

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание академической степени
МАГИСТРА

Тема:

Структурная оптимизация композиционных материалов
в программной среде OptiStruct

Направление: 150300 – Прикладная механика

Магистерская программа: 151600.68.01 – Вычислительная механика

Выполнил студент гр. 6055/11

Руководитель, к.т.н., проф.

Соруководитель, асс.

Д.С. Сачава

А.И. Боровков

А.С. Алексашкин

Консультанты:

По истории механики, к.ф.-м.н., проф.

По вопросам охраны труда, к.т.н., доц.

Б.А. Смольников

В.В. Монашков

Структурная оптимизация

OptiStruct решает следующую структурную проблему оптимизации:

$$\min f(\bar{x}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$g_j(\bar{x}) \leq 0, j = 1 \dots m$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, i = 1 \dots n$$

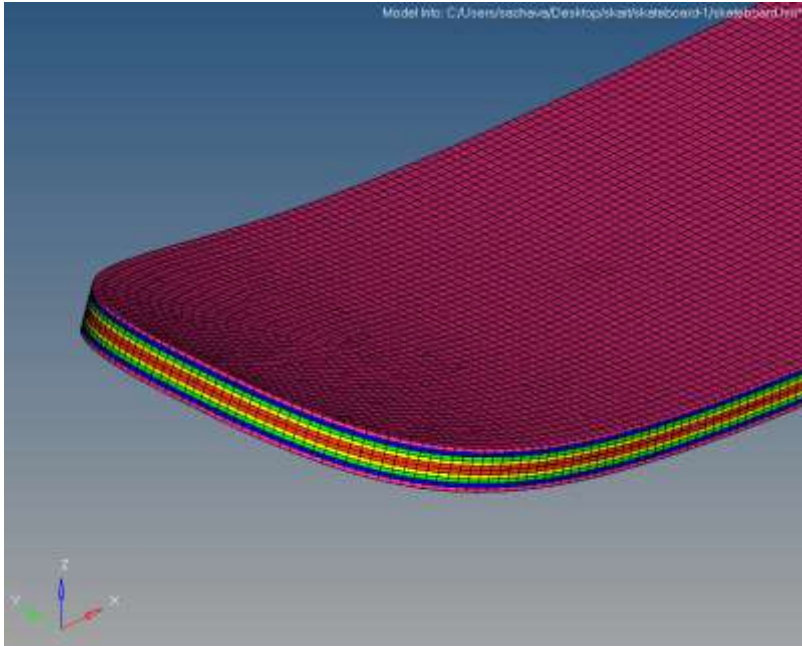
Целевая функция $f(\bar{x})$ и функции ограничений $g(\bar{x})$ – это определенные величины (их значения в каждом узле), получаемые путем конечно-элементного анализа.

Выбор вектора переменных дизайна (x) зависит от типа выполняемой оптимизации. В топологической оптимизации переменная дизайна – необходимый коэффициент плотность материала в элементах, во Free size optimization – толщина слоев в элементах.

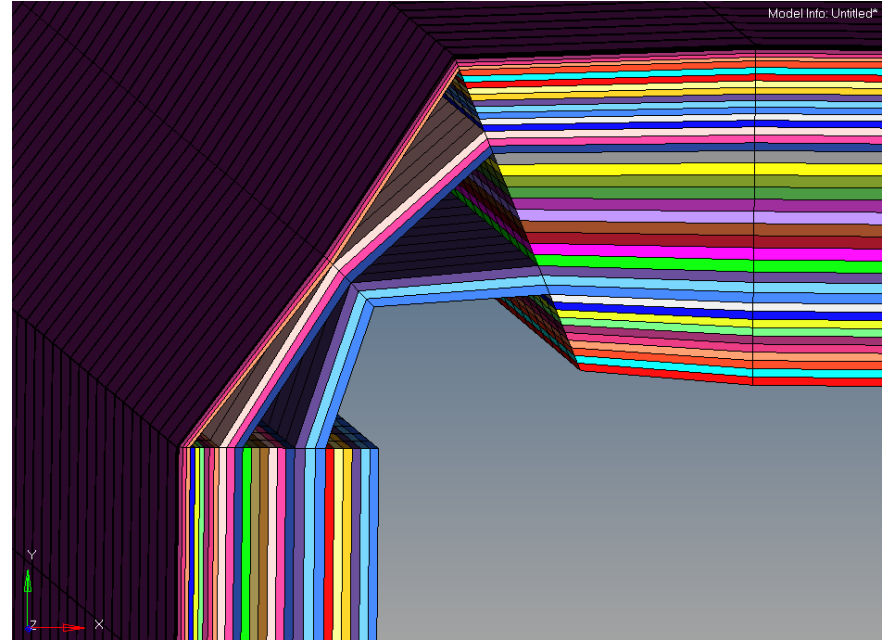
OptiStruct решает проблему структурной оптимизации используя метод плотности (Density method), известный, так же, как SIMP method (Solid Isotropic Material with Penalty)

Рассматриваемые задачи

Оптимизация скейтборда



Оптимизация П-балки



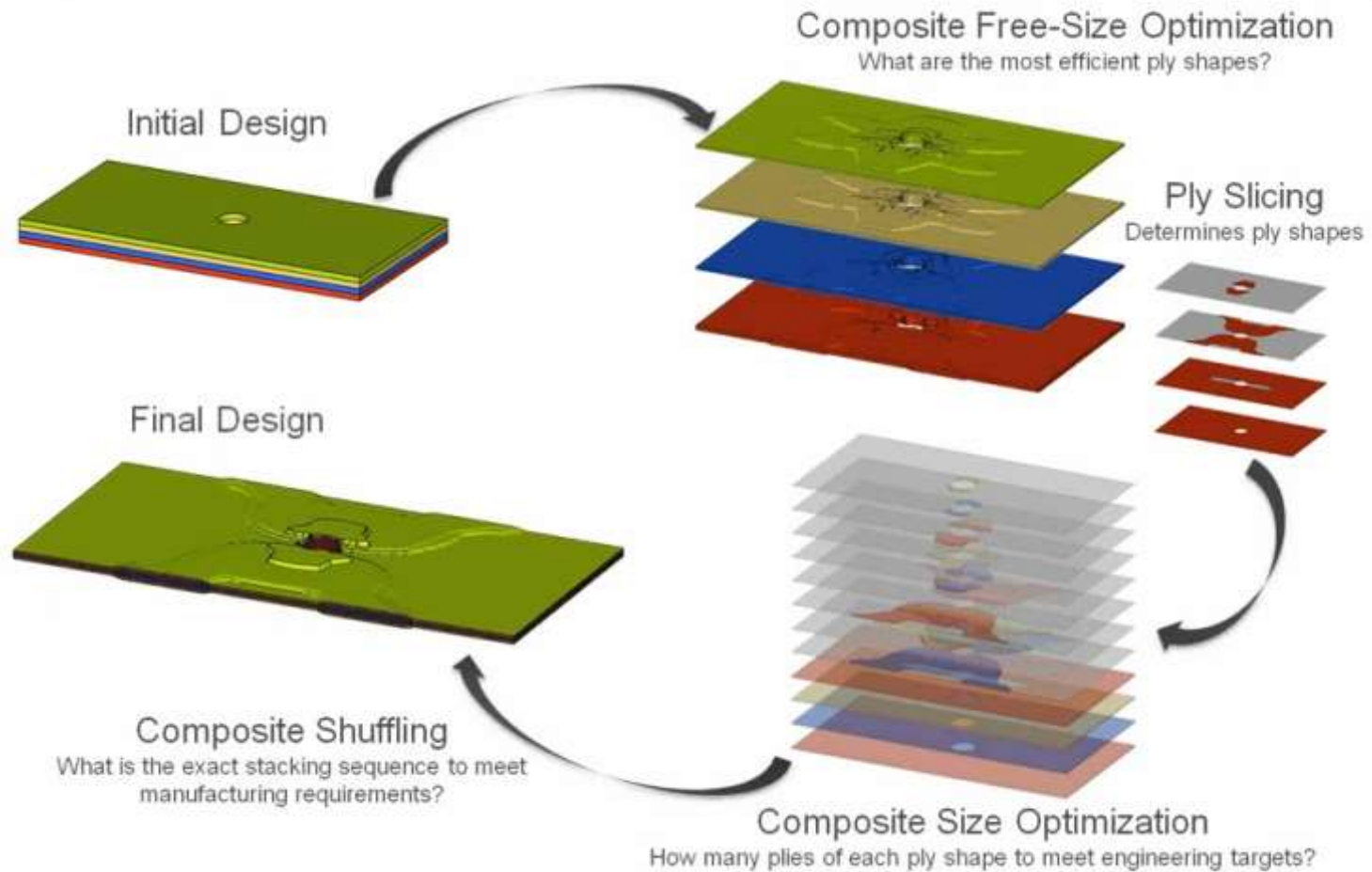
Цели работы:

- решение задач оптимизации композиционных конструкций,
- освоение инновационного программного обеспечения,
- демонстрация его возможностей на конкретных примерах.

Процесс оптимизации в OptiStruct

Copyright © 2013 Altair Engineering, Inc. Patents and Confidential. All rights reserved.

How It's Applied



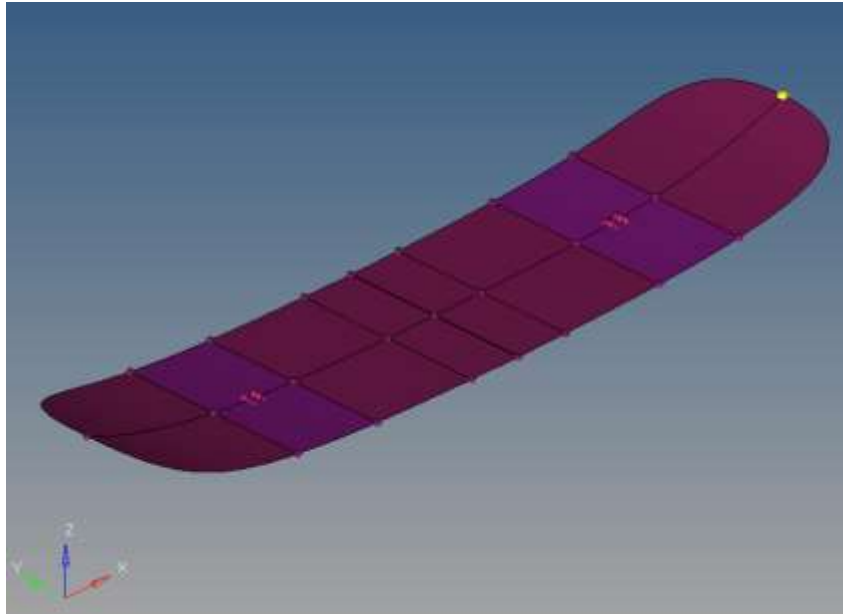
Этапы оптимизации в OptiStruct

1. Free-Size Optimization – оптимизация толщин и форм слоев («суперслоев») композиционного материала

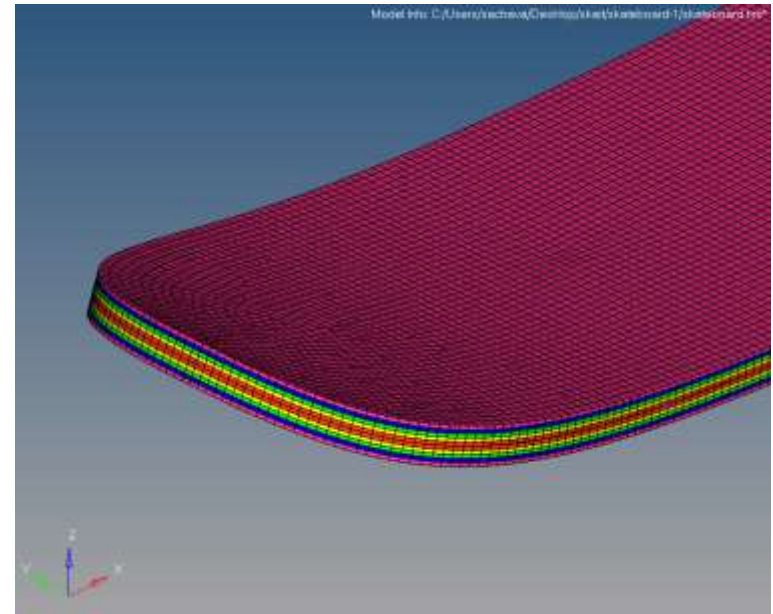
2. Size Optimization - оптимизация толщин и «расщепление» слоев с учетом технологических и производственных ограничений

3. Shuffling Optimization – оптимизация порядка укладки слоев в композите

Моделирование скейтборда



Геометрическая модель скейтборда



Послойная структура скейтборда

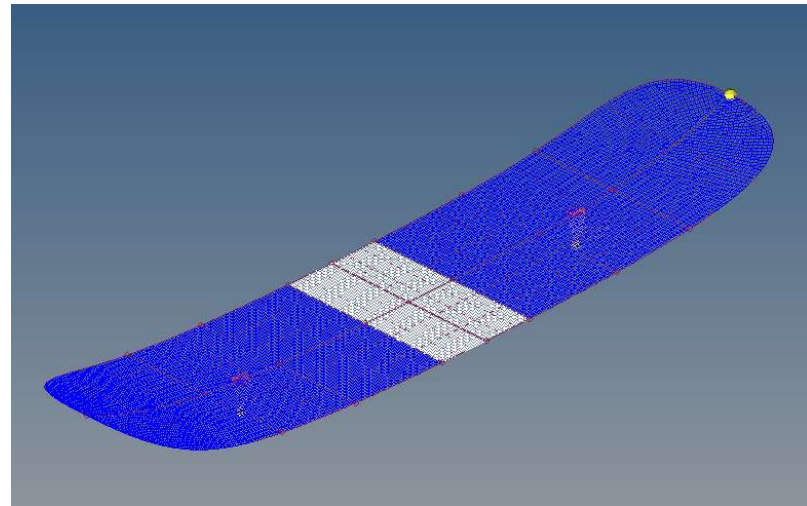
Name	Id	Color	Material	Thickness	Orientation	IP	Result
Ply1	1	■	NewMaterial	2.00000	0.0	3	yes
Ply2	2	■	NewMaterial	2.00000	45.0	3	yes
Ply3	3	■	NewMaterial	2.00000	90.0	3	yes
Ply4	4	■	NewMaterial	2.00000	-45.0	3	yes
Ply5	5	■	NewMaterial	2.00000	0.0	3	yes

