

VI ФОРУМ «Светопрозрачные конструкции. Окна, фасады, двери, интерьерные решения 2024»



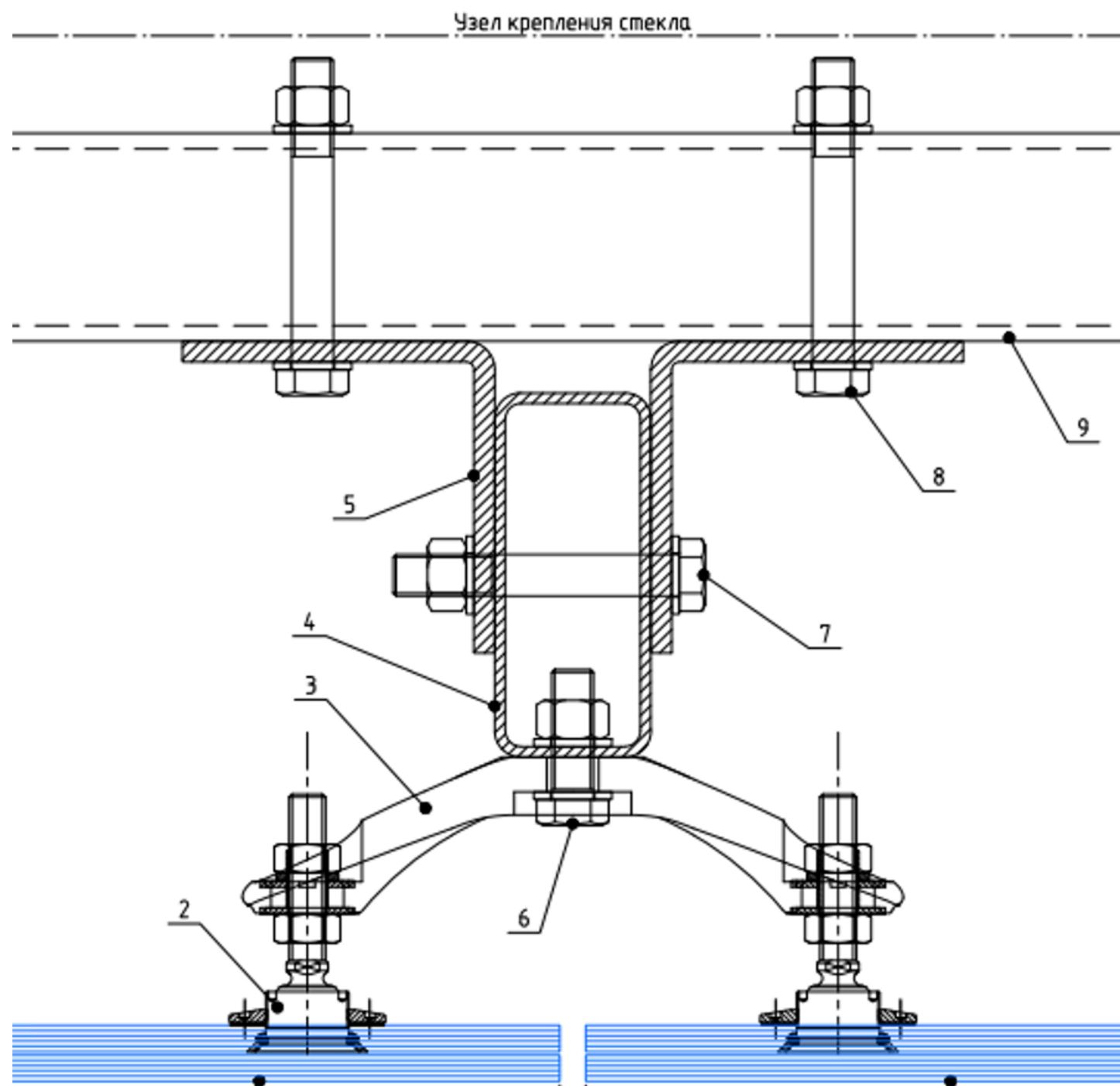
Экспериментальные
исследования
светопрозрачных
конструкций

Авторы:

Кудрявцев Никита Андреевич
Инженер 3 категории

Авдеев Кирилл Владимирович
Зам. Генерального директора - Главный инженер
АО «ЦНИИПромзданий»

