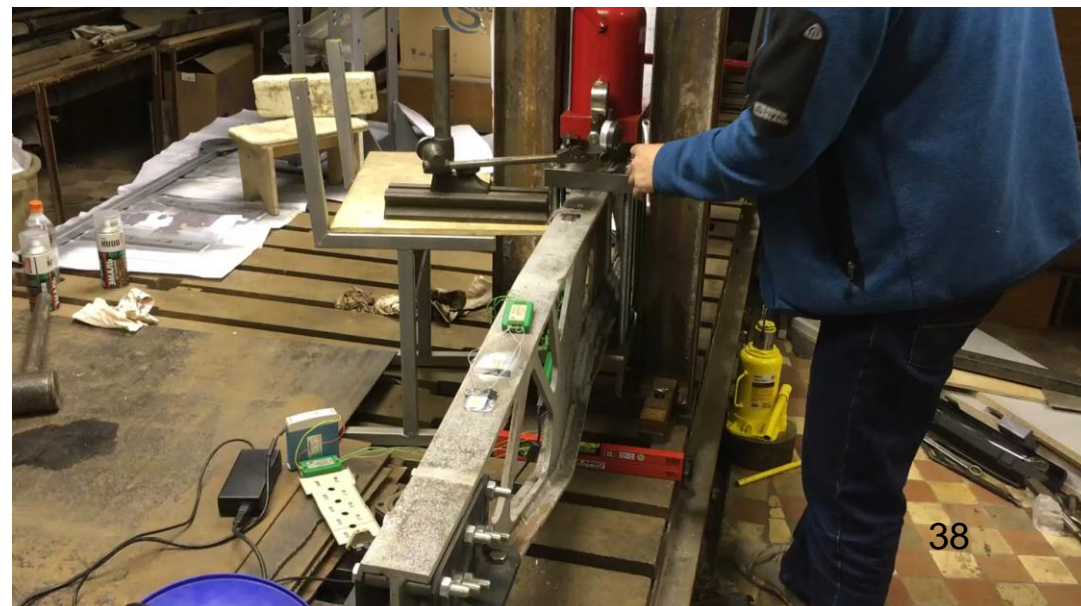
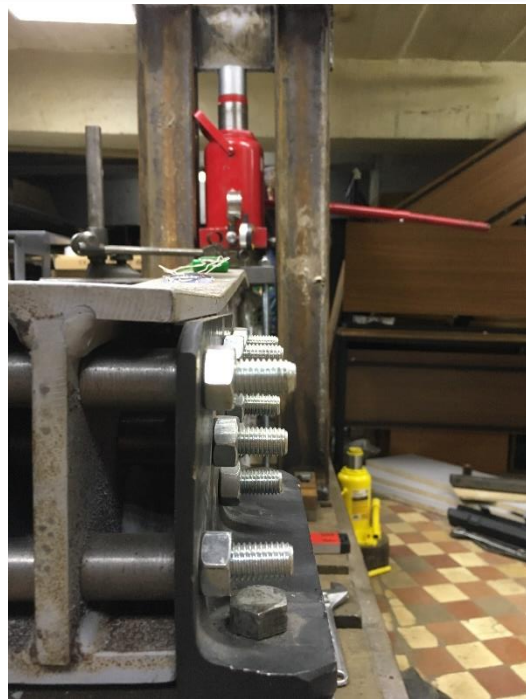
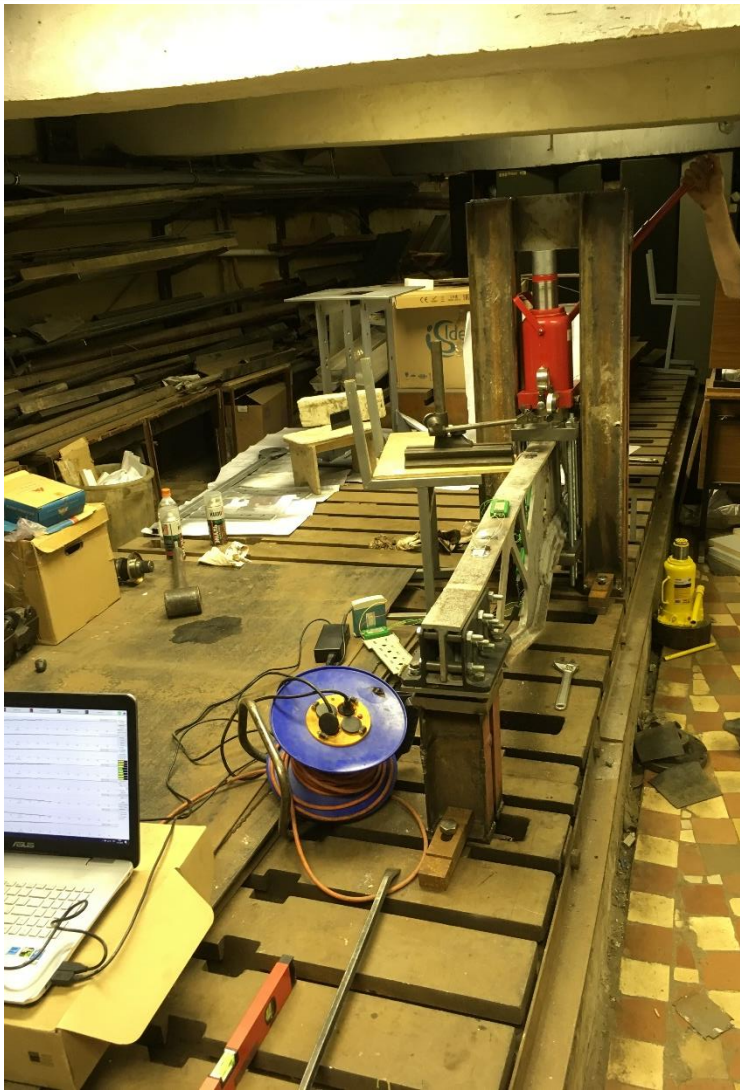


Математическое моделирование эксперимента

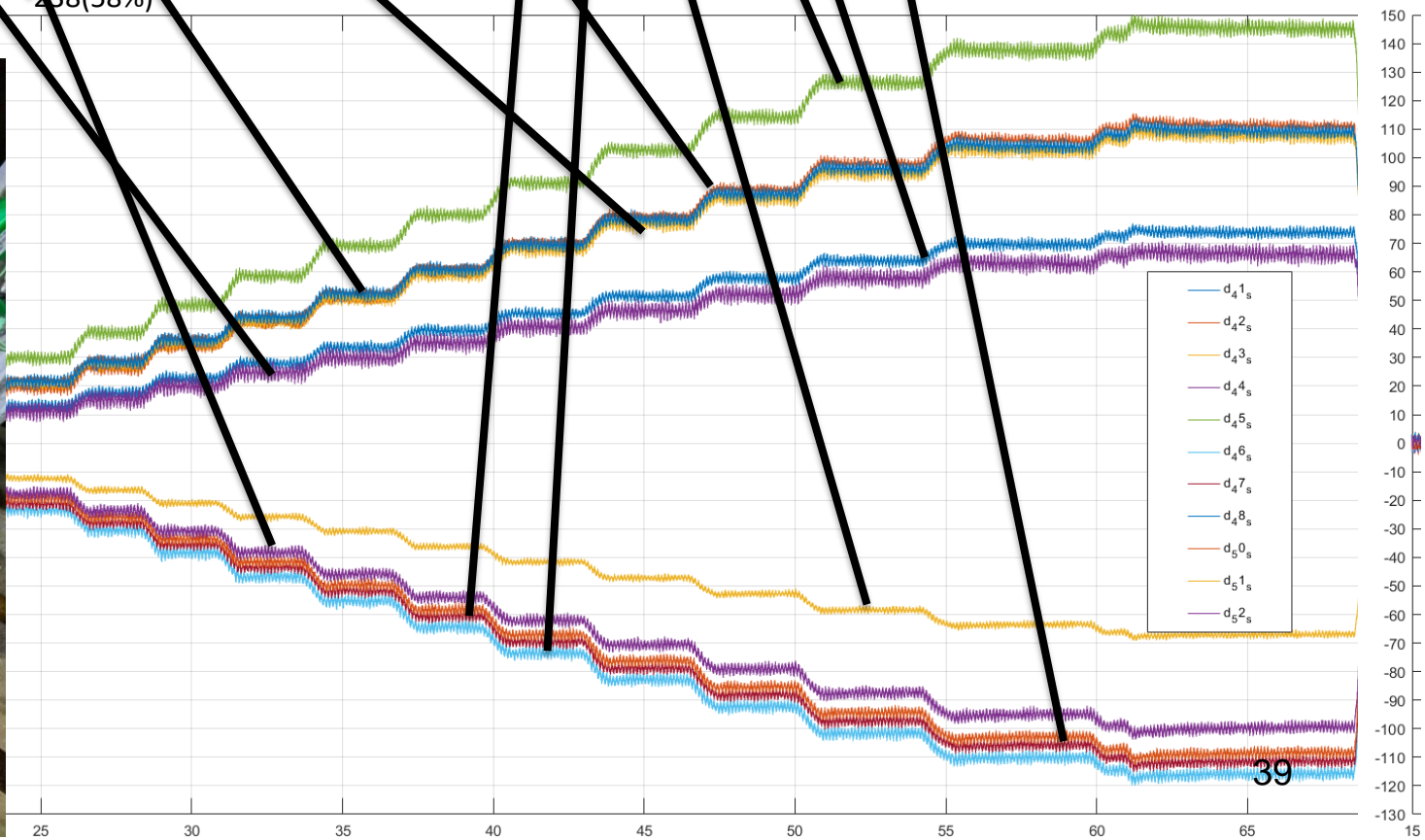
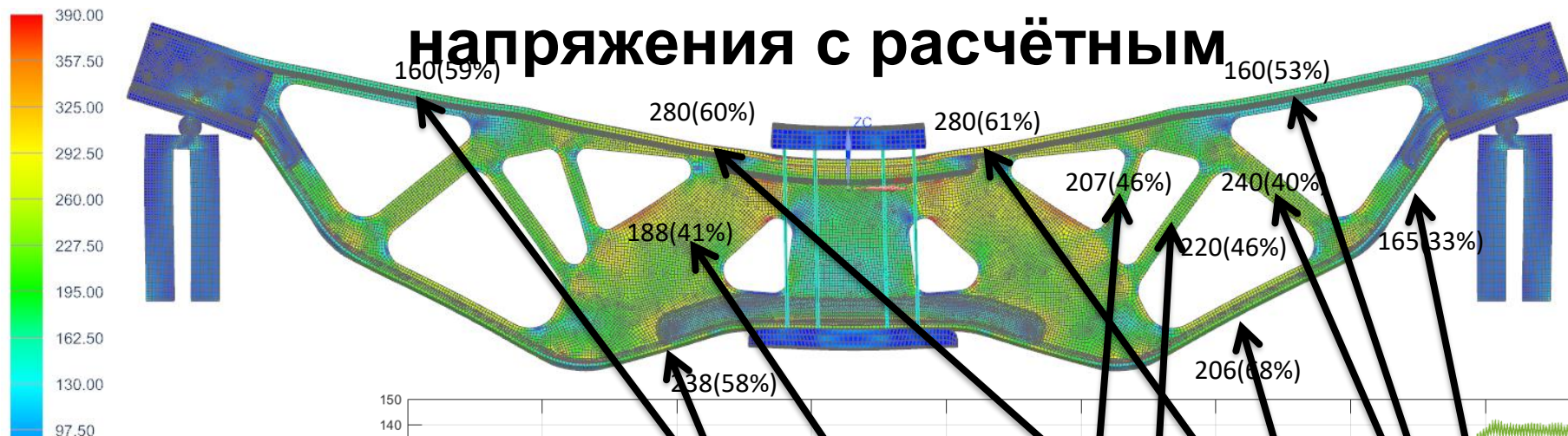
Между балансиrom и опорой задано
контактное взаимодействие