Характеристики слоев

Моделирование нагрузок

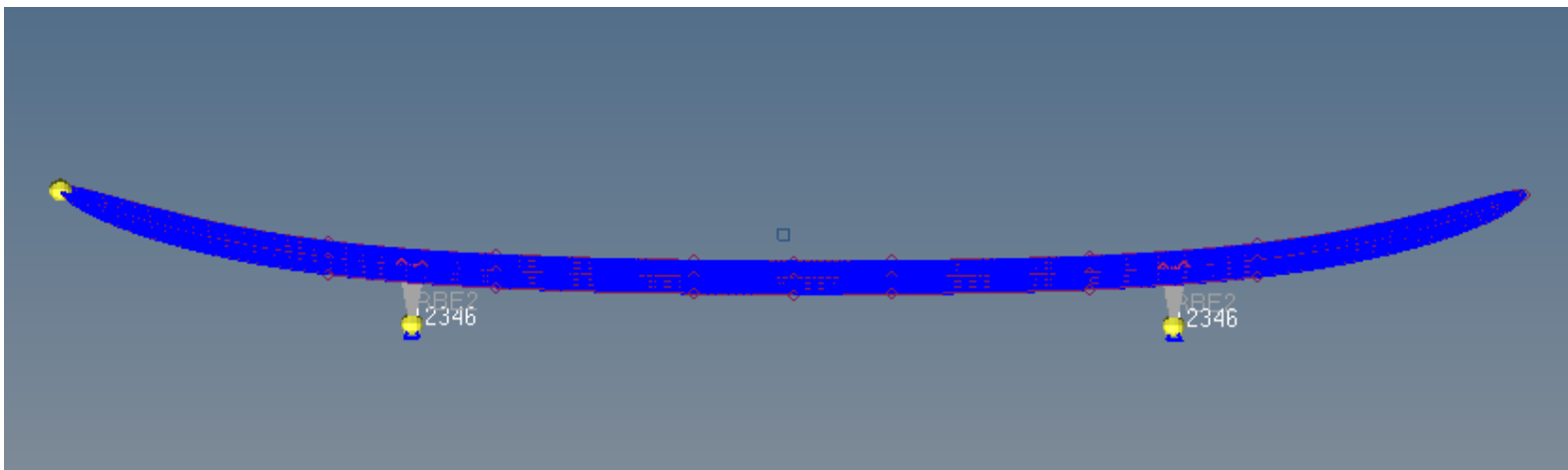
Моделируется два варианта нагрузки

- Разгон – вес сосредоточен по центру скейтборда
- Качение – вес поровну распределен по краям скейта



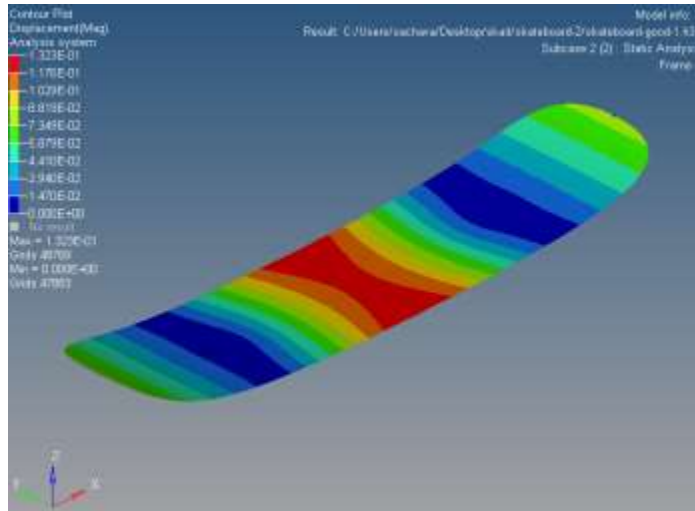
Вес скейтбордиста – 1000 Н.

Моделирование нагрузок, создаваемых скейтбордистом

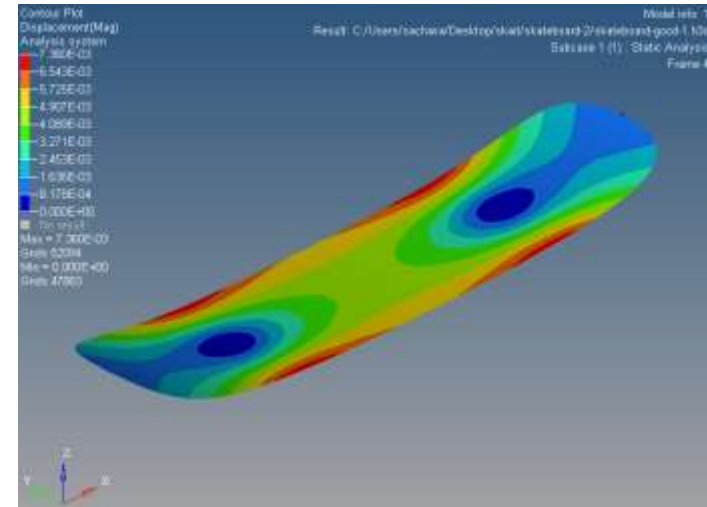


Моделирование колес скейтборда

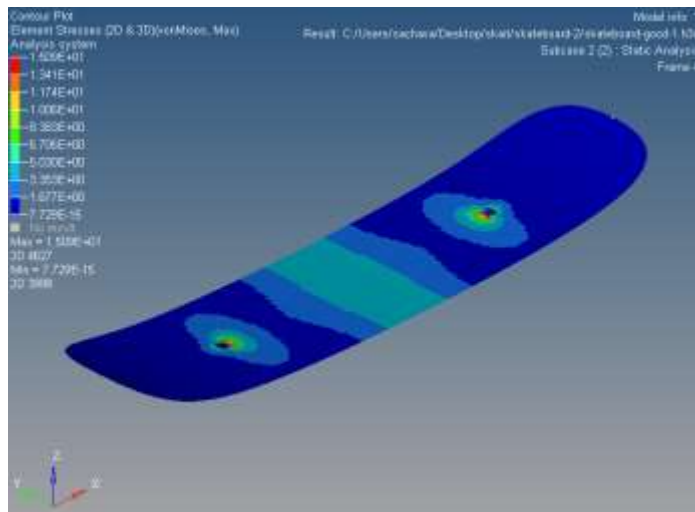
Анализ расчета



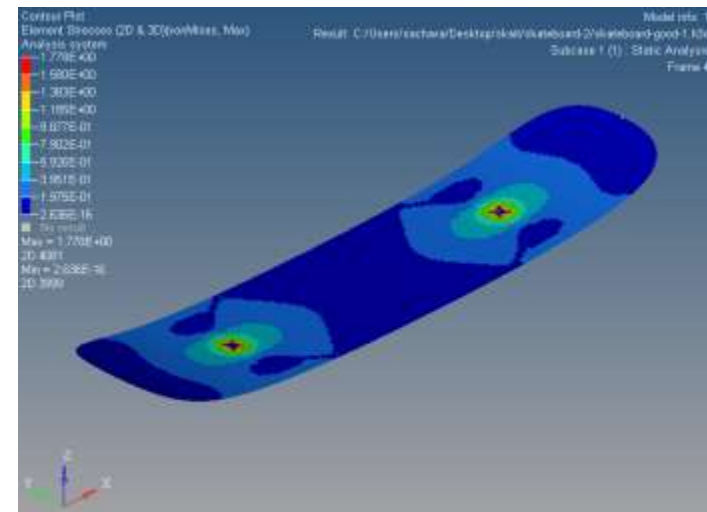
Поле перемещений при разгоне



Поле перемещений при качении



Поле напряжений при разгоне



Поле напряжений при качении

Постановка задачи оптимизации

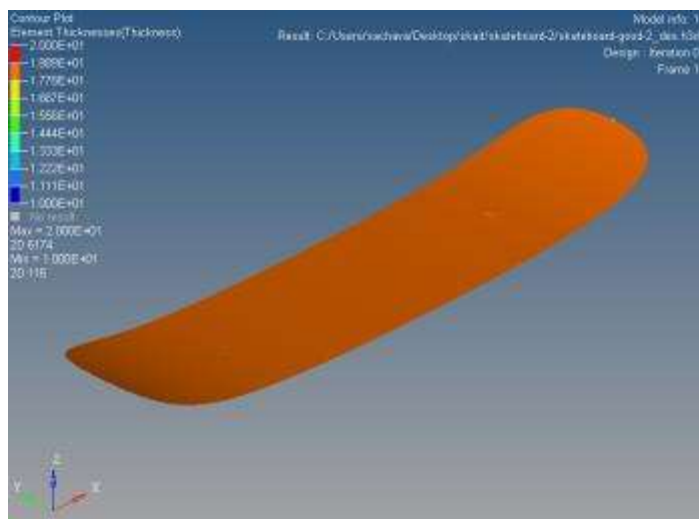
В начальной конфигурации масса скейтборда составляет примерно 4,81 кг, толщина – 20 мм, максимальное перемещение по середине скейтборда при статической нагрузке от 1000 Н – 0,14 мм.

Ограничим допустимое значение прогиба скейтборда в центре значением 0,3 мм.

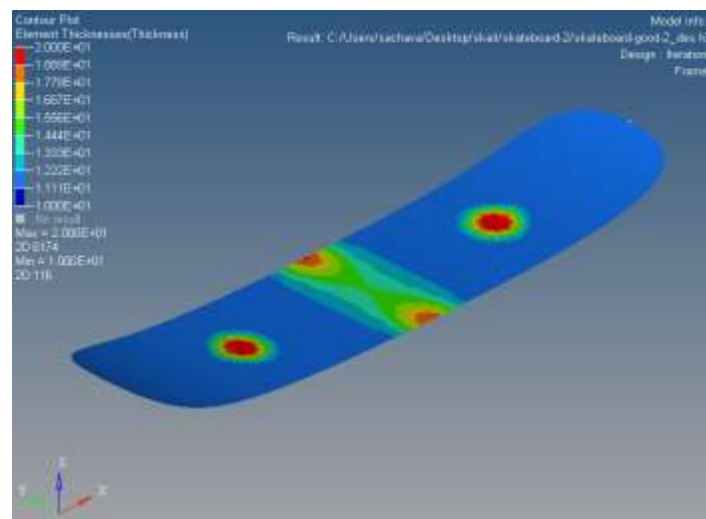
Общая толщина ламината: от 10 до 24 мм

Возможная производственная толщина каждого слоя – 0,5 мм, т.е. каждый слой может быть толщиной 0,5 мм, 1 мм, 1,5 мм и т.д.

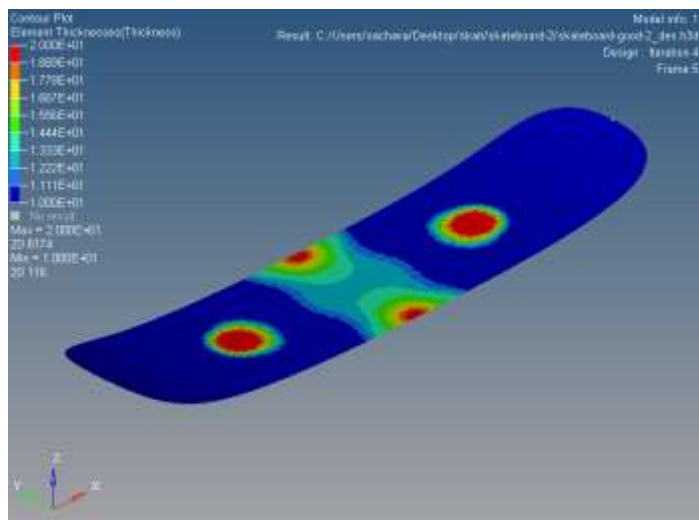
Free-Size Optimization – процесс оптимизации толщины