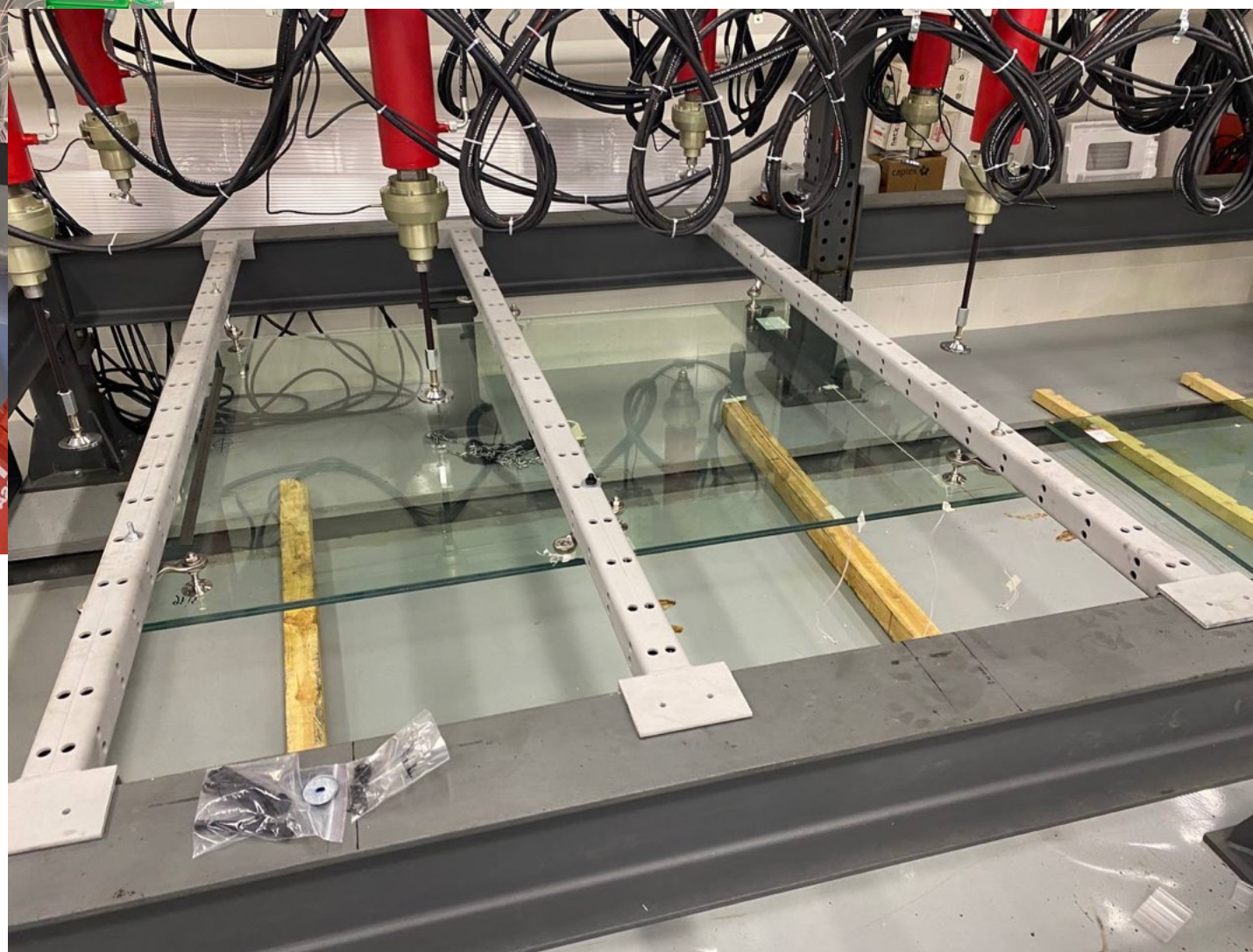
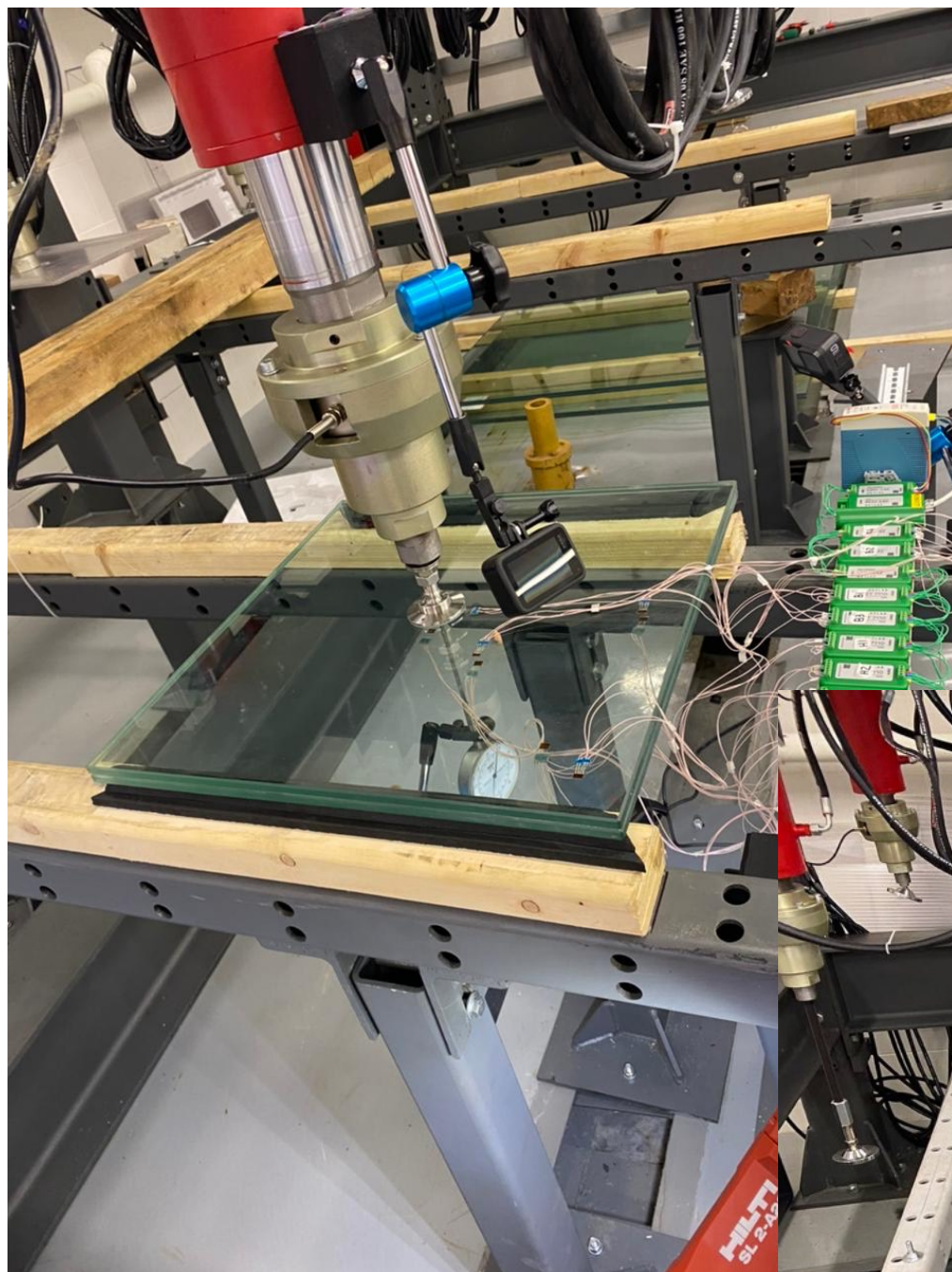
Элемент крепления стекла «Рутель»