Усилие 30 т приложено к верхней части
кронштейна балансира



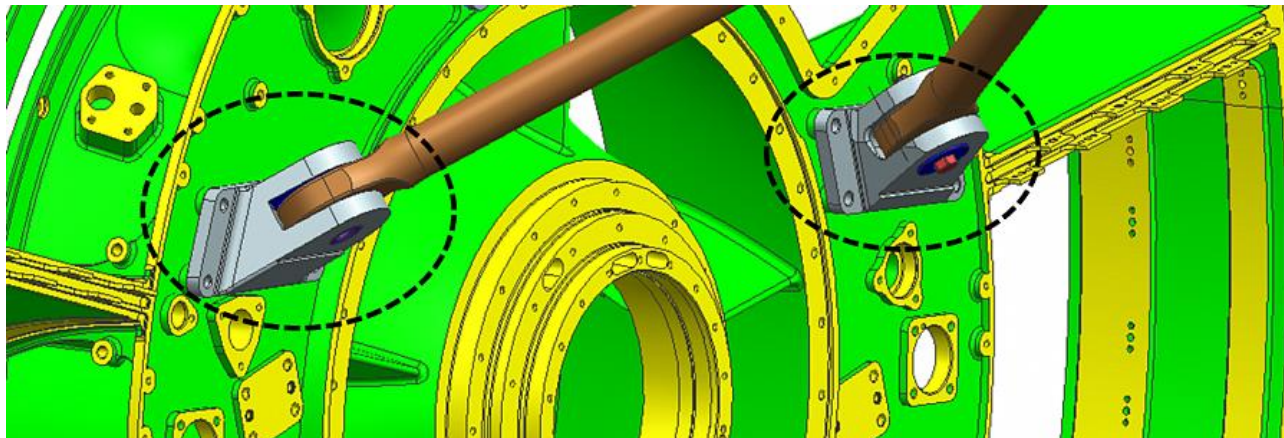


Сравнение измеренного с использованием тензодатчиков напряжения с расчётным





Кронштейн Х13Н5К9М4



Закрепление кронштейна в зоне постановки болтов соединения с корпусом (3)

Нагрузка F действует вдоль тяги. В расчет принимаются случаи нагружения на эксплуатационные (ЭН) и предельные нагрузки (ПН).

Поперечная составляющая нагрузки воспринимается штифтом (Ш).

Свойства материала в расчете упругие.

$$\sigma_{VM} \leq (0,9 * \sigma_{0,2_min})$$

$$\sigma_{VM} \leq (0,9 * \sigma_{B_min})$$

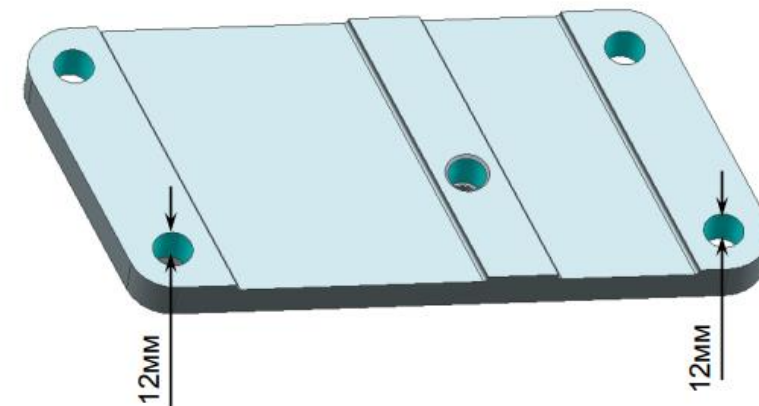
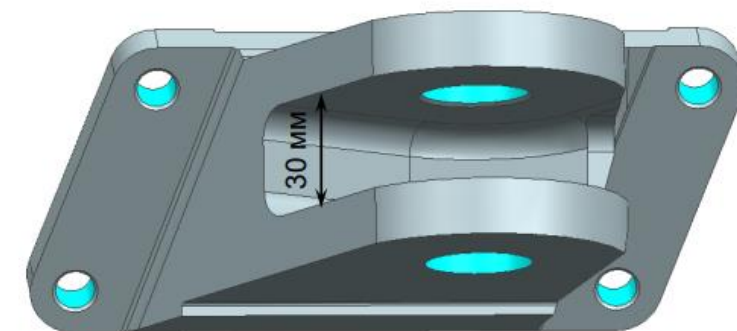
Модуль упругости = 200 000 МПа

Плотность = 7800 кг/м³

Коэффициент Пуассона = 0,3

Предел прочности не менее $\sigma_{B_min} = 1310$ МПа

Предел текучести не менее $\sigma_{0,2_min} = 1170$ МПа

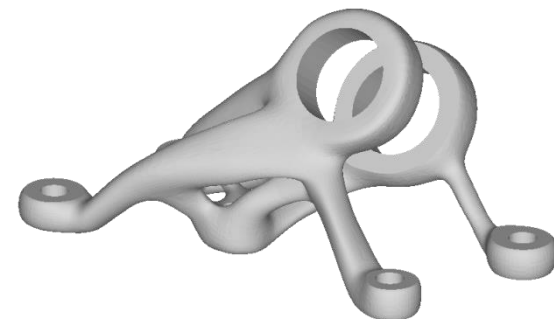


ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРОНШТЕЙНА ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

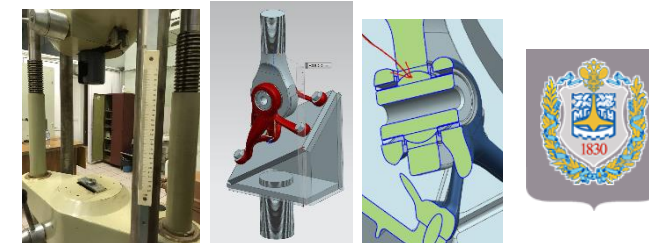


Количество элементов: 180170
Количество узлов: 110610

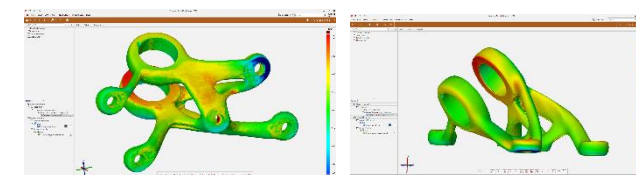
Результат оптимизации



Деталь в составе компоновки



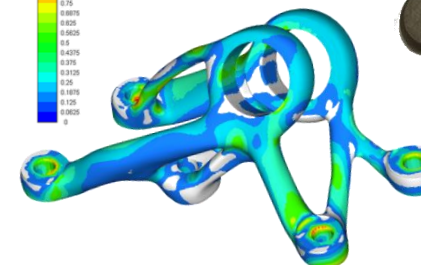
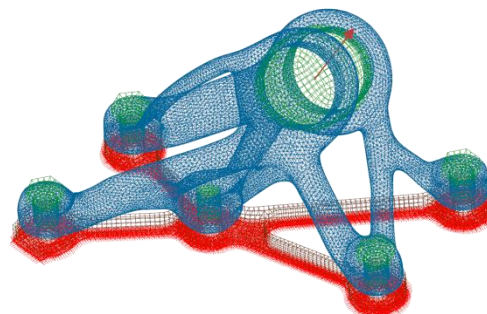
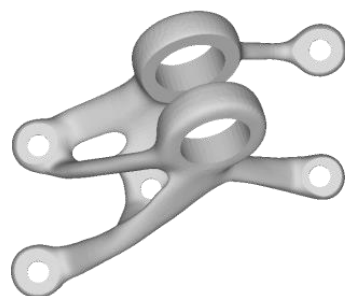
RANGE vision



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 BT-6, **рекомендуется применить титан в качестве конструкционного материала**, тем самым снизить массу еще в 1,4 раза без потери прочности.