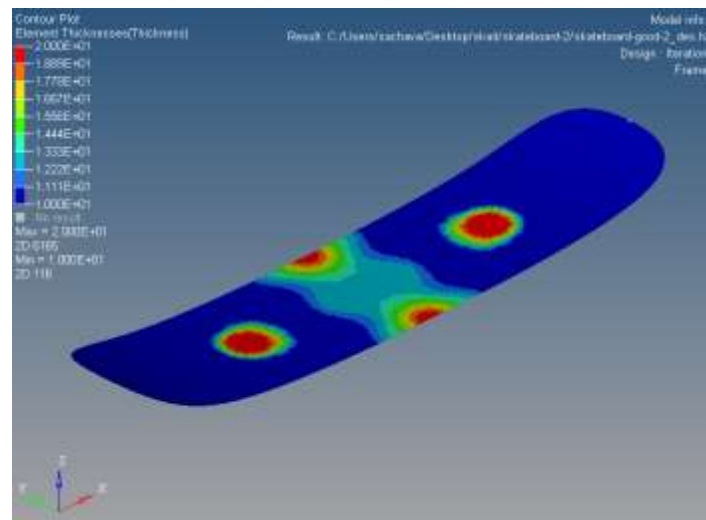
Итерация №0 – начальная конфигурация



Итерация №1

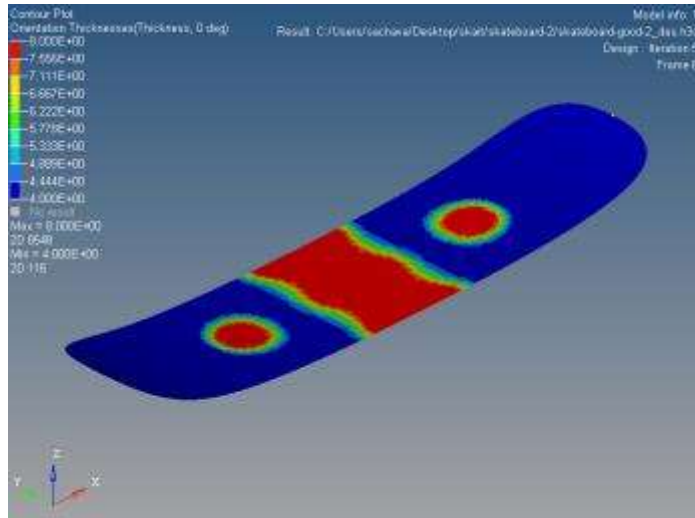


Итерация №3

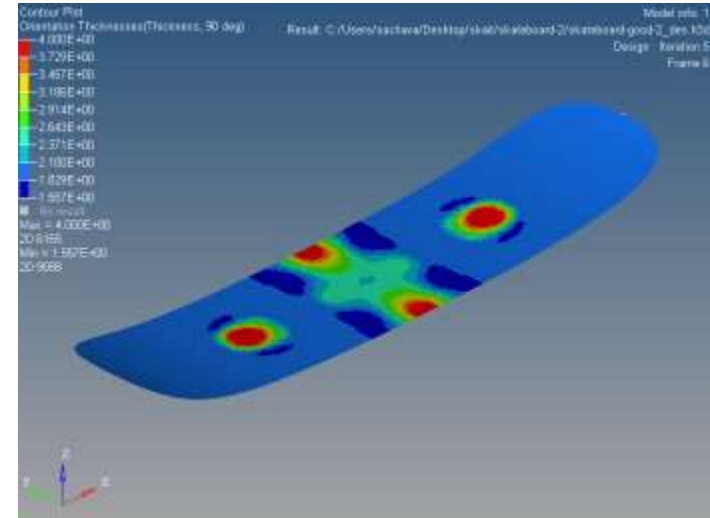


Итерация №5 – финальный дизайн

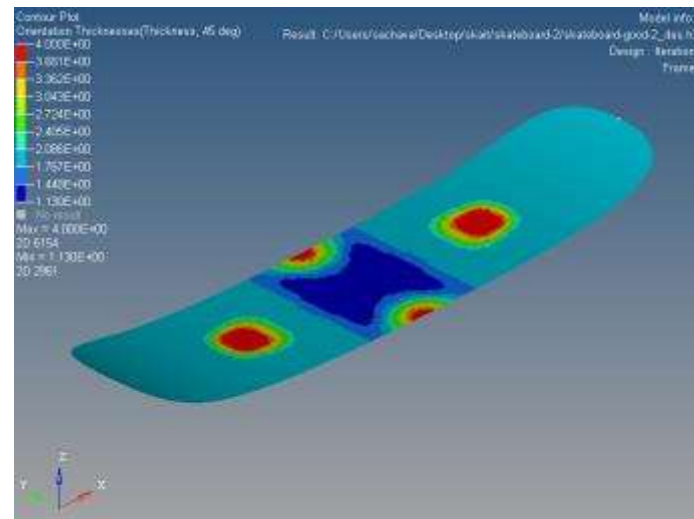
Free-Size Optimization – толщины слоев



Толщина слоя с направлением 0

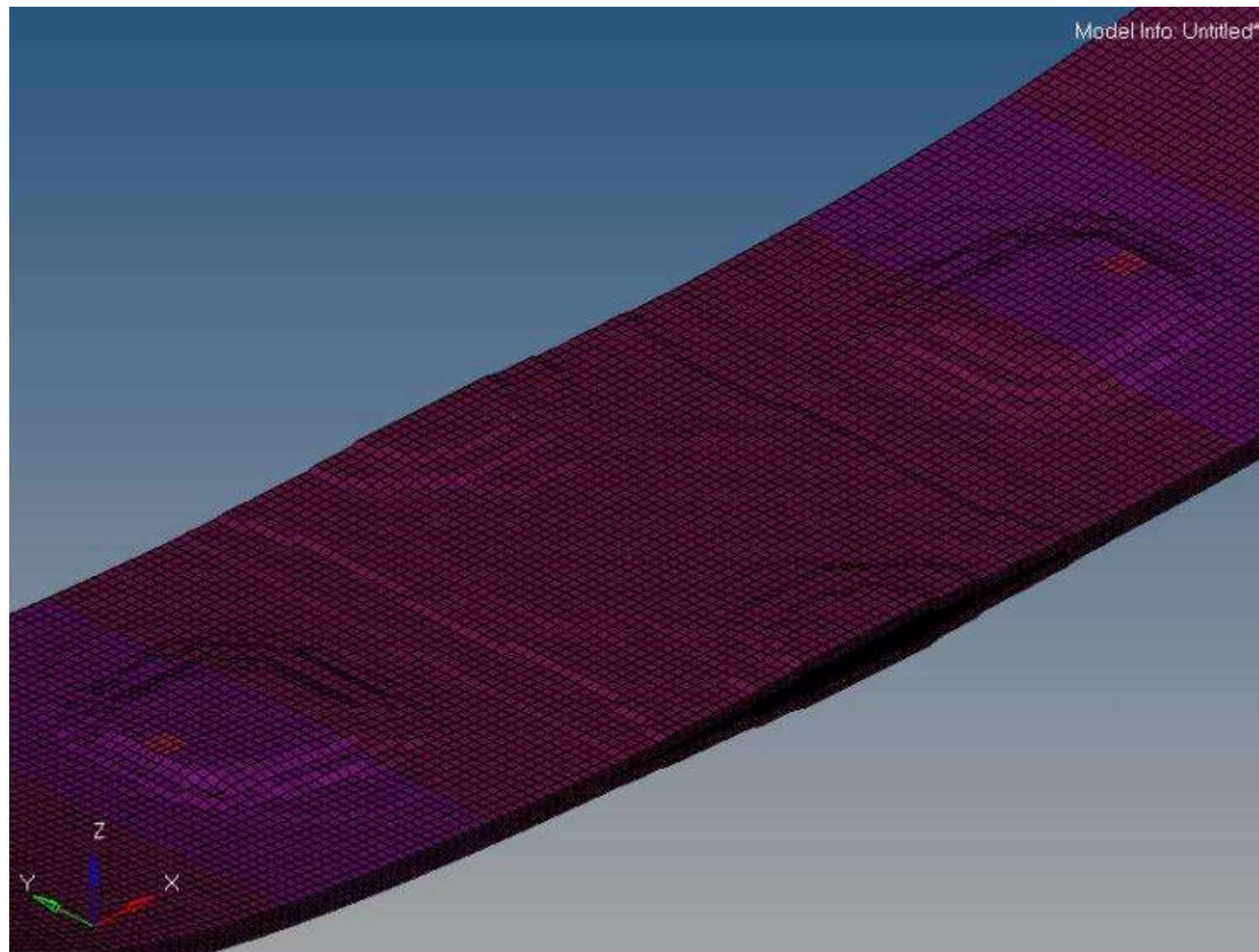


Толщина слоя с направлением 90

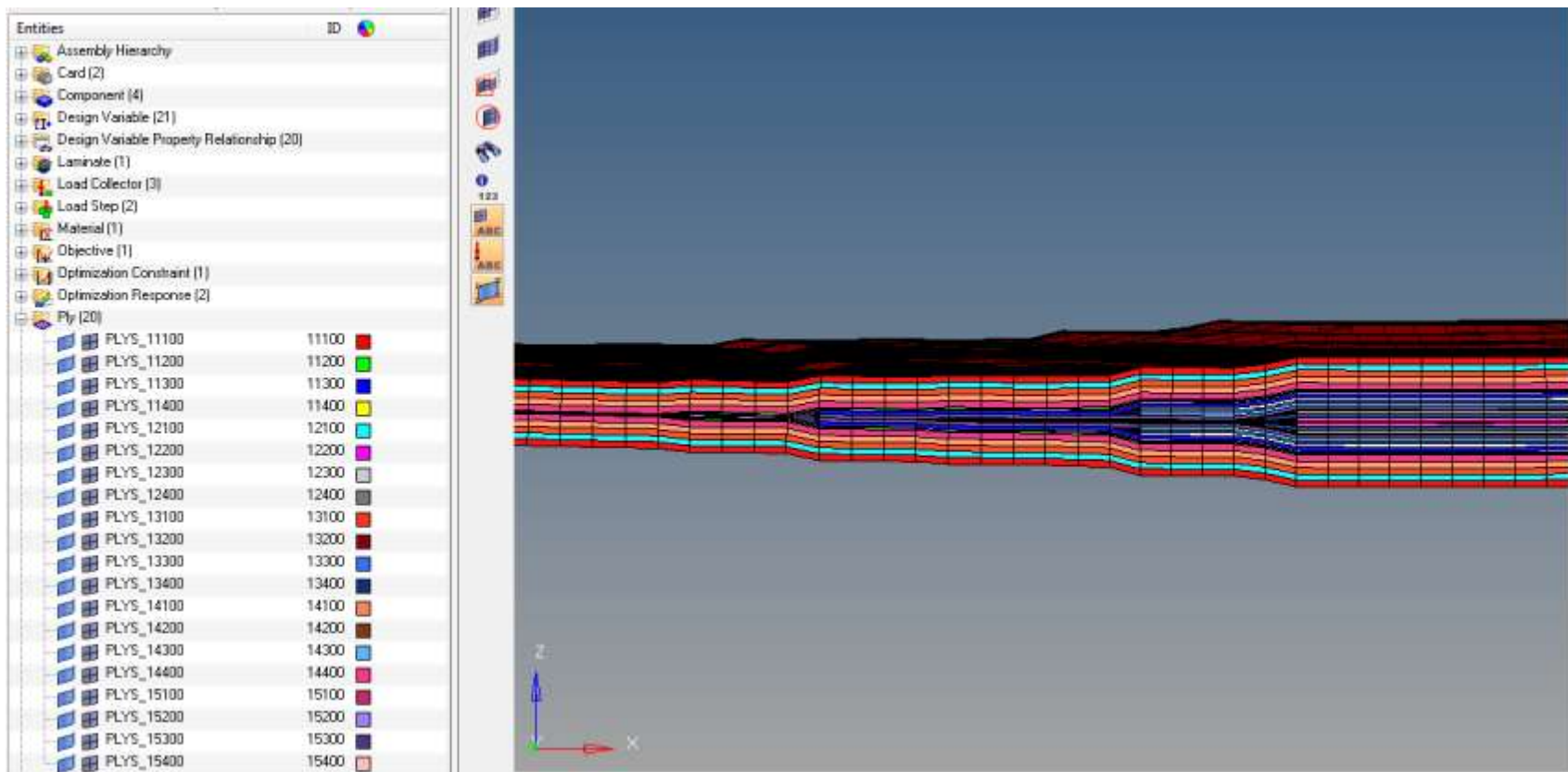


Толщина слоя с направлением +45/-45

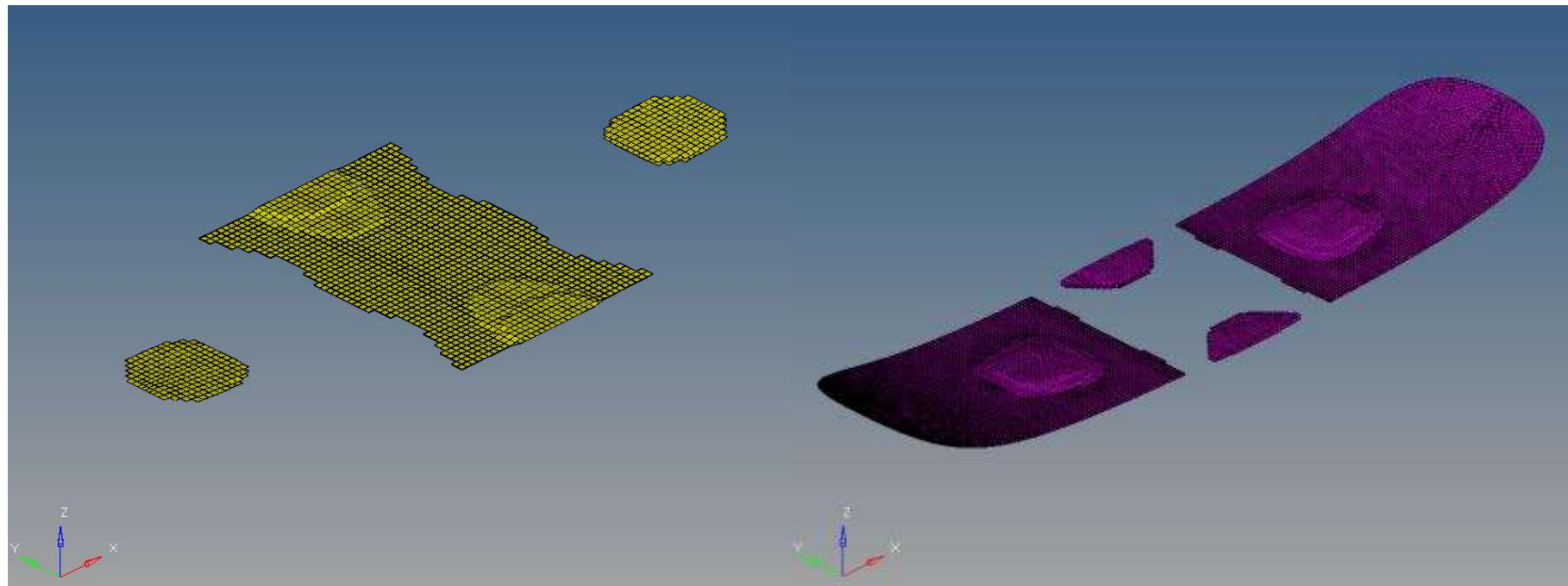
Free-Size Optimization – конфигурация скейтборда



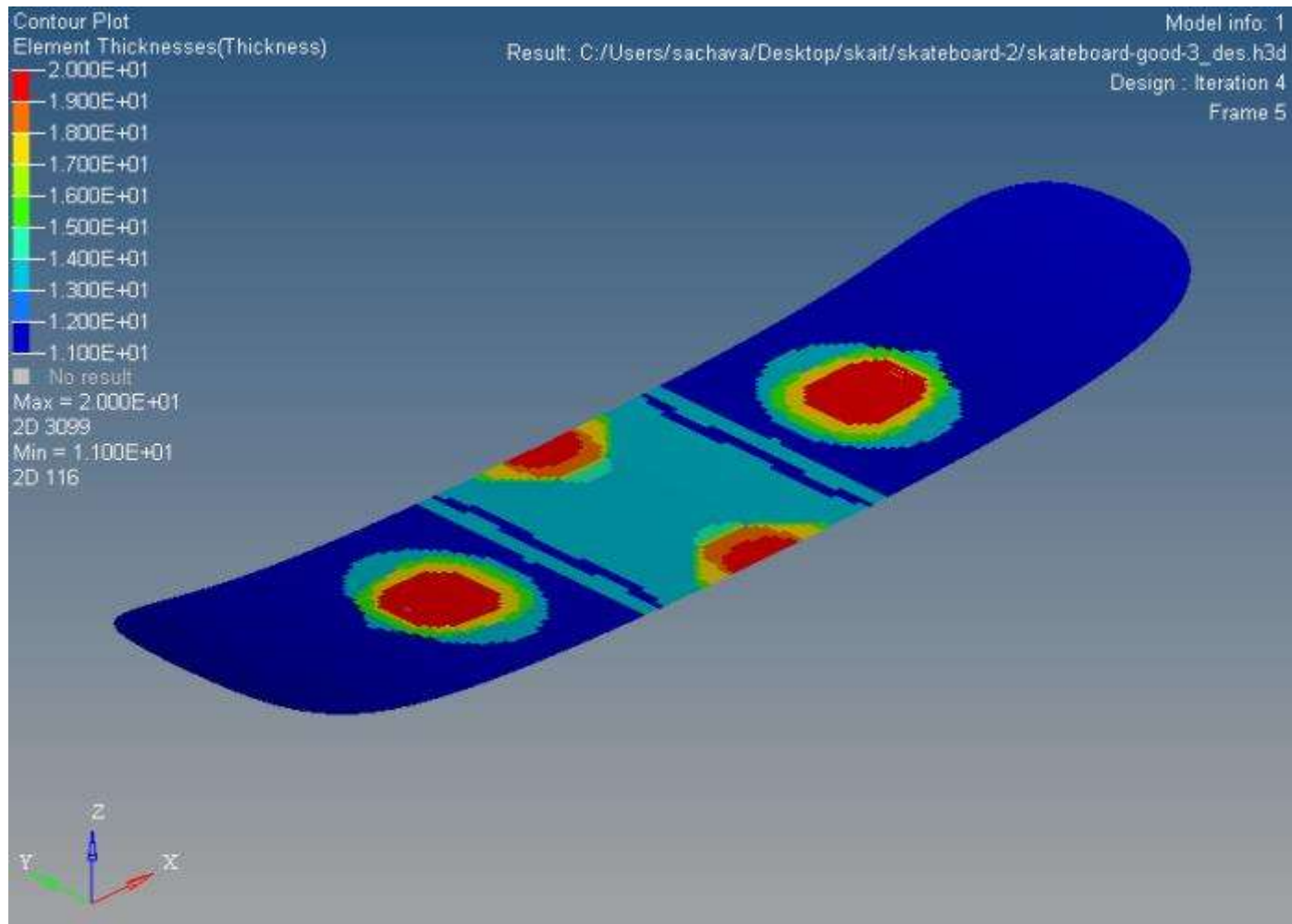
Free-Size Optimization – структура ламината