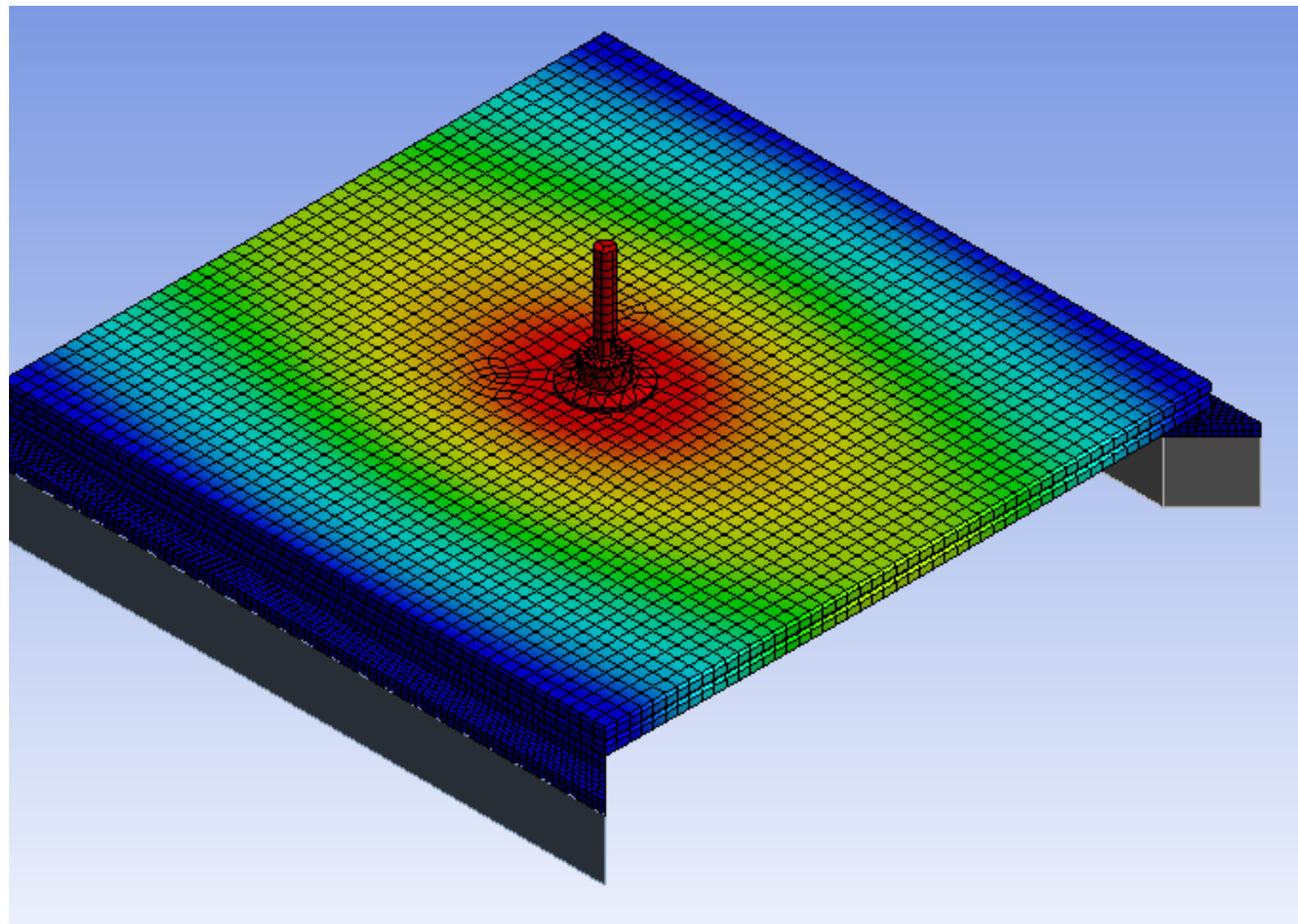
Подготовленные испытательные образцы

Из-за отсутствия технической документации
было принято решение о проведении испытаний
запроектированных конструкций
для подтверждения возможности их применения