Проверочный расчет

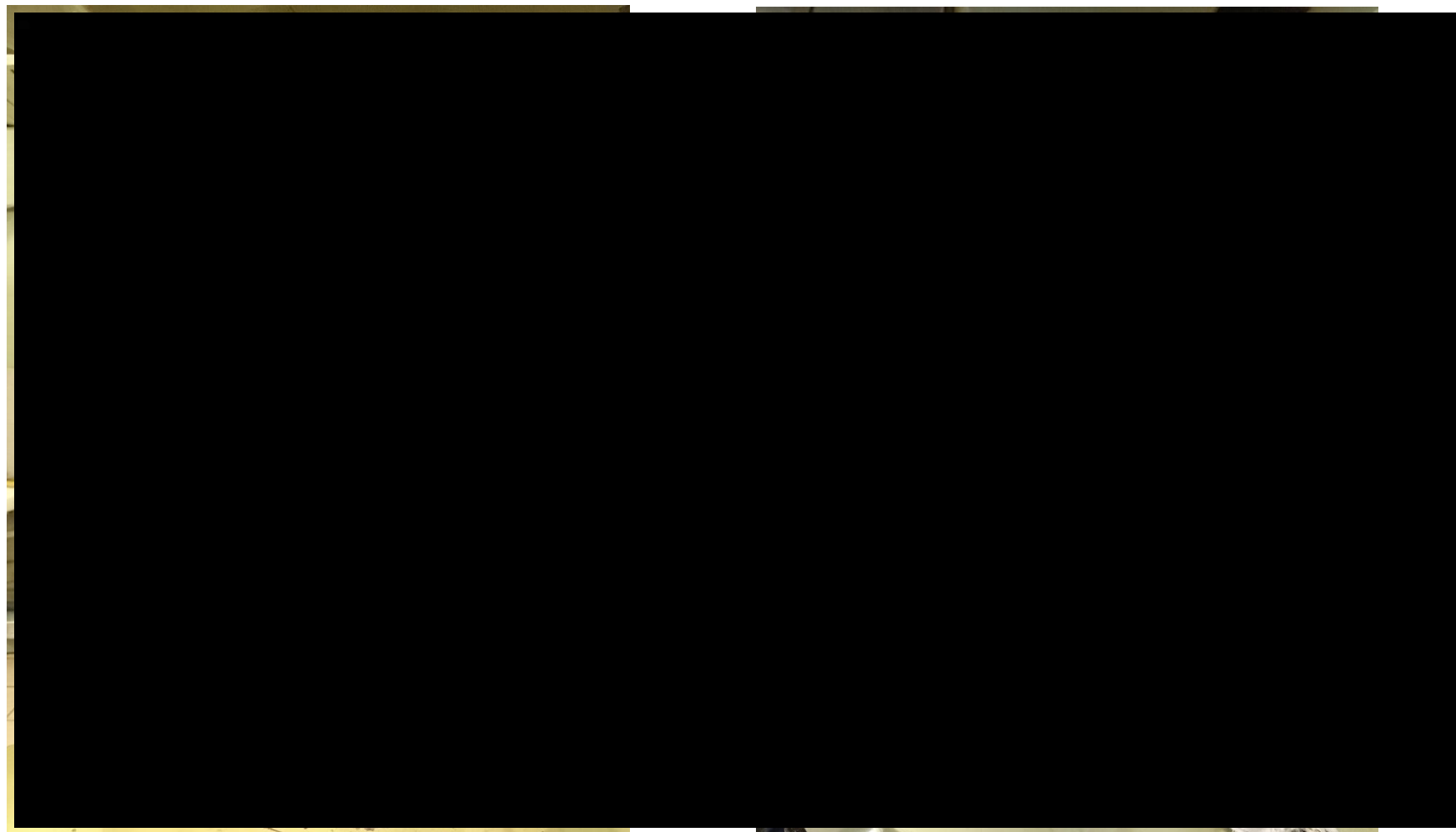
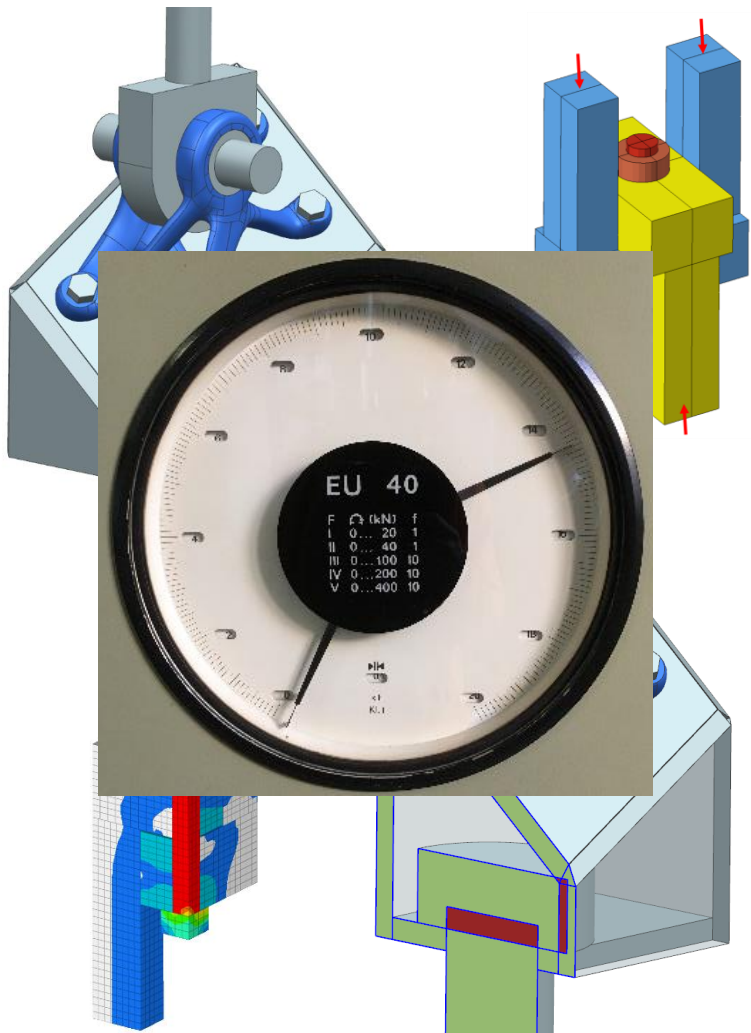