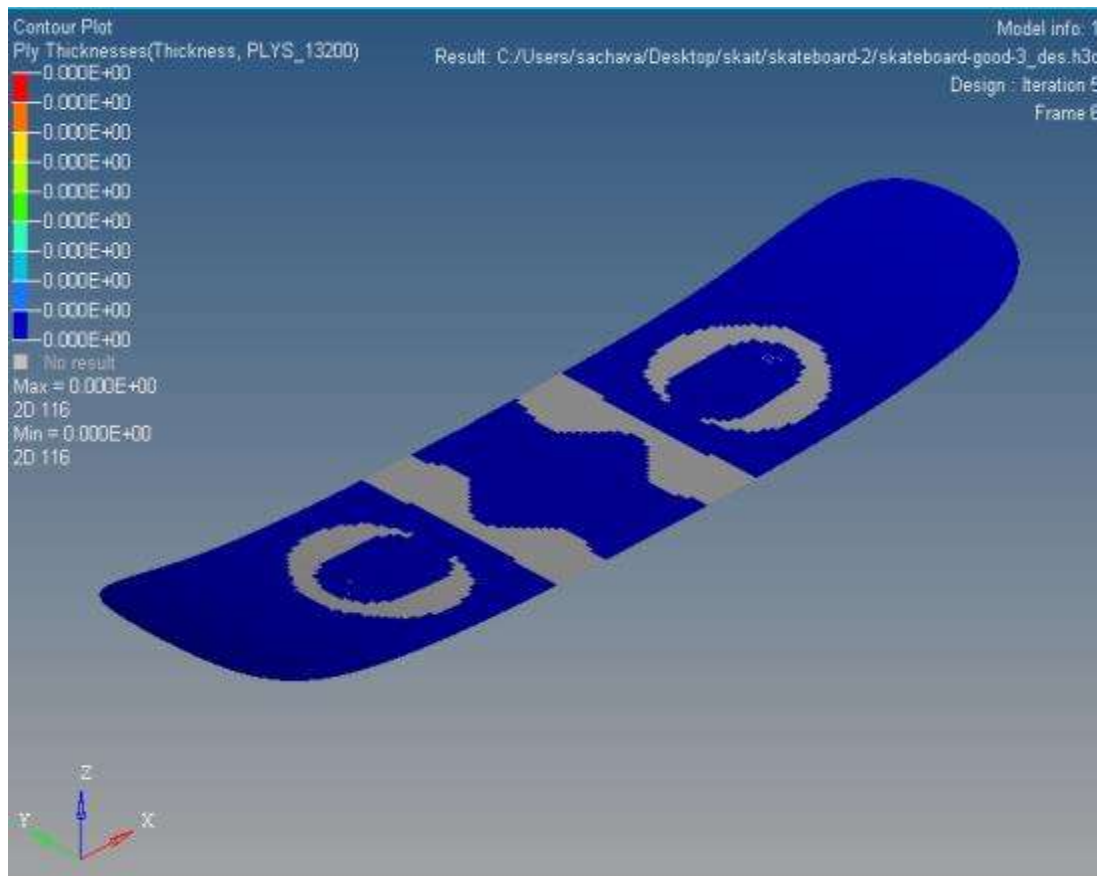
Free-Size Optimization – примеры формы слоев



Size Optimization – поле толщины



Size Optimization – толщины слоев

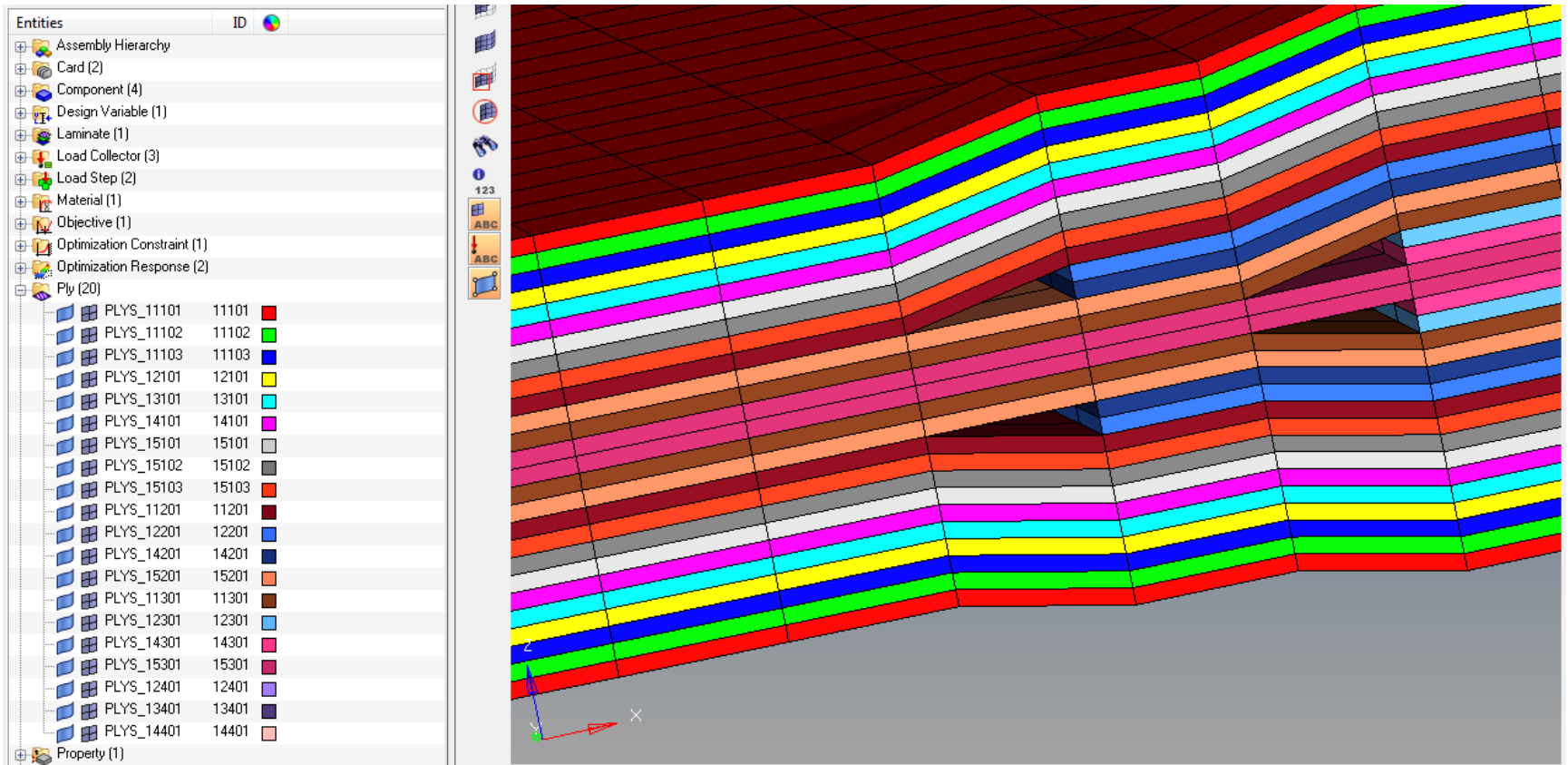


Все слои приведены к технологическим толщинам:

- максимальная толщина слоя от 0 до 2 мм, а
- производственная толщина – 0,5 мм

Часть слоев была удалена (толщина 0 мм)

Size Optimization – структура ламината



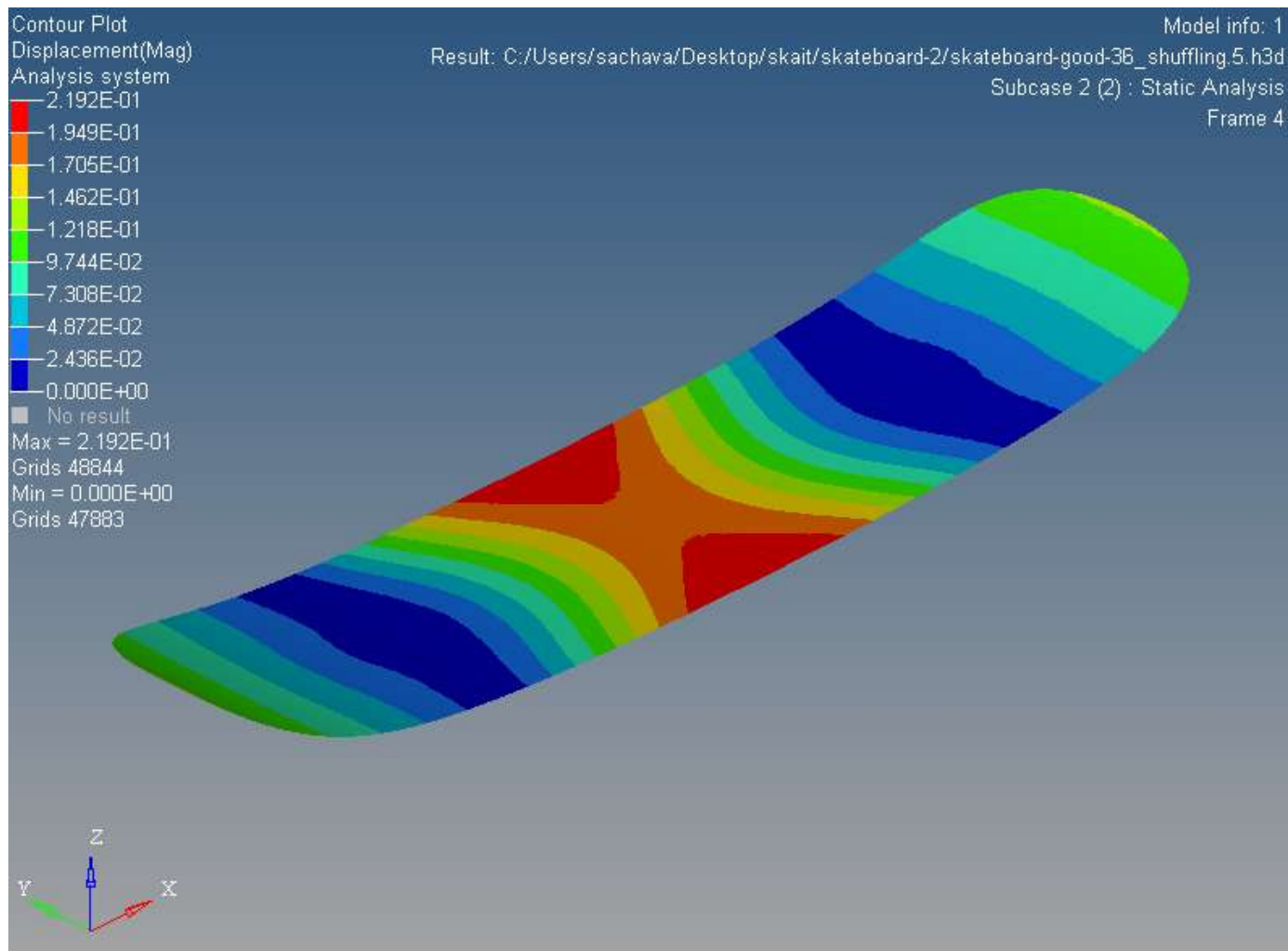
Оптимизация последовательности укладки слоев композита