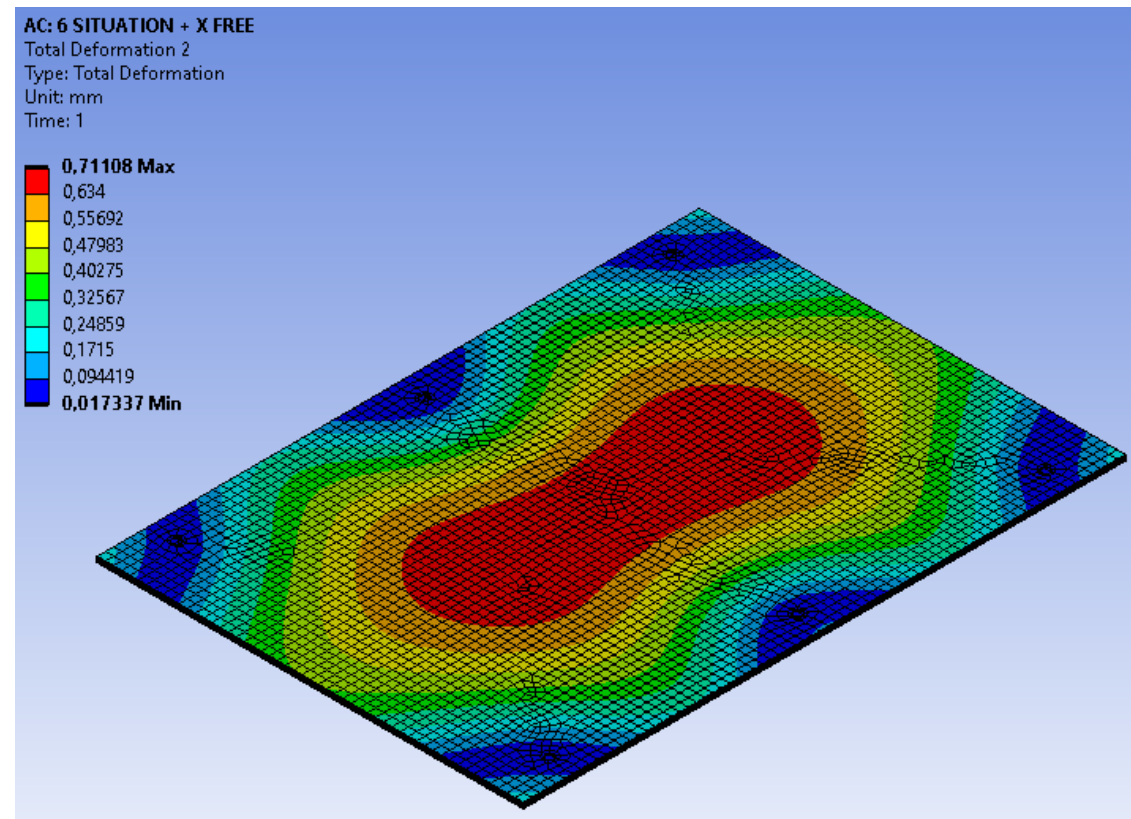
Нам были предоставлены несколько
полноразмерных образцов и фрагменты
изделий с креплениями «рутелей»



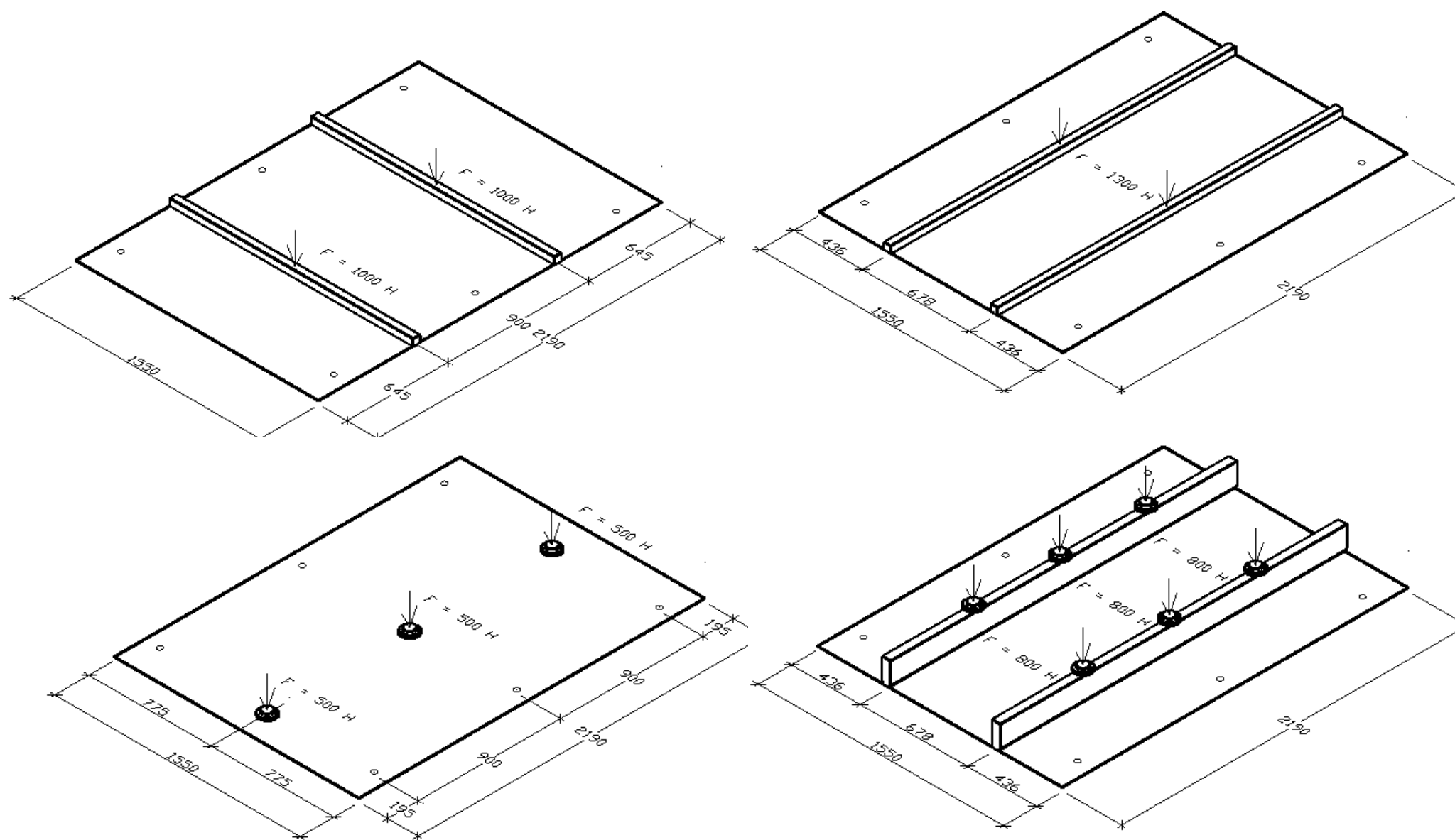
1. Математическое моделирование испытываемых конструкций