RANGEvision



Кронштейн Х13Н5К9М4

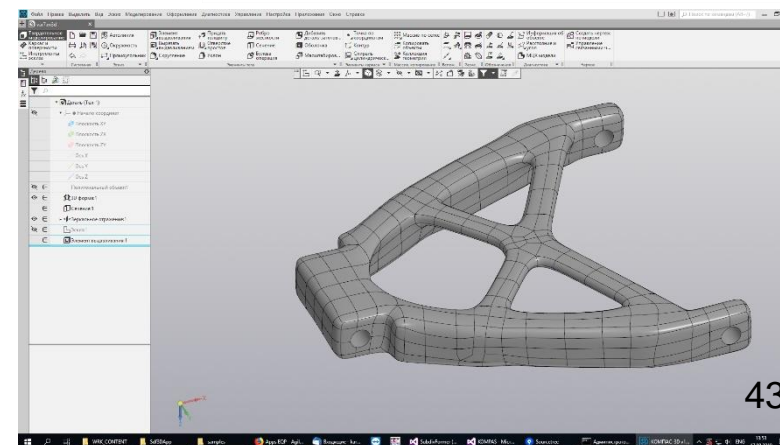
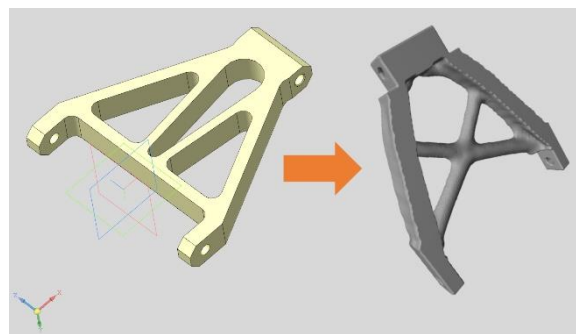
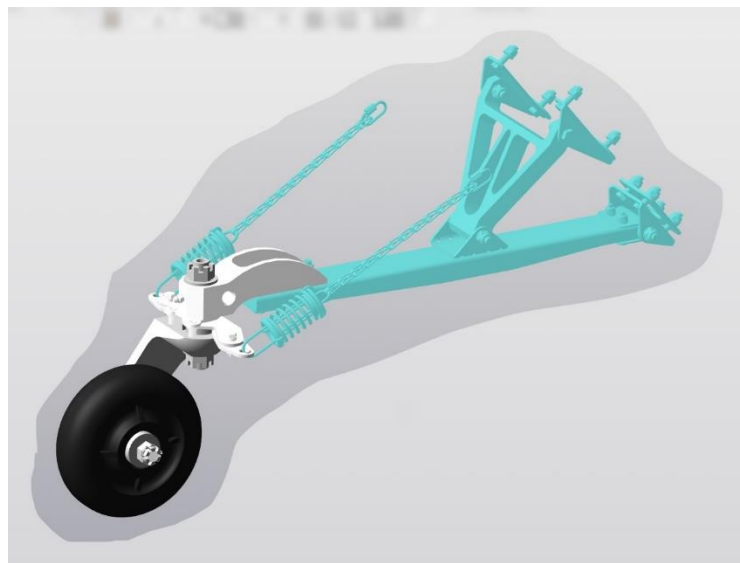
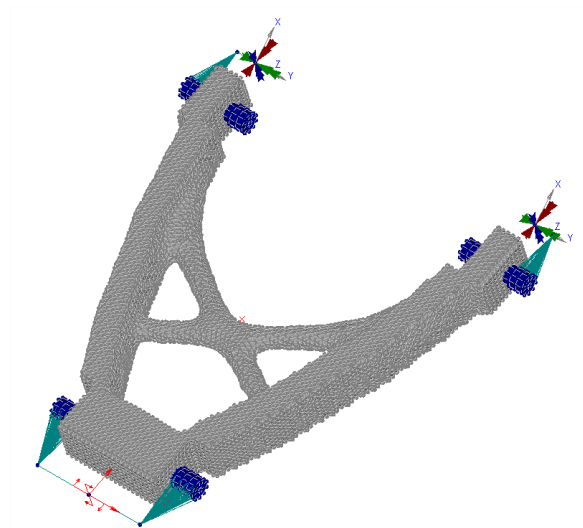
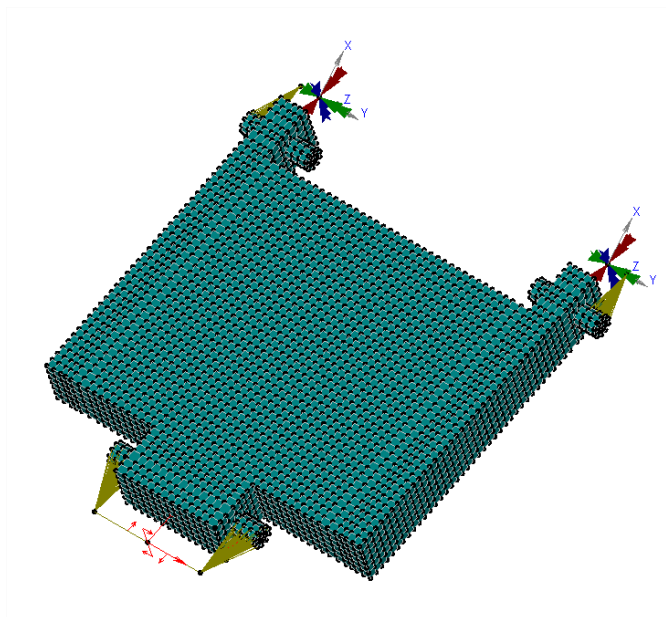
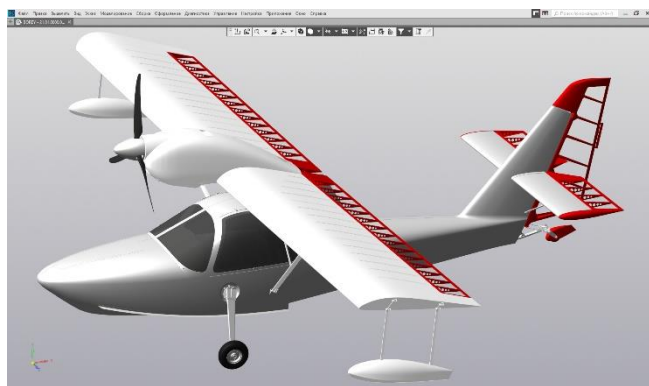