Stacking sequence for STACK 1

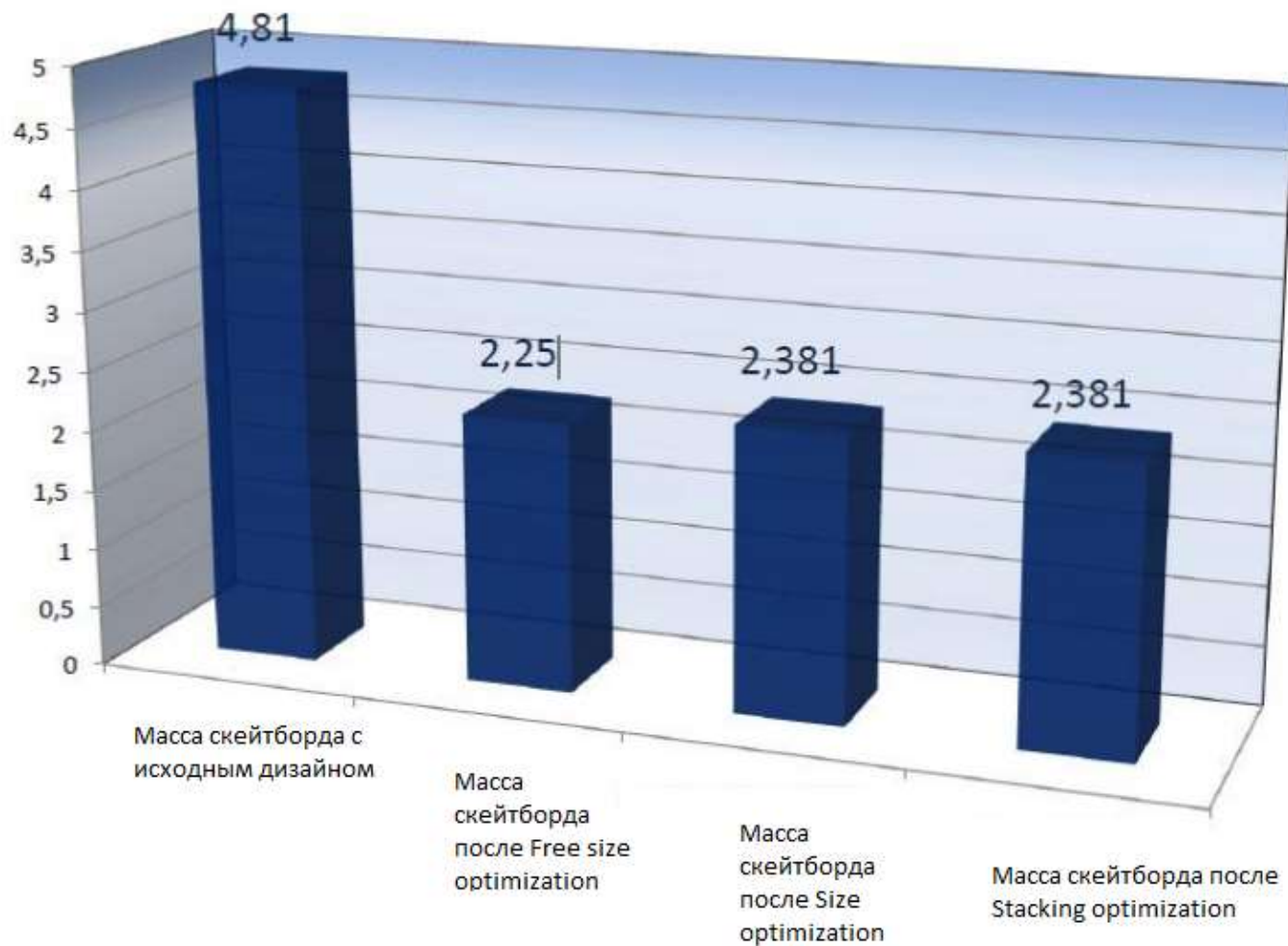
Iteration 0	Iteration 1	Iteration 2	Iteration 3	Iteration 4	Iteration 5
1	1	1	1	1	1
2	4	2	2	2	2
3	5	3	3	3	3
4	2	4	4	4	4
5	3	5	5	5	5
6	6	7	7	7	7
7	10	12	12	12	12
8	11	9	9	8	8
9	7	14	16	9	9
10	8	15	13	10	10
11	12	8	14	11	11
12	14	10	15	16	16
13	15	11	6	13	13
14	13	16	20	14	14
15	16	17	10	15	15
16	17	18	11	6	6
17	18	19	8	20	20
18	19	13	18	18	18
19	9	6	19	19	19
20	20	20	17	17	17

Legend
90.0 degrees
45.0 degrees
0.0 degrees
-45.0 degrees

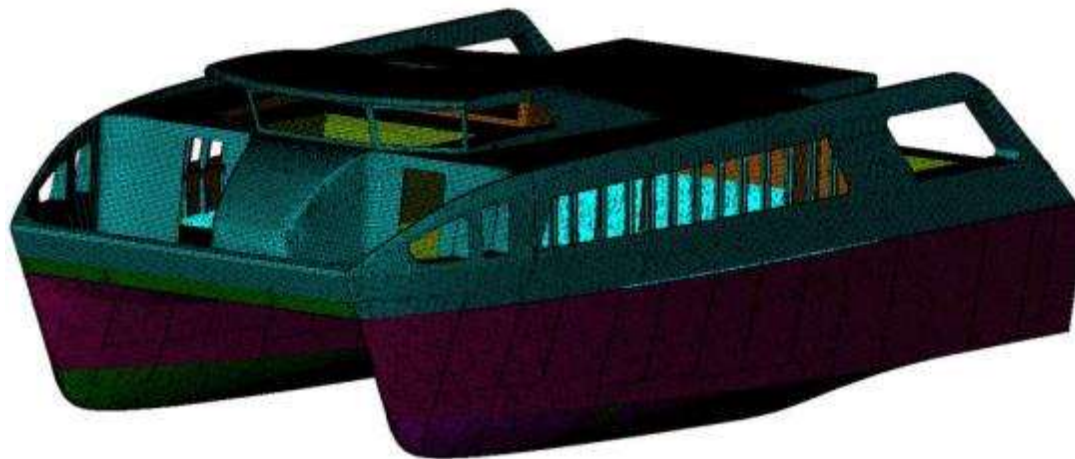
Анализ расчета оптимизированной конструкции



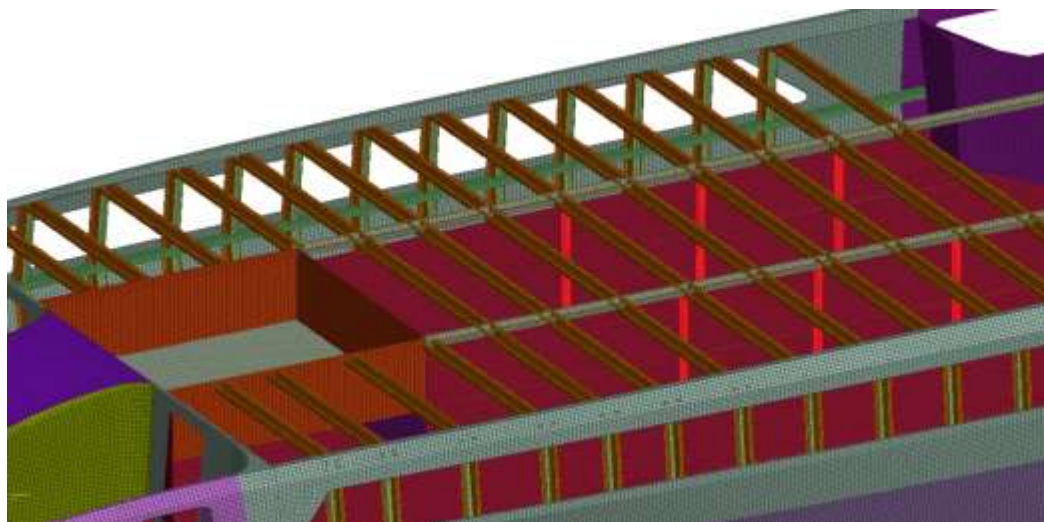
Оптимизация скейтборда – результаты каждого этапа



Оптимизация П-балки - предыстория

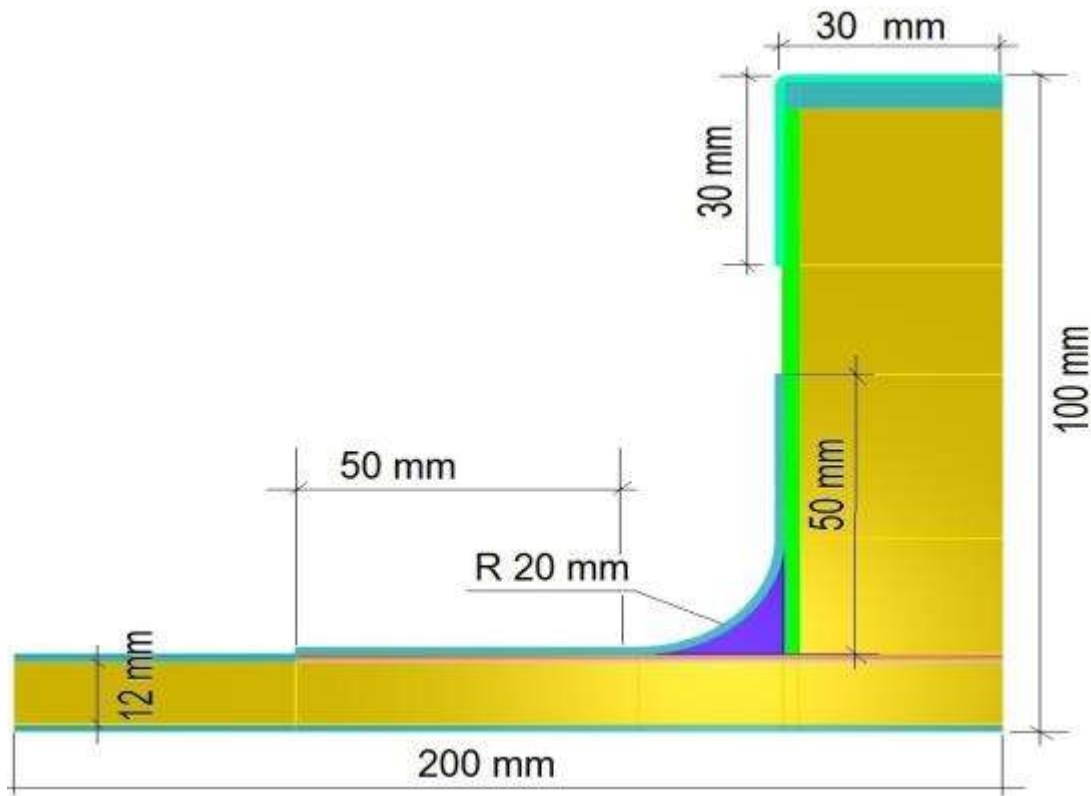


КЭ модель катамарана из углепластика

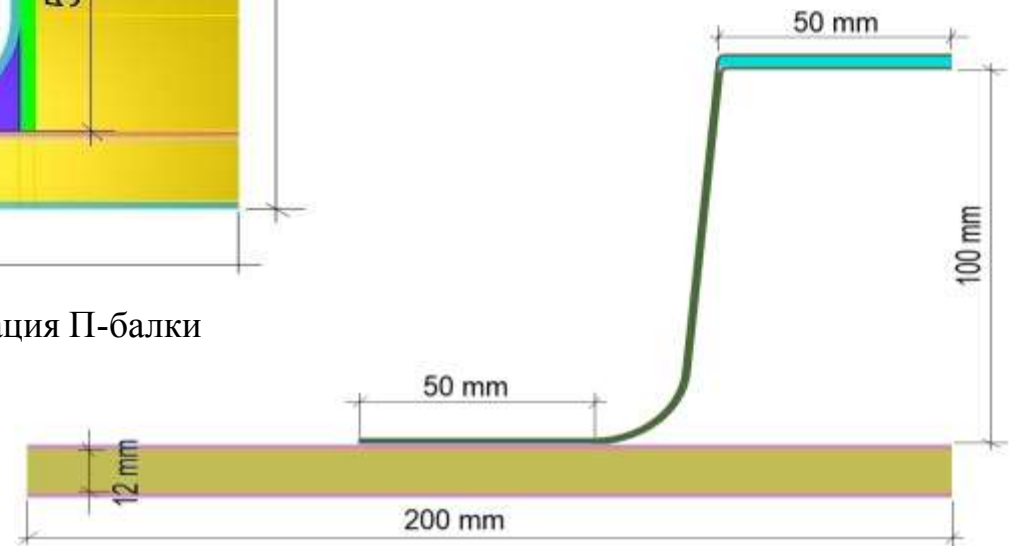


Несущие композитные П-балки

Оптимизация П-балки - предыстория



Обновленная, более технологичная конфигурация П-балки



Изначальная конфигурация П-балки

Постановка задачи оптимизации

Цель: минимизация массы

Ограничения:

Прочностные характеристики (перемещения) при всех типах модельных нагрузений (растяжение, сжатие, продольный изгиб, поперечный изгиб, кручение) не должны ухудшиться.

Технологические ограничения:

- Имеется ограниченный набор доступных тканых углепластиков, которые можно использовать при производстве П-балки.
- Характеристики и свойства всех композитных материалов
- Толщина тканых углепластиков фиксированная
- Имеется фиксированное направление укладки углепластиков (вдоль балки), так как длина балок много больше двух других параметров.

Характеристики и свойства материалов

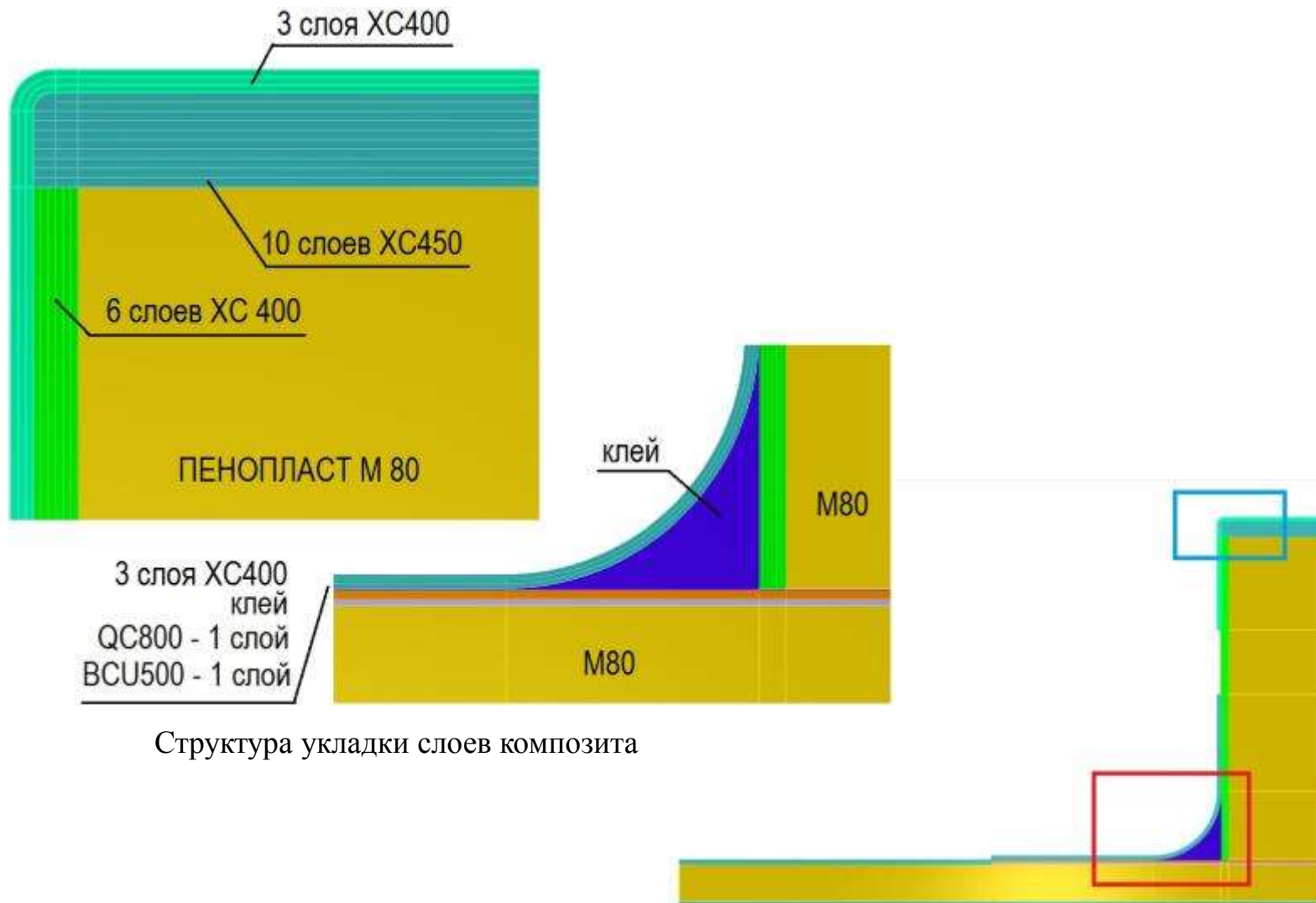
Механические свойства тканых углепластиков