Перед испытанием необходимо было аналитическим способом проанализировать поведение конструкции, для этого мы математически моделировали испытание в различных расчетных программах, а именно в SCAD и ANSYS

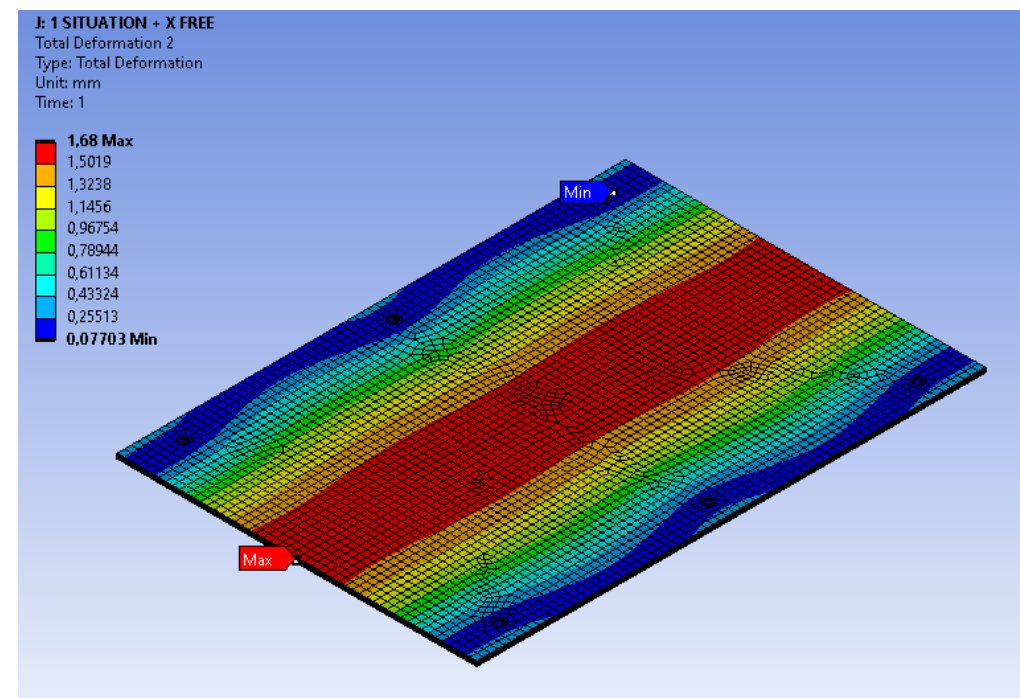
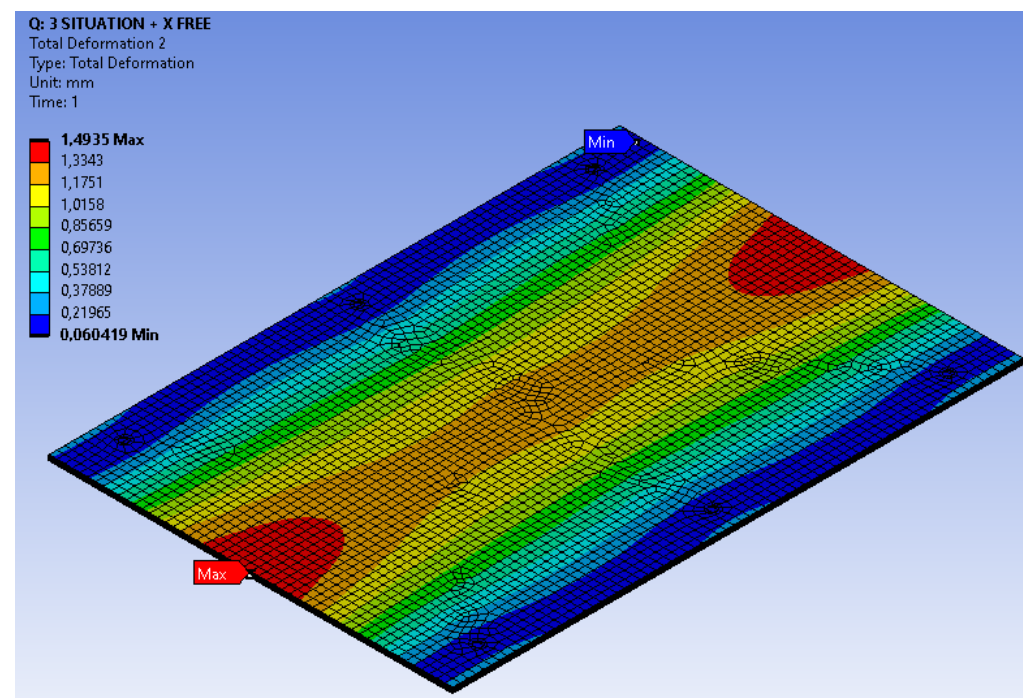