АЭРОВОЛГА



«Борей» - подкос

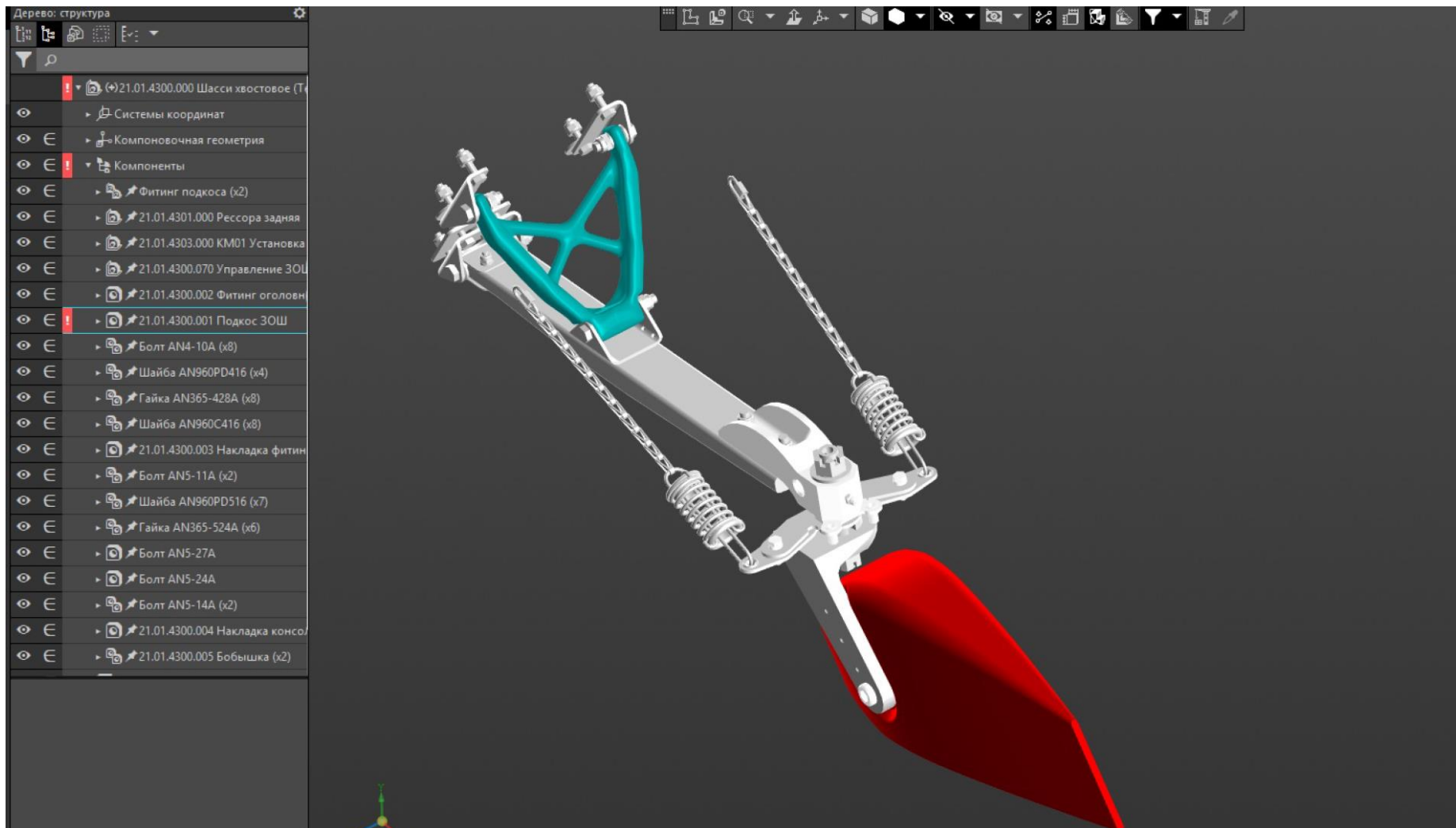




АЭРОВОЛГА



«Борей» - подкос

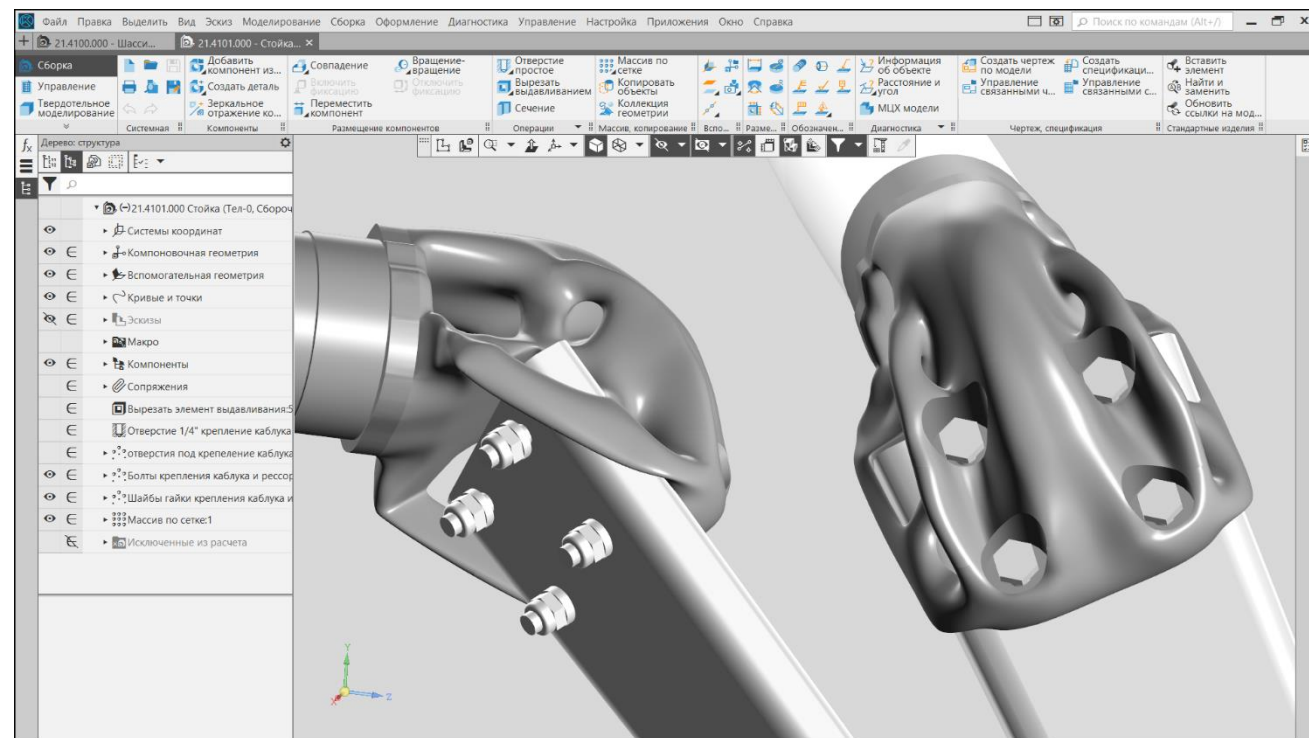
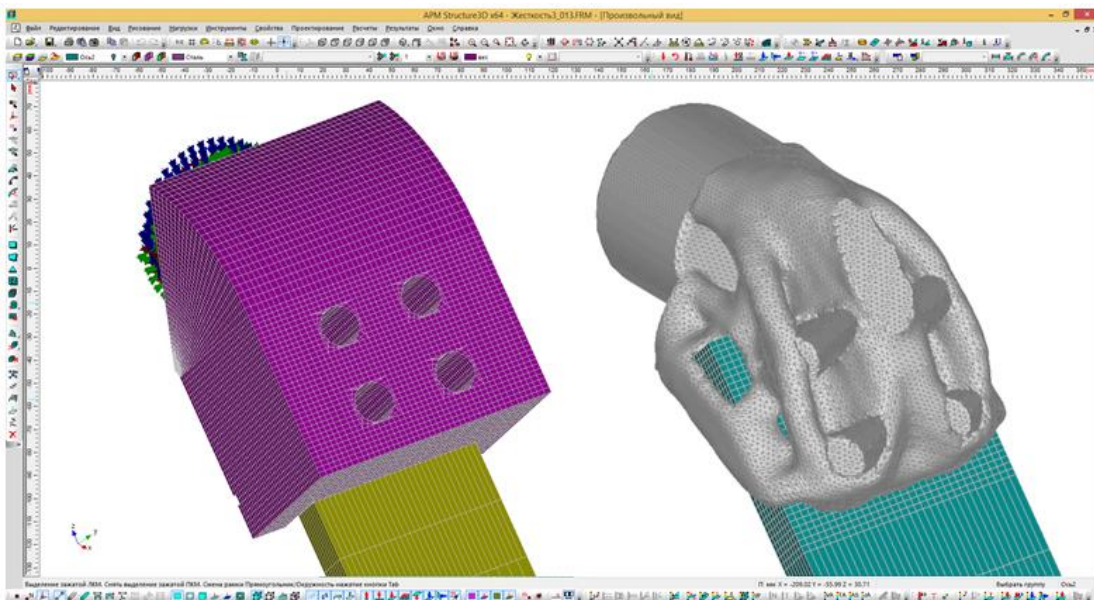
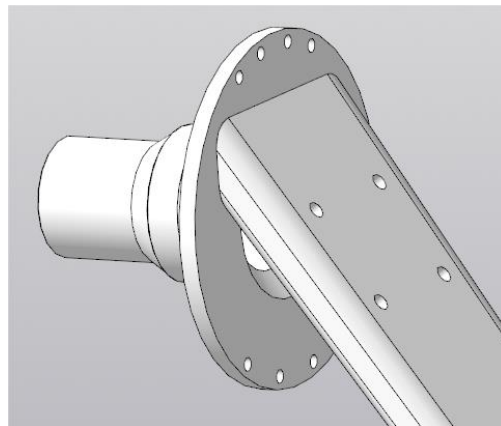
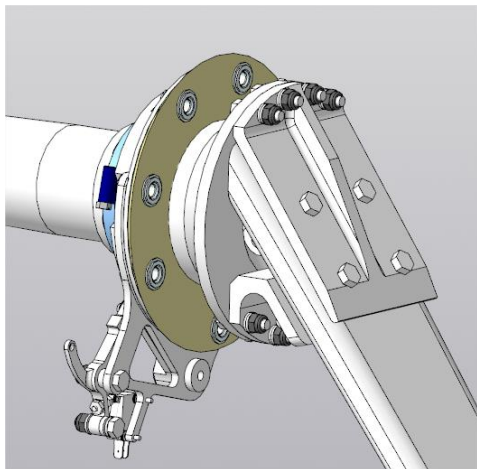




АЭРОВОЛГА



«Борей» - узел шасси

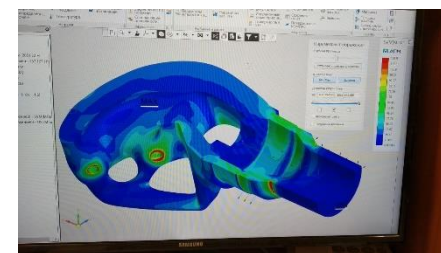
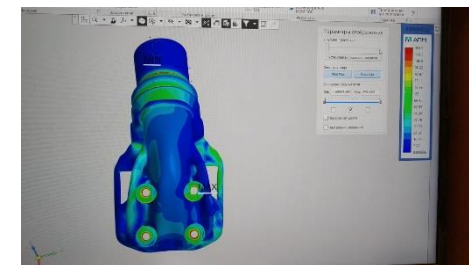
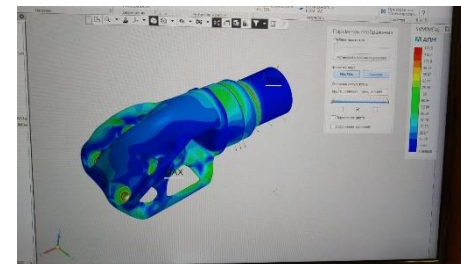