Материал	E_x , ГПа	E_y , ГПа	E_z , ГПа	G_{xy} , ГПа	G_{yz} , ГПа	G_{xz} , ГПа	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}	ρ , кг/м ³
XC400 (+45/-45)	15.5	15.5	4.2	33.9	3.5	3.5	0.3	0.3	0.3	1526
BCU500 (90/0)	74.6	48.0	4.2	3.8	3.5	3.5	0.3	0.3	0.3	1531
QC800 (90/0/45/- 45)	46.1	46.1	4.2	17.5	3.5	3.5	0.3	0.3	0.3	1531
UC450 (90/0)	109. 8	8.8	4.2	3.8	3.5	3.5	0.3	0.3	0.3	1528

Толщины тканых углепластиков

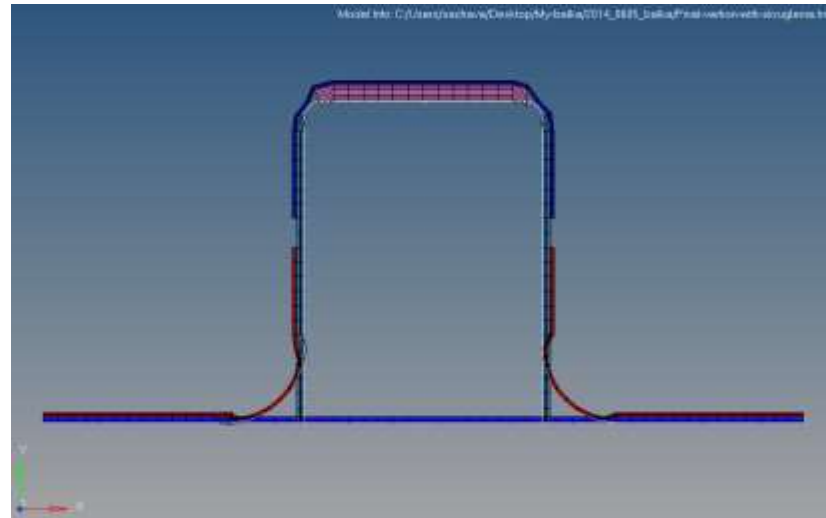
Материал	Толщина
XC400	0.38 мм
BCU500	0.51 мм
QC800	0.78 мм
UC450	0.46 мм

Структура укладки слоев ламината (изначальная)

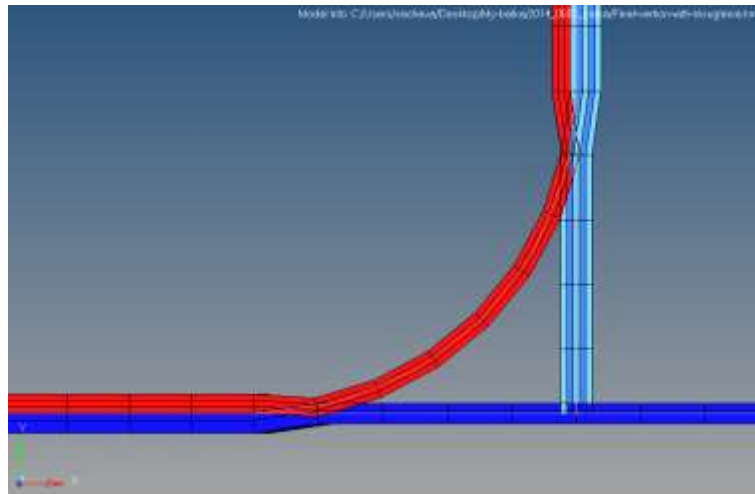


Структура укладки слоев композита

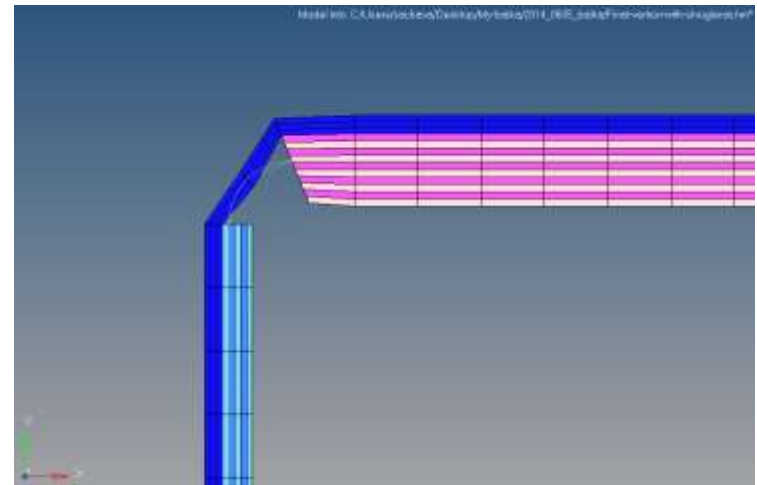
Моделирование П-балки



Модель балки в OptiStruct

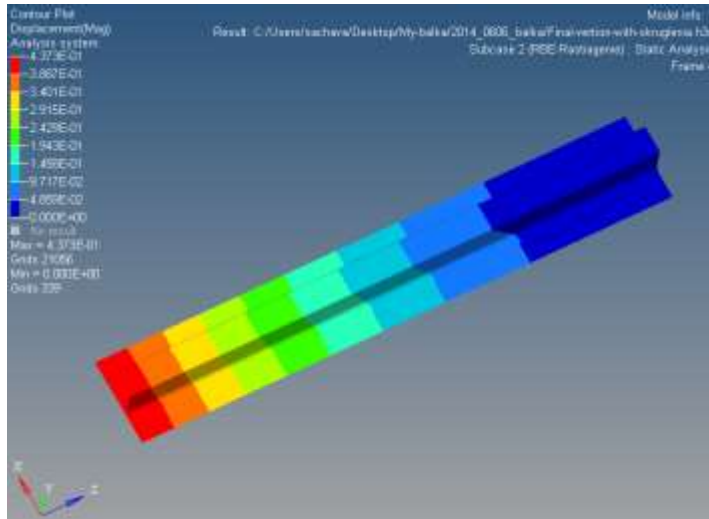


Модель балки в OptiStruct (элемент)

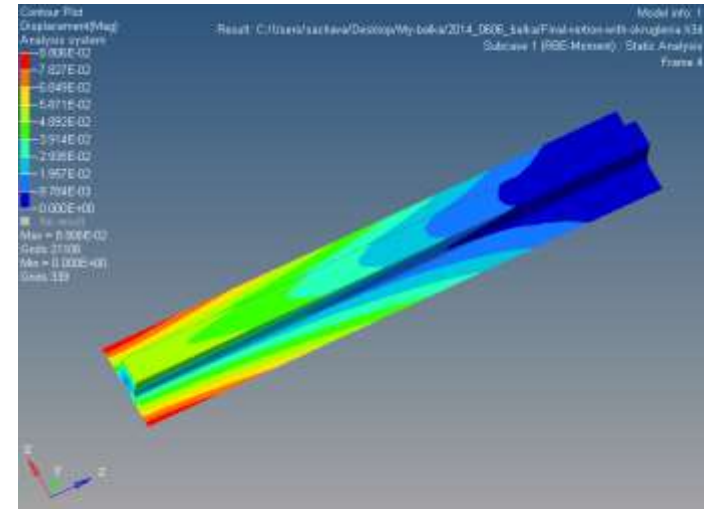


Модель балки в OptiStruct (элемент)

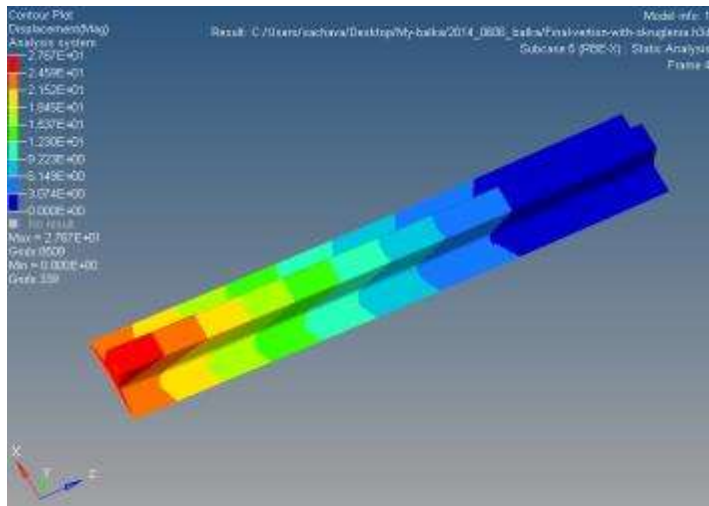
Анализ расчета



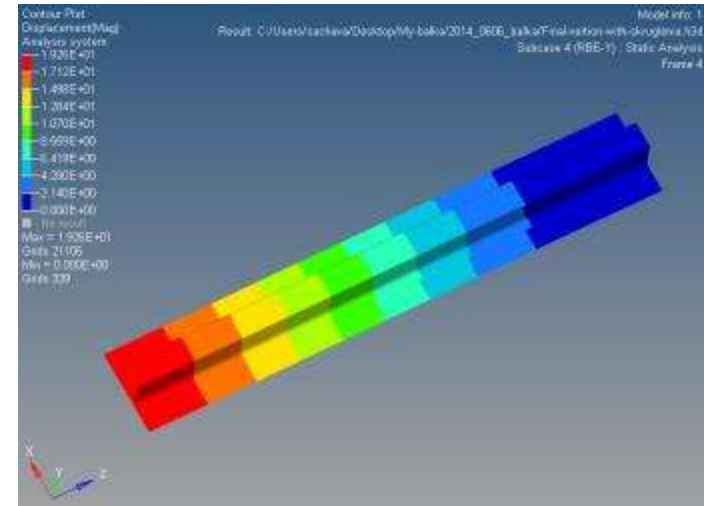
Поле перемещений при растяжении (5 кН)



Поле перемещений при крутящем моменте (1 кНм)

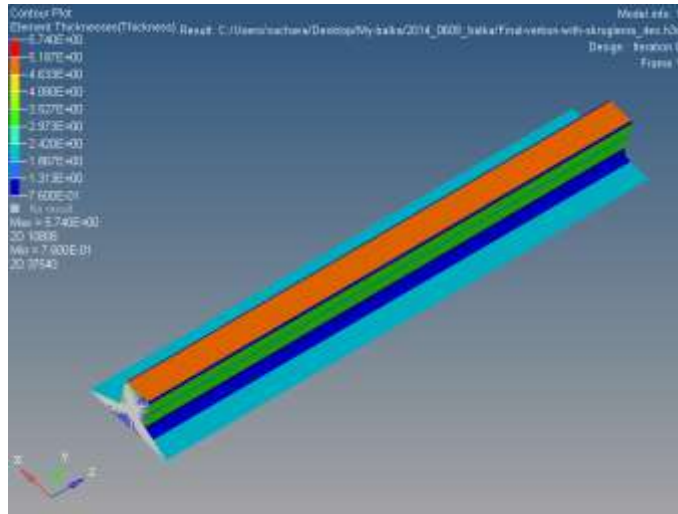


Поле перемещений при поперечном изгибе (3 кН)

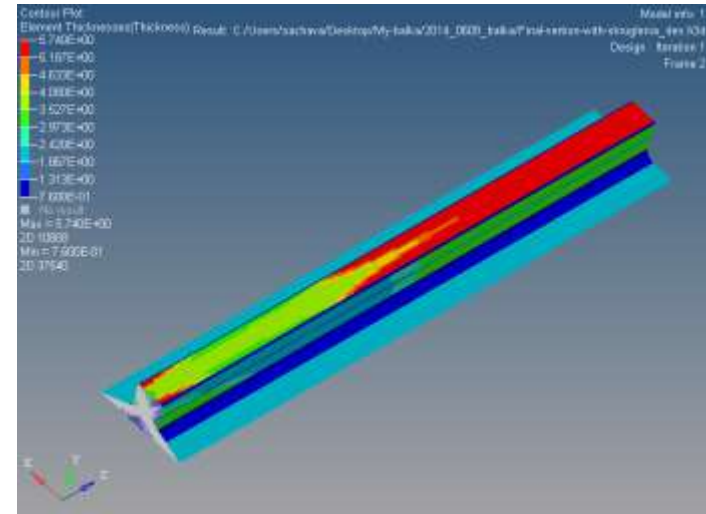


Поле перемещений при продольном изгибе (1,5 кН)

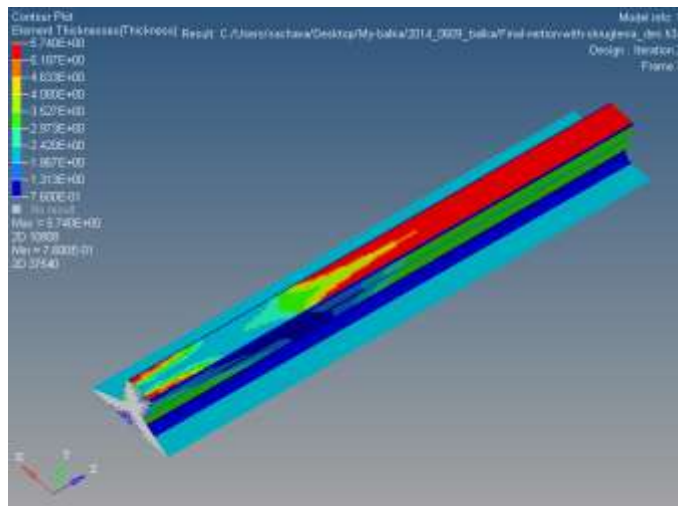
Free-Size Optimization – процесс оптимизации толщины