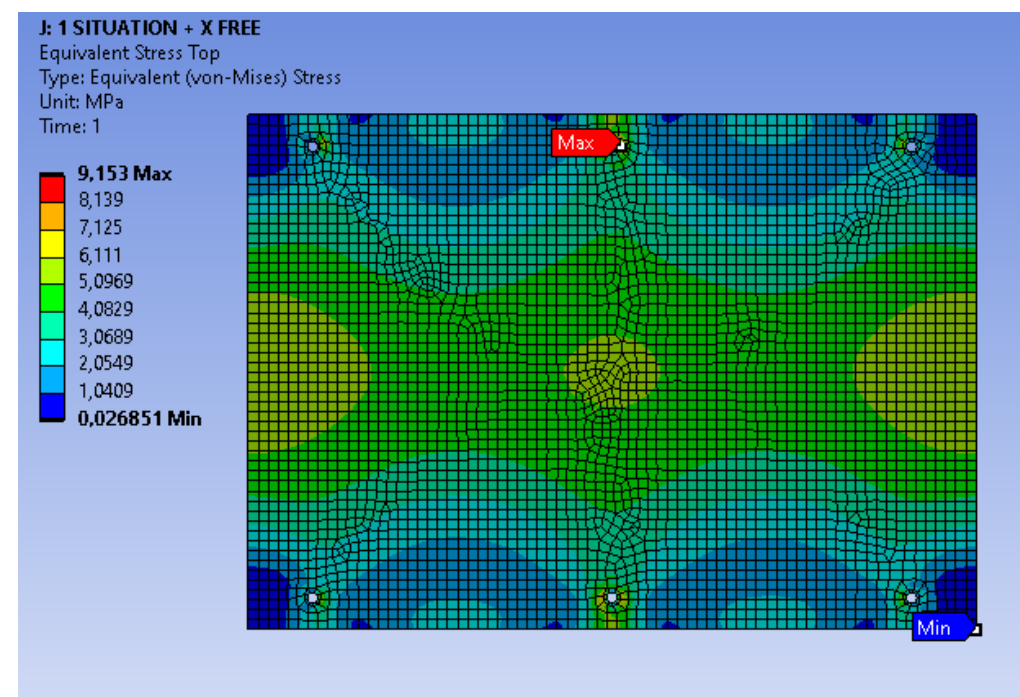
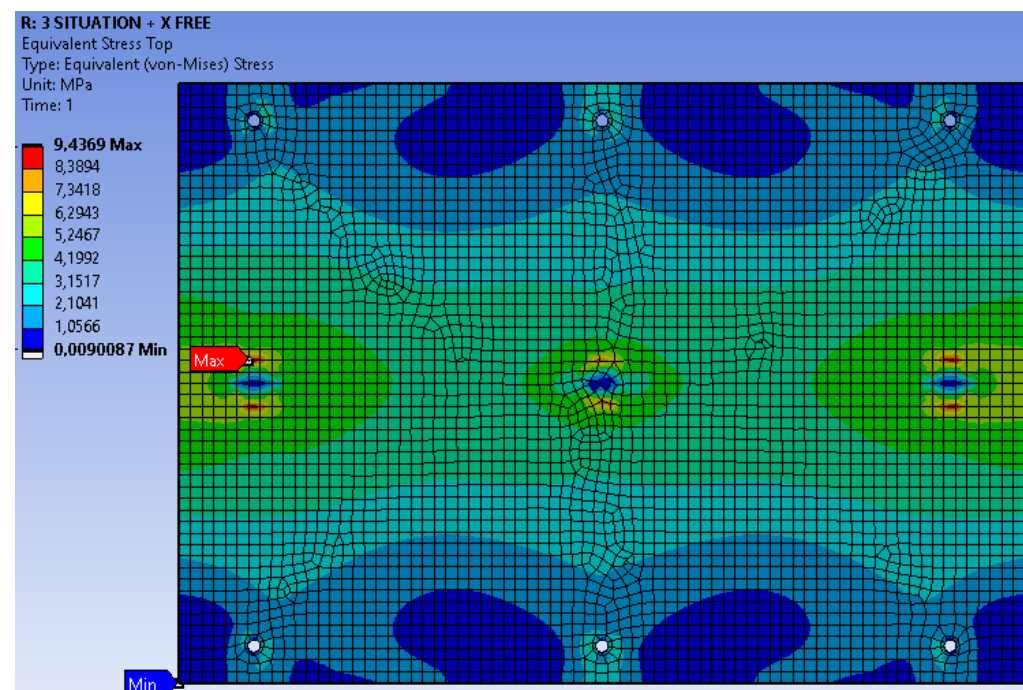


В качестве исходных данных для прочностного испытания у нас была задана проектная распределенная нагрузка на всю поверхность стекла, равная пиковым значениям ветровой нагрузки в 120 кг/м².