АЭРОВОЛГА

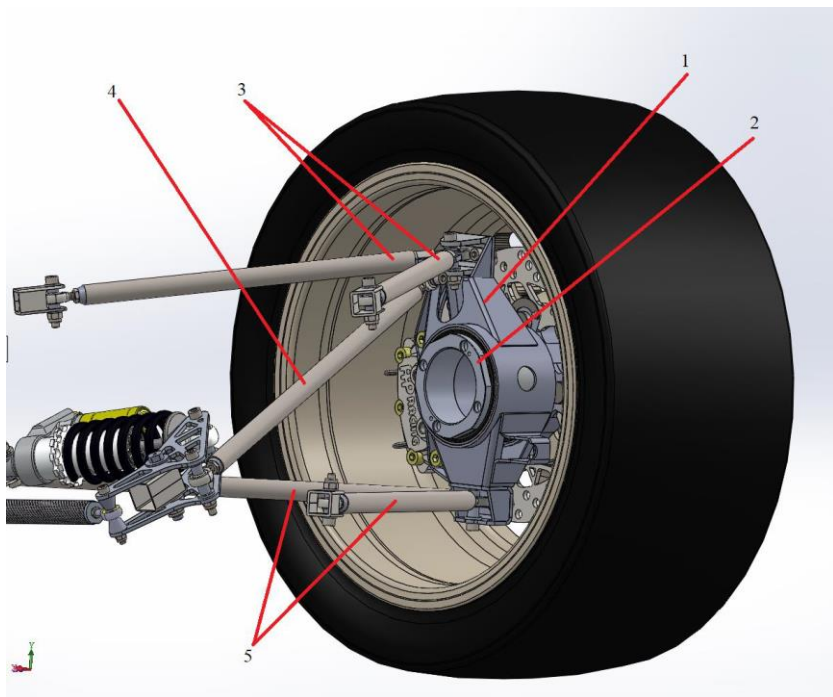


«Борей» - узел шасси



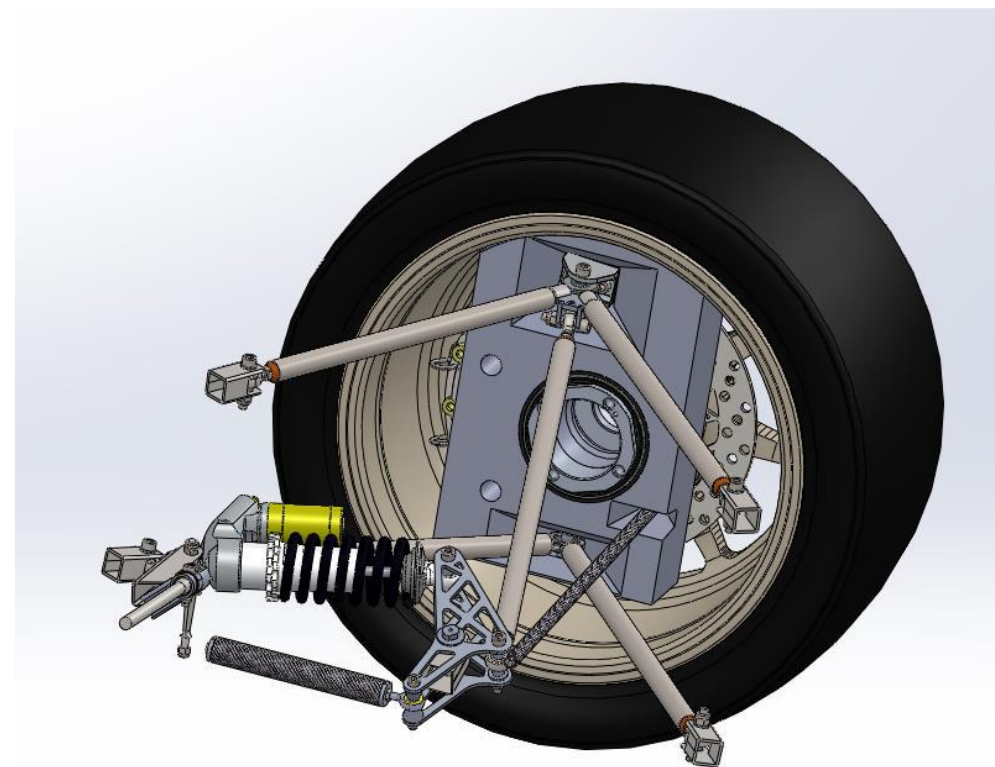


Поворотный кулак независимой подвески автомобиля класса «Формула Студент»



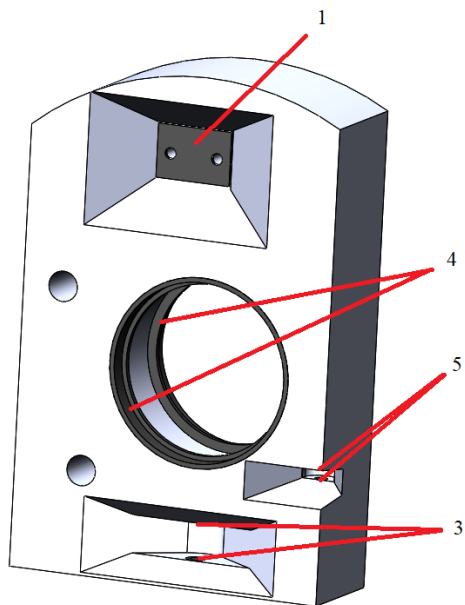
Общий вид колёсно-ступичного узла болида.

1 – поворотный кулак, 2 – ступица колеса,
3 – верхний рычаг подвески, 4 – реактивная тяга подвески
(типа «пул род»), 5 – нижний рычаг подвески

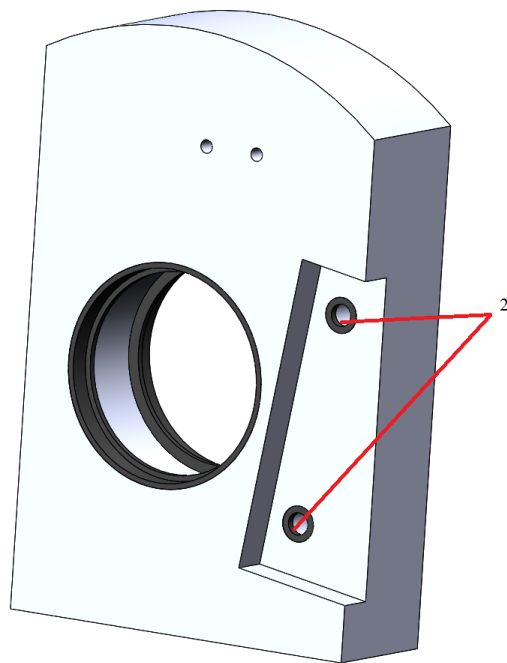




Поворотный кулак независимой подвески автомобиля класса «Формула Студент»

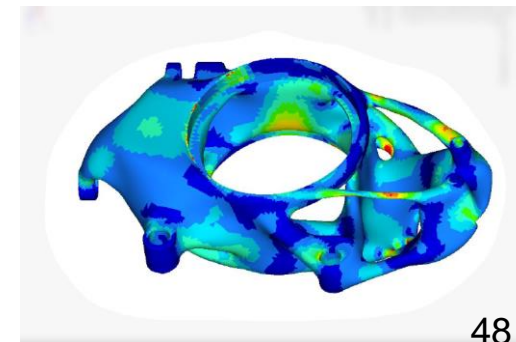
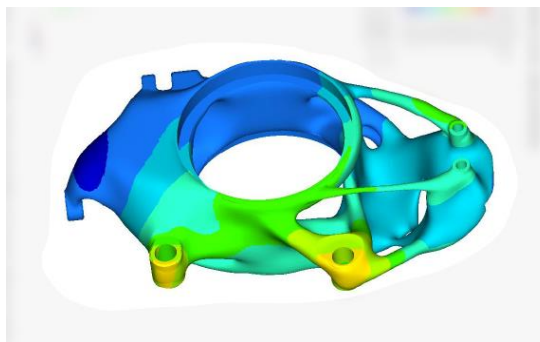


Общий вид пространства проектирования



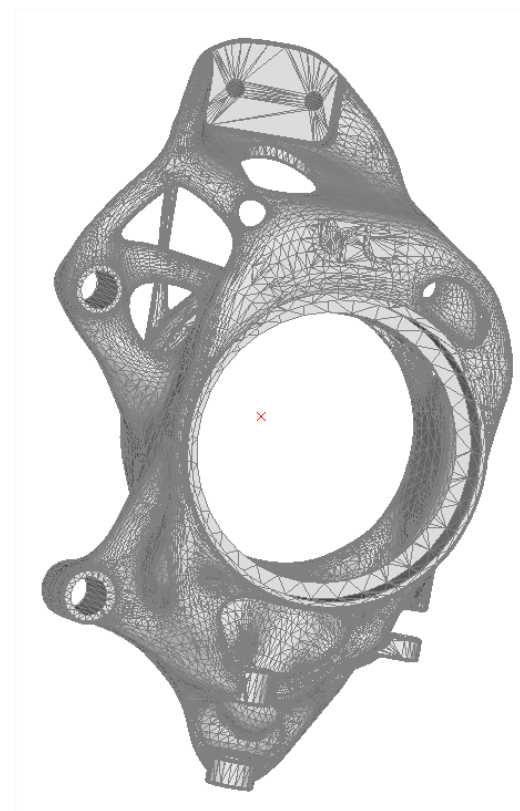
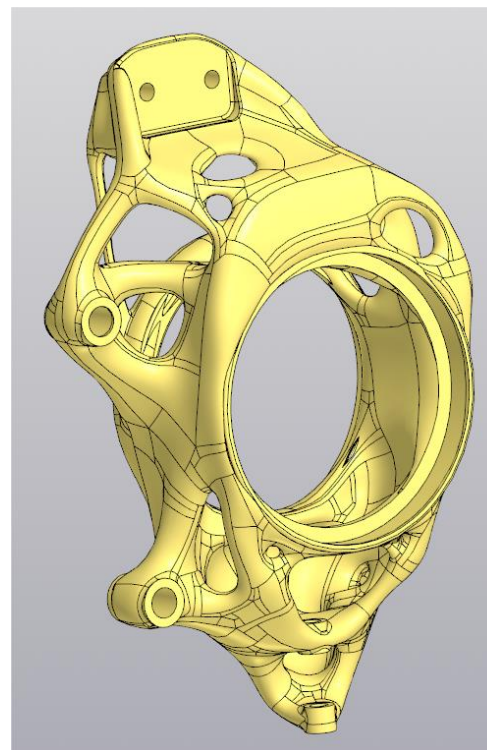
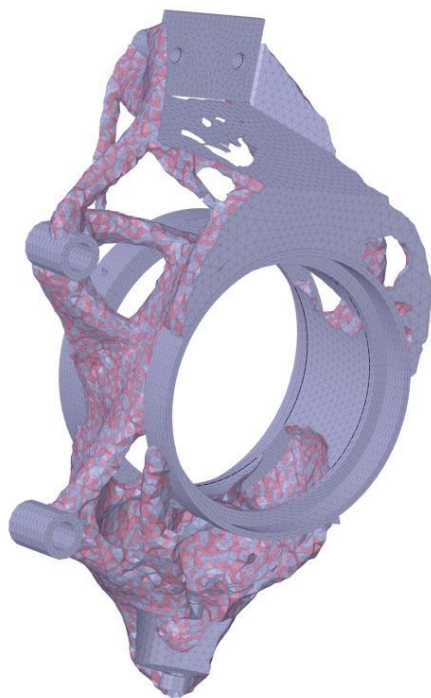
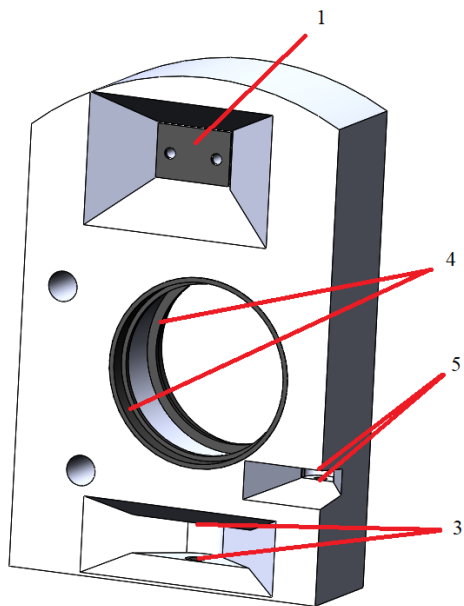
Вид со стороны колеса