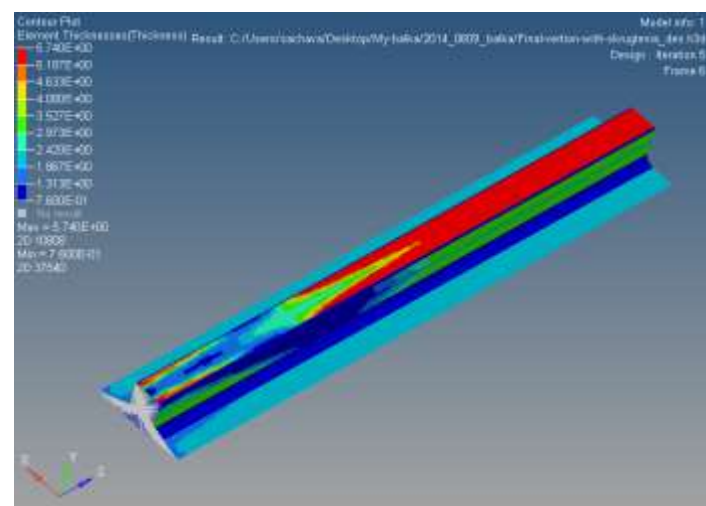
Итерация №0 – начальная конфигурация



Итерация №1

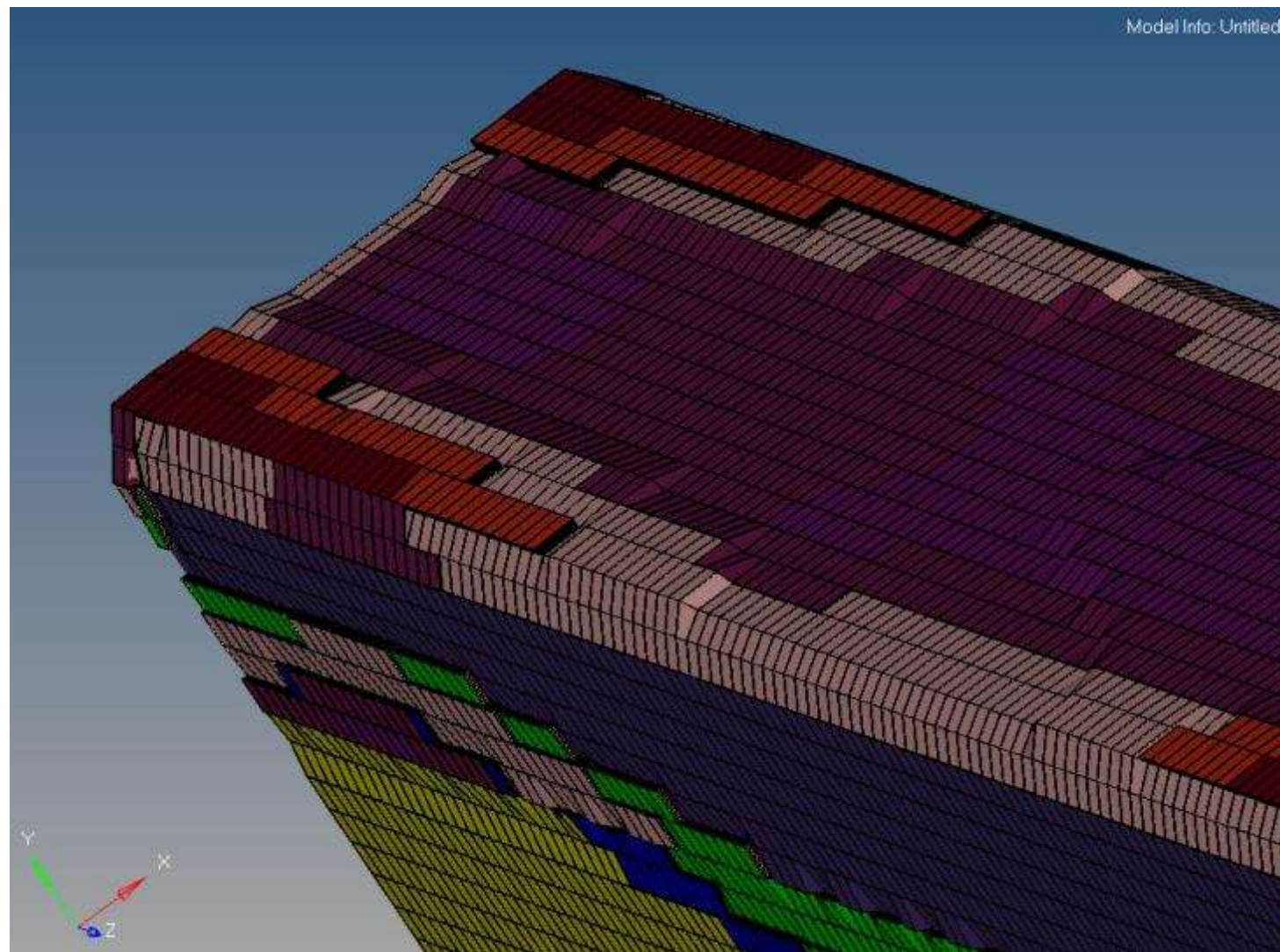


Итерация №3

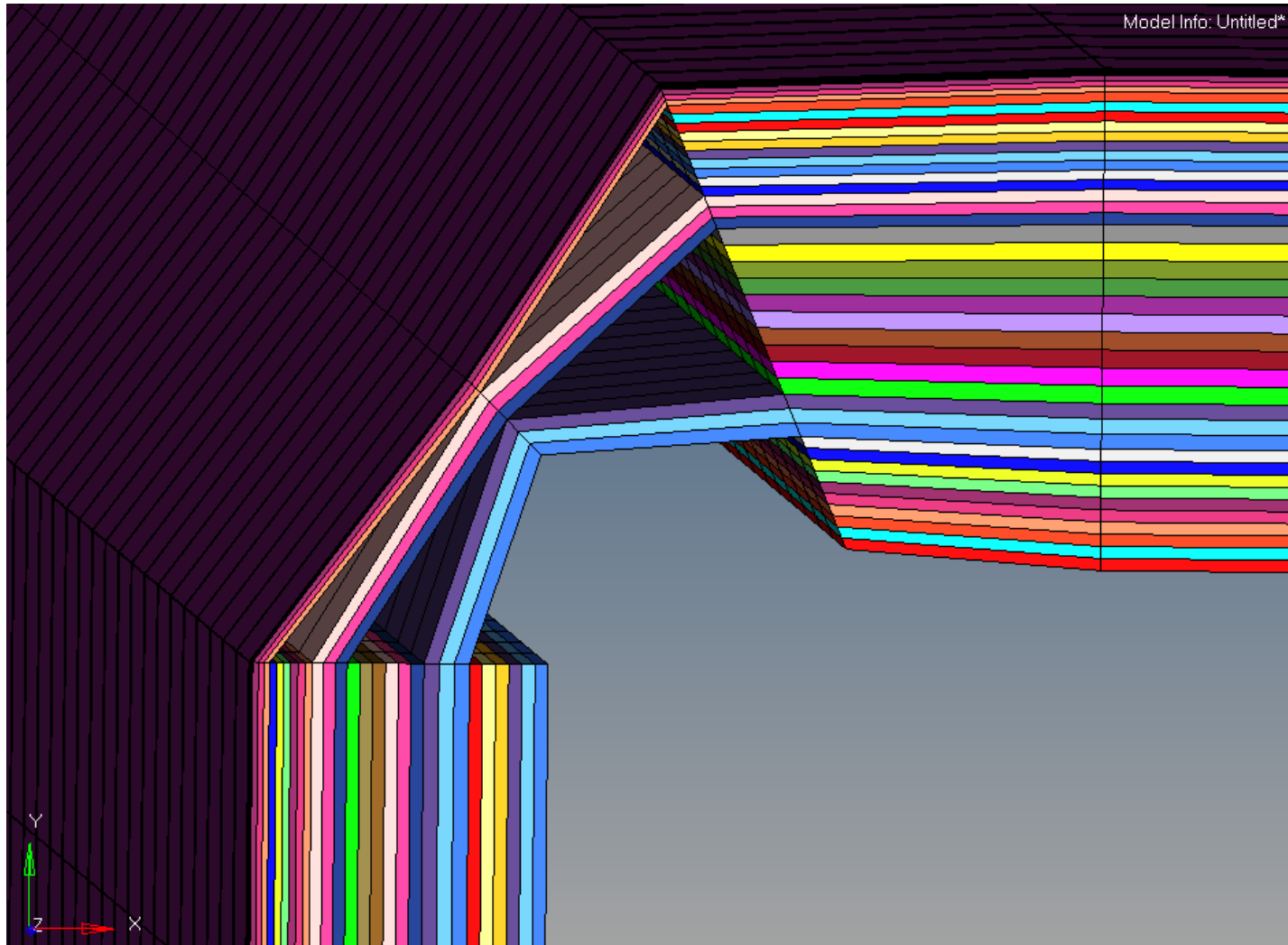


Итерация №5 – финальный дизайн

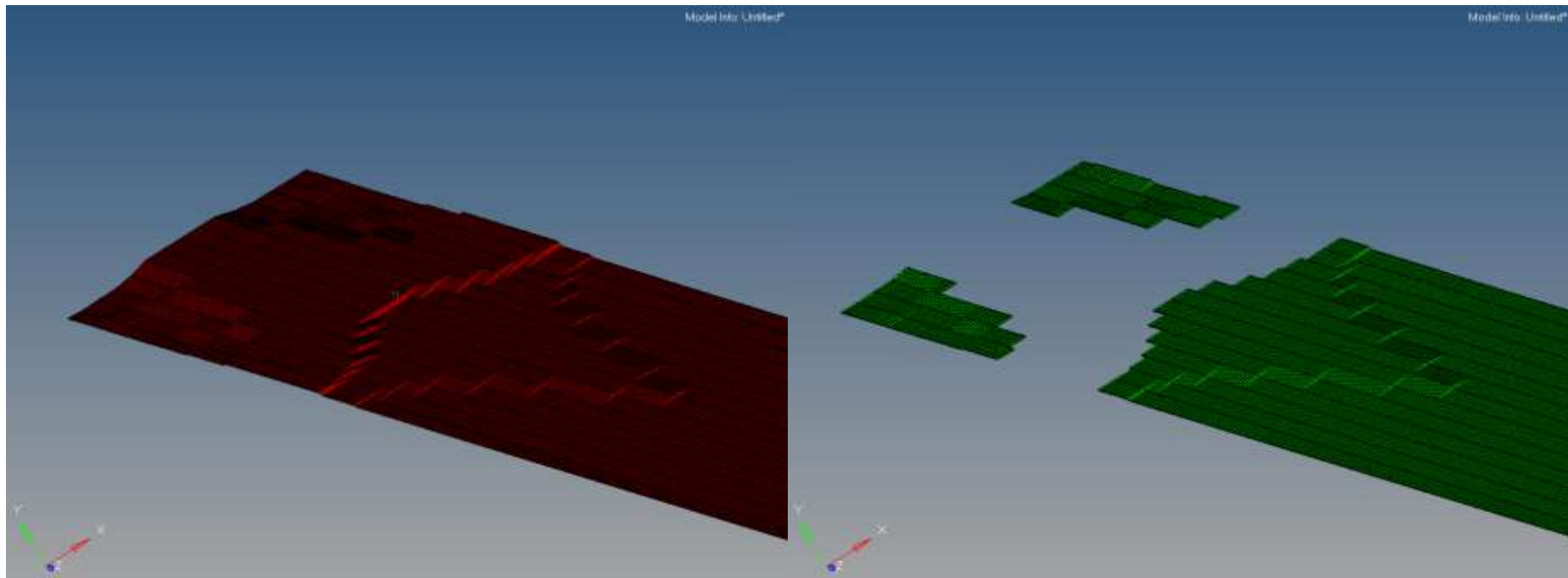
Free-Size Optimization – конфигурация П-балки



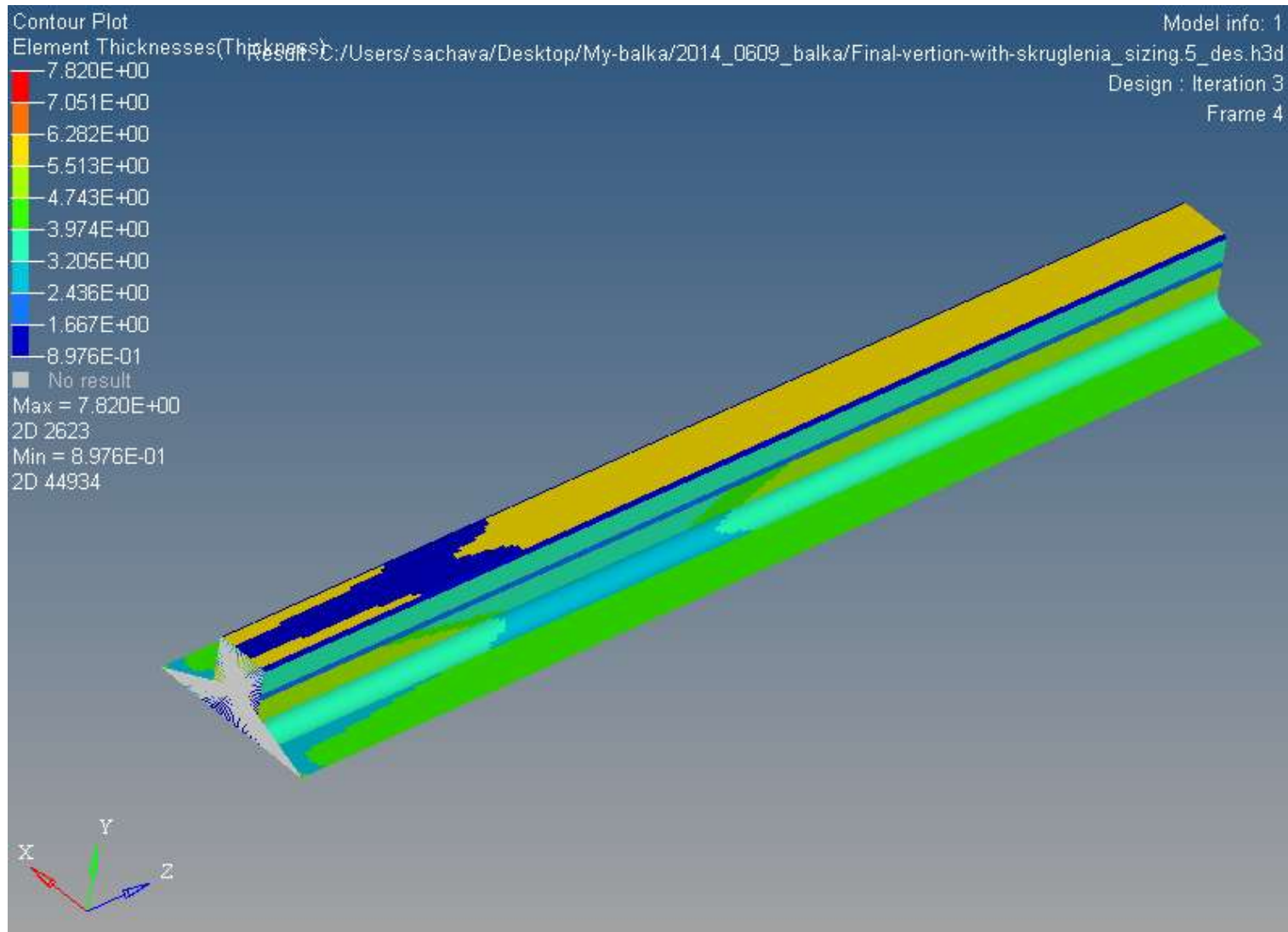
Free-Size Optimization – структура ламината