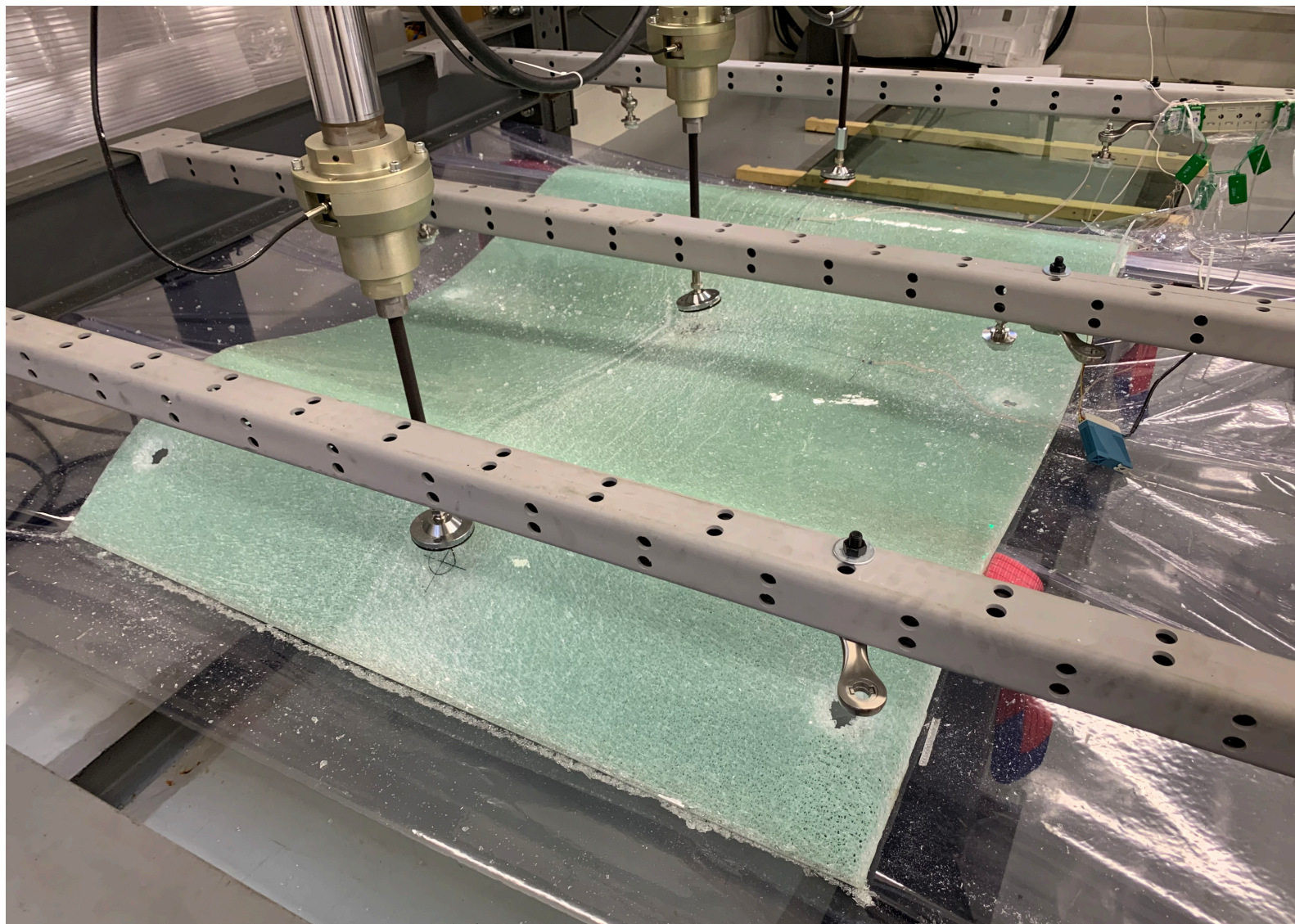


В результате проведенного математического моделирования методом подбора мы выбрали оптимальное расположение точечных нагрузок и их численное значение эквивалентное распределенной нагрузке, равной 120 кг/м²

При этом критерием сходимости были изополя напряжений, их численное значение, характер и значение деформаций



2. Составление программы и проведение испытаний



Для анализа фактических напряжений и их последующего сравнения с аналитическими данными на обе поверхности стекла были смонтированы тензорезисторы, согласно схеме изображенной ниже