	1. Поворот			2. Торможение			3. Поворот + Торможение			4. Поворот руля		
Подшипник	Реакция вдоль оси, Н			Реакция вдоль оси, Н			Реакция вдоль оси, Н			Реакция вдоль оси, Н		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Внутренний	0	9488	0	0	910	625	0	9976	590	293	498	573
Внешний	2155	-9488	0	-366	-4144	556	2155	-12488	525	326	-543	-614
Тангенциальная сила в центре пятна контакта тормоза	0	0	0	0	4335	0	0	4092	0	0	0	0



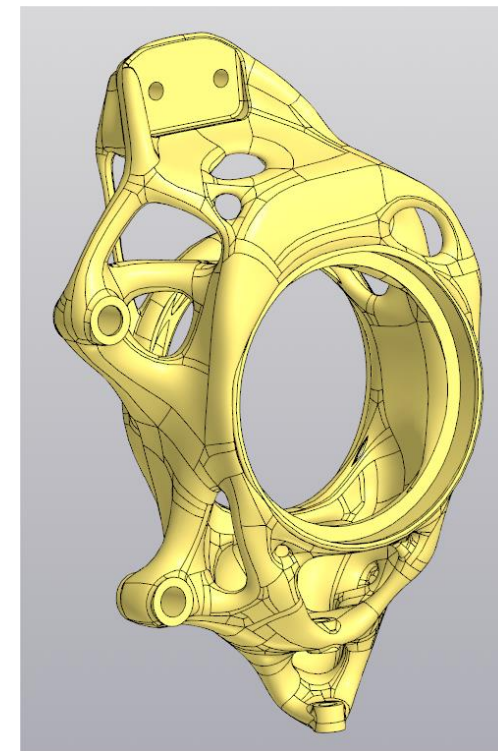
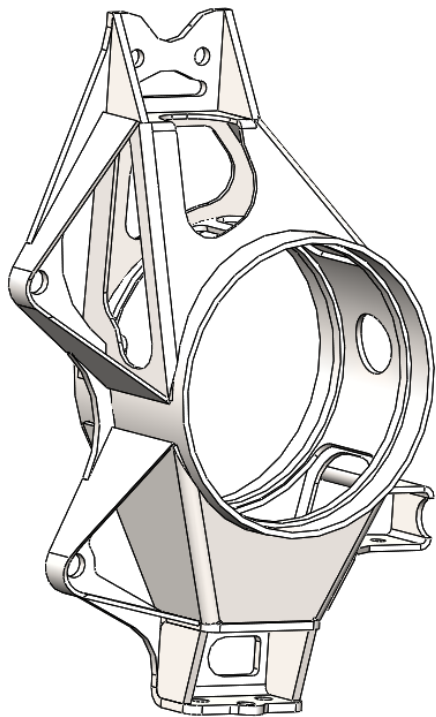


Поворотный кулак независимой подвески автомобиля класса «Формула Студент»



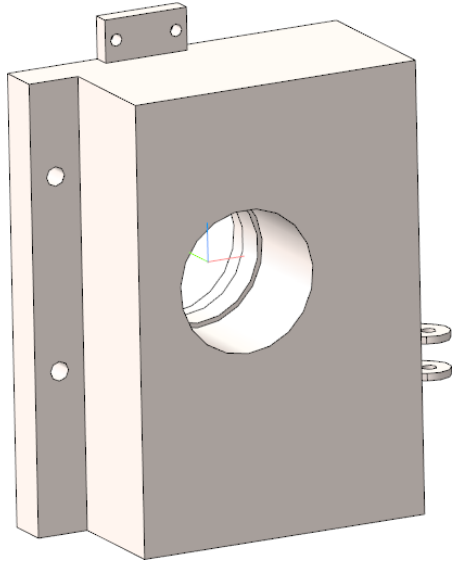


Поворотный кулак независимой подвески автомобиля класса «Формула Студент»

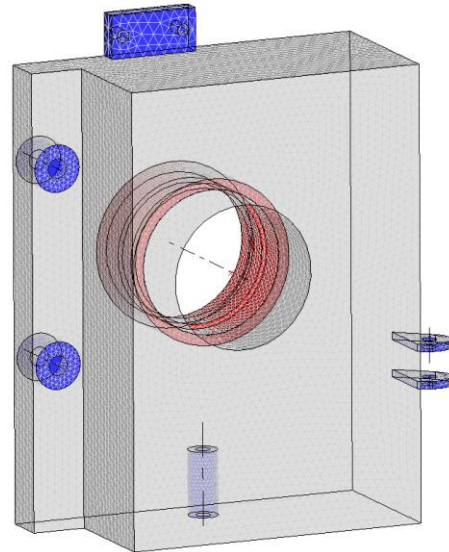




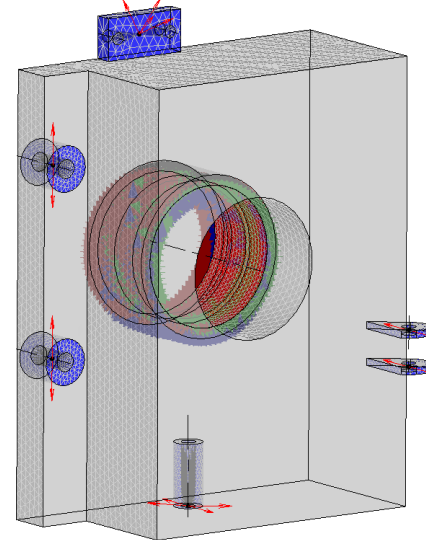
2019 USACM Thematic Conference Topology Optimization Roundtable



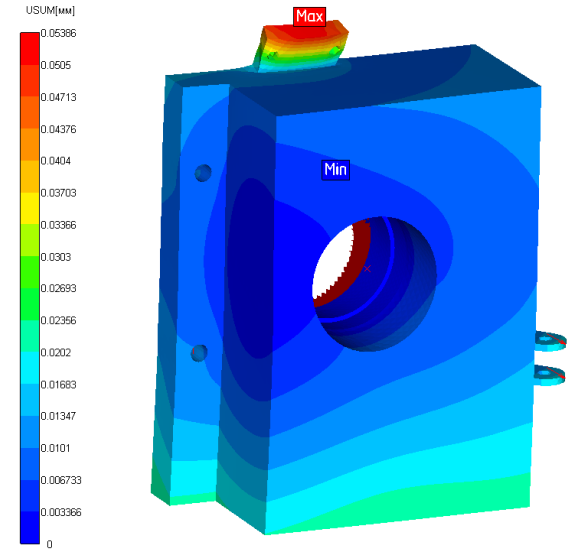
CAD-Модель



Формирование КЭ модели, выделение интерфейсных областей и области проектирования



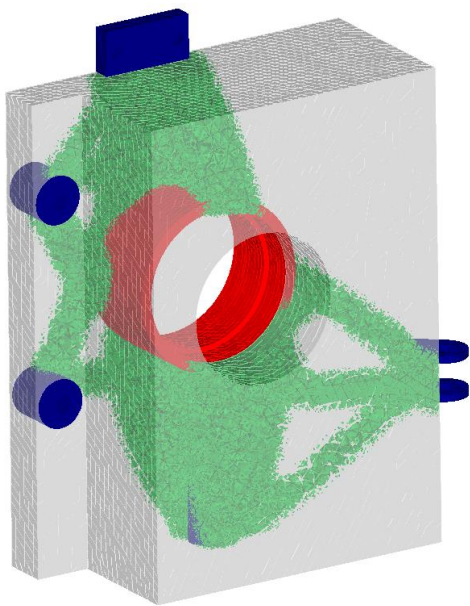
Задание расчётных случаев и закреплений



Предварительный проверочный расчёт



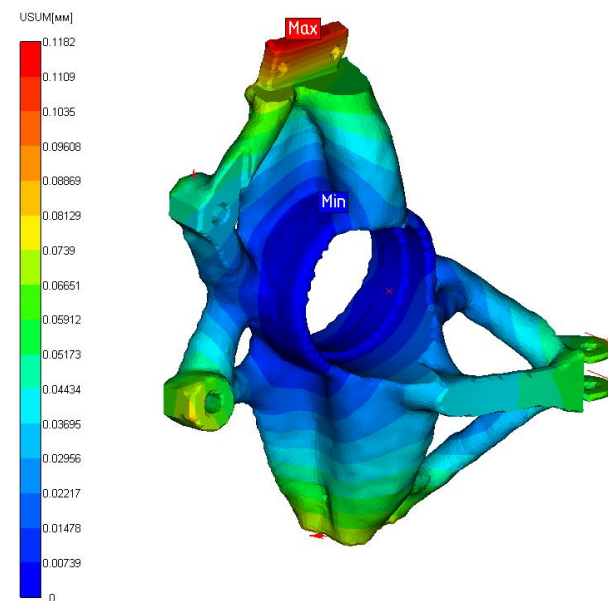
2019 USACM Thematic Conference Topology Optimization Roundtable