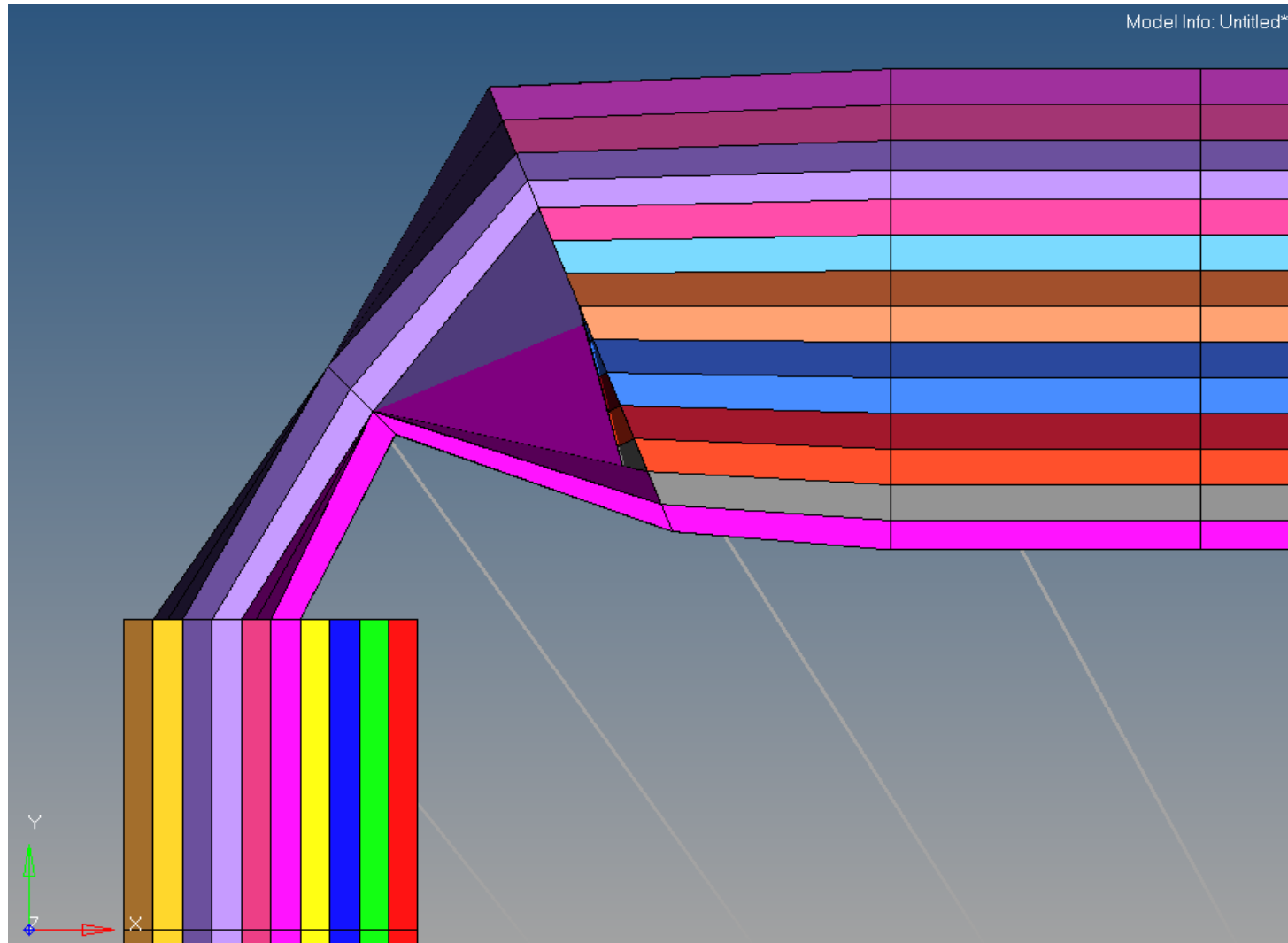
Free-Size Optimization – примеры формы слоев



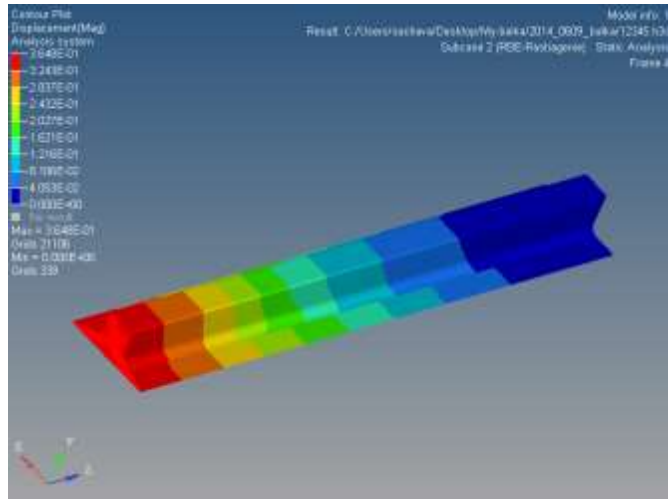
Size Optimization – поле толщины



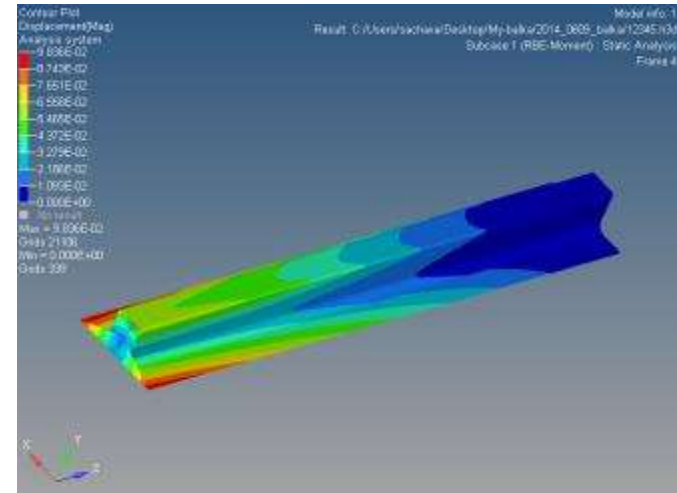
Size Optimization – структура ламината



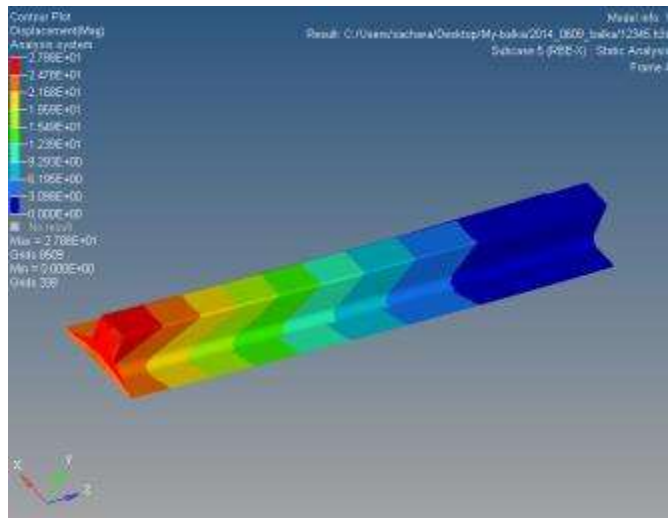
Анализ расчета оптимизированной конструкции



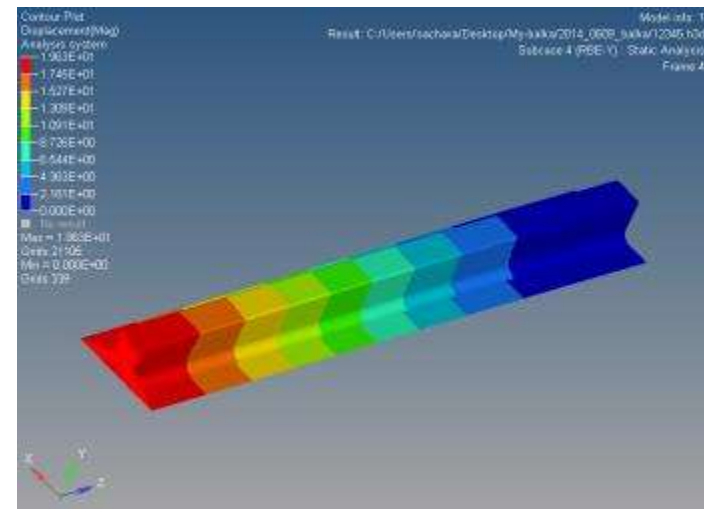
Поле перемещений при растяжении (5 кН)



Поле перемещений при крутящем моменте (1 кНм)

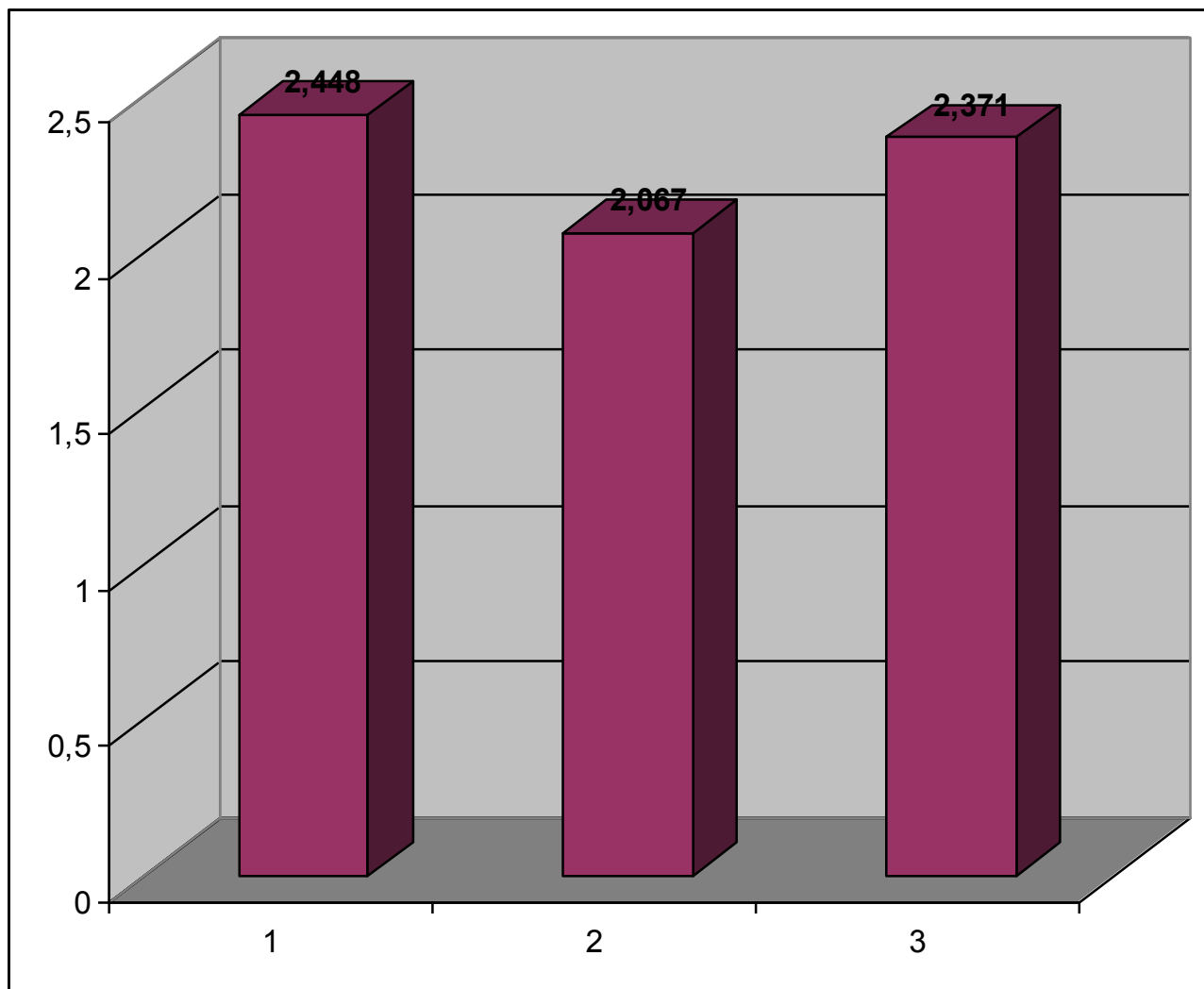


Поле перемещений при поперечном изгибе (3 кН)



Поле перемещений при продольном изгибе (1,5 кН)

Оптимизация П-балки – результаты каждого этапа



Выводы

Произведенные исследования наглядно демонстрируют возможности быстрой и эффективной оптимизации композиционных материалов и конструкций в программной среде OptiStruct. На примере двух задач из разных областей промышленности показаны имеющиеся на данный момент инструменты структурной оптимизации.

Первая из решенных задач – оптимизация скейтборда – является модельной, реальных производственных ограничений в ней не рассматривалось. В связи с этим в ходе оптимизации масса была сокращена почти в два раза.

Вторая задача – оптимизация П-балки – является продолжением реальной задачи, решаемой ООО «Лаборатория Вычислительная механика». При попытке оптимизации композитной структуры с учетом всех конструктивных ограничений (толщина, последовательность и направление укладки слоев, необходимость учитывать различные виды нагрузжений), удалось добиться оптимизации массы лишь на несколько процентов.

Спасибо за внимание!