Схема установки тензорезисторов на верхнем стекле

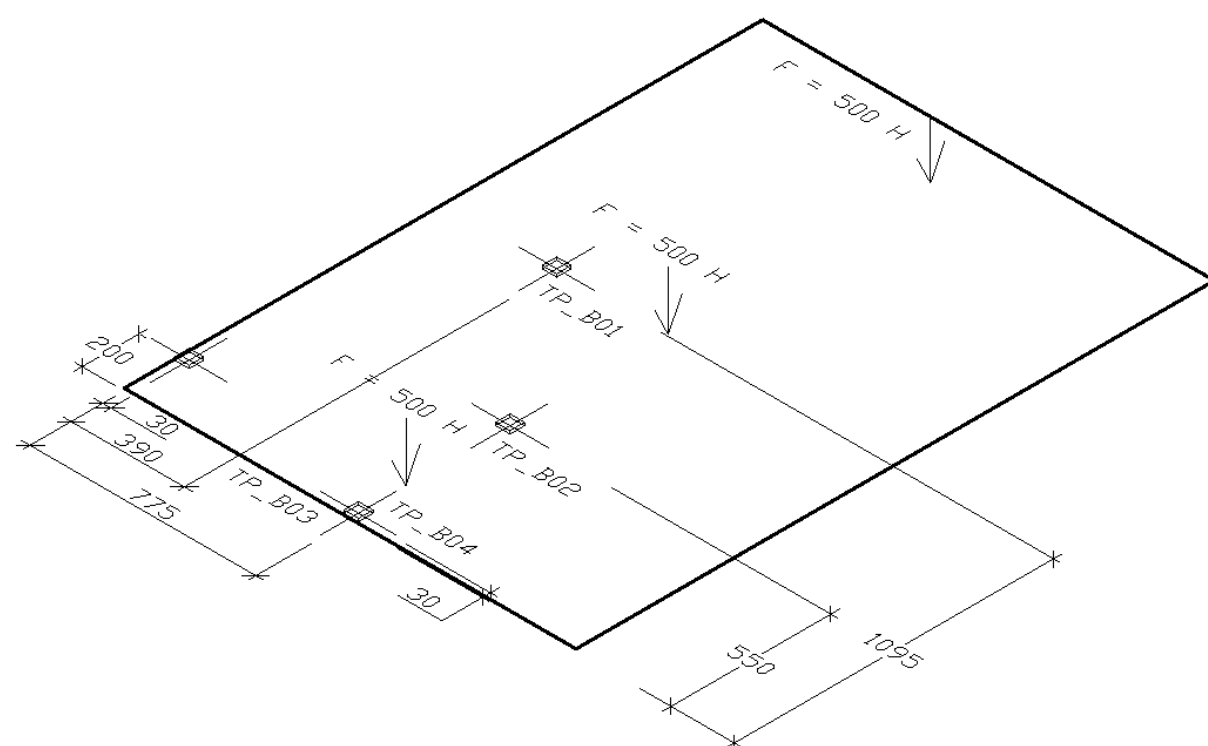
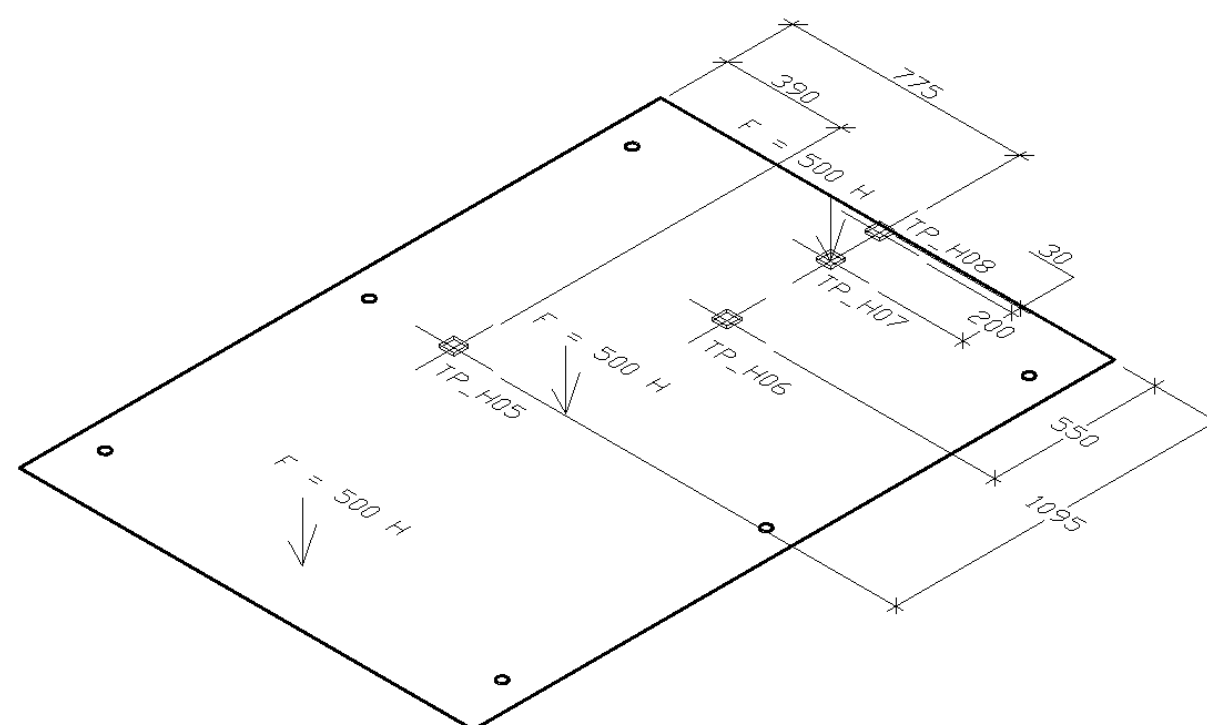