Оптимизация,
оценка результатов



Получение новой КЭ модели,
интерпретация результатов
оптимизации

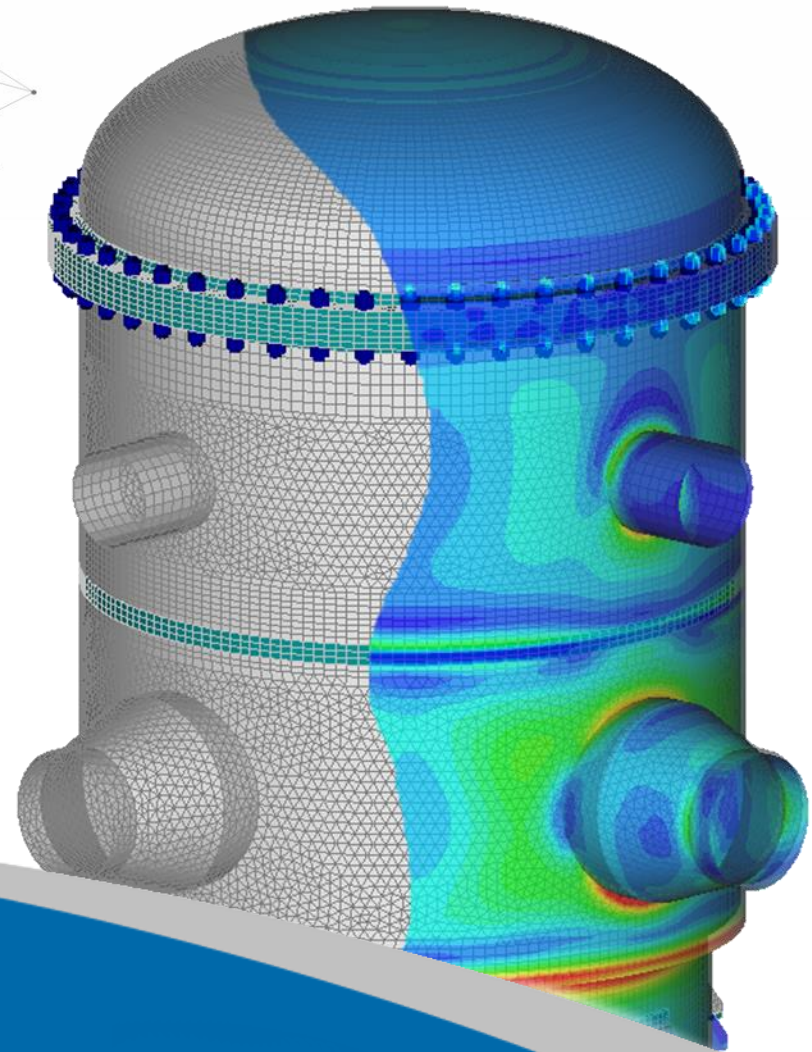


Проверочный расчёт



Итоги

Итоги





Когда и где применять топологическую оптимизацию:

- ✓ **на ранних стадиях проектирования силовых конструкций:**
 - Поиск оптимальных путей передачи нагрузок в силовых системах
 - Синтез силовых схем с учетом компоновки детали в общей конструкции изделия, с учетом технологии изготовления
- ✓ **на поздних стадиях, когда «почти ничего нельзя поменять»:**
 - Увеличение жесткости и прочности деталей без увеличения массы и габаритов, с учетом технологии изготовления
 - Уменьшение массы деталей с минимальной потерей жесткости и прочности
 - Минимально необходимые изменения конструкции при замене материала
(например, увеличение прочности и жесткости при замене стали на алюминиевые сплавы или композиты)

Выдающиеся результаты работ дают (без применения аддитивных технологий (а.т.)):

- 30-40% снижения массы несущих конструкций без снижения прочности и жесткости (до 70% с а.т.);
- в 2-5 раз повышение жесткости и прочности без увеличения массы;
- изменение низших собственных частот в разы (эффективная отстройка от резонанса)



**Необходимо
предусмотреть !все!
расчётные случаи и их
комбинации!!!**



V16 → V17

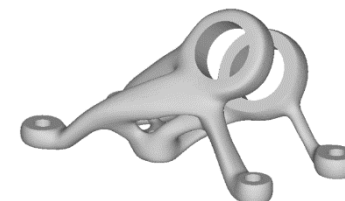
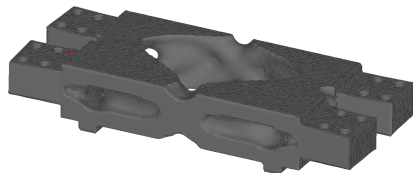
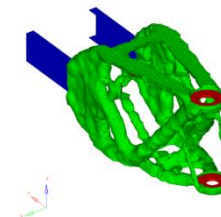
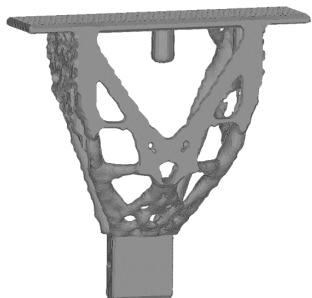
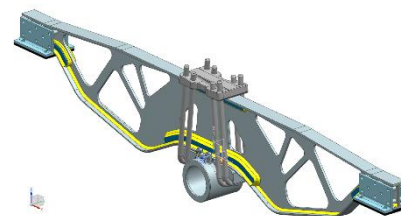
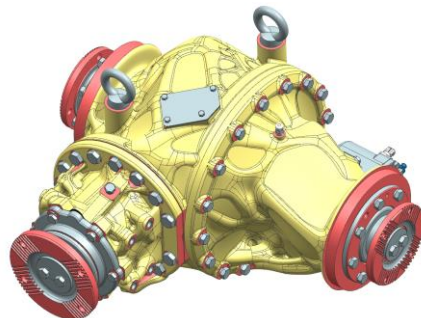
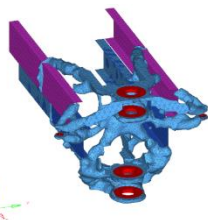
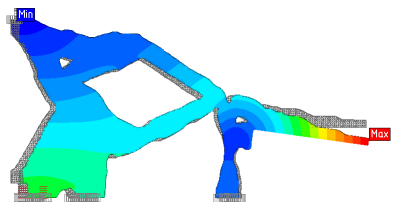
Свойство	Значение
<input type="checkbox"/> Минимальная толщина	
Вкл.	<input checked="" type="checkbox"/>
Значение, [м]	3
<input type="checkbox"/> Максимальная толщина	
Вкл.	<input type="checkbox"/>
Значение, [м]	0
Метод	Ограничение-AUGLAG
<input type="checkbox"/> Симметрия	
Вкл.	<input type="checkbox"/>
X, [м]	1
Y, [м]	0
Z, [м]	0
ПС 2	<input type="checkbox"/>
X2, [м]	0
Y2, [м]	0
Z2, [м]	0
ПС 3	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Штамповка	
Вкл.	<input type="checkbox"/>
X, [м]	0
Y, [м]	1
Z, [м]	0
Точка на плоскости с материалом	<input type="checkbox"/>
X, [м]	0
Y, [м]	0
Z, [м]	0
<input type="checkbox"/> Экструзия	
Вкл.	<input type="checkbox"/>
X, [м]	0
Y, [м]	1
Z, [м]	0
<input type="checkbox"/> 3D-печать	
Вкл.	<input type="checkbox"/>
X, [м]	0
Y, [м]	1
Z, [м]	0
Вес штрафа ЦФ	100

Расчет

	Минимальная толщина	Максимальная толщина	Симметрия 1 плоскость	Симметрия 2/3 плоскости	Штамповка	Экструзия	3д печать
Минимальная толщина	V16	V16	V16	V17	V16	V17	V17
Максимальная толщина	V16	V16	V17	V17	V17	v17	V17
Симметрия 1 плоскость	V16	V17	V16	V17	-	-	-
Симметрия 2/3 плоскость	V16	V17	V17	V17	-	-	-
Штамповка	V16	V17	-	-	V16	-	-
Экструзия	V17	V17	-	-	-	V17	-
3д печать	V17	V17	-	-	-	-	V17



Мы знаем как решить ваши задачи



**Компания НТЦ «АПМ»
(научно-технический центр)
Московская область, г. Королев
Октябрьский бульвар, д. 14, офис 6
Тел.: (495) 120-58-10
Internet: www.apm.ru
E-mail: com@apm.ru**



Спасибо за внимание!

**Компания НТЦ «АПМ»
(научно-технический центр)
Московская область, г. Королев
Октябрьский бульвар, д. 14, офис 6
Тел.: (495) 120-58-10
Internet: www.apm.ru
E-mail: com@apm.ru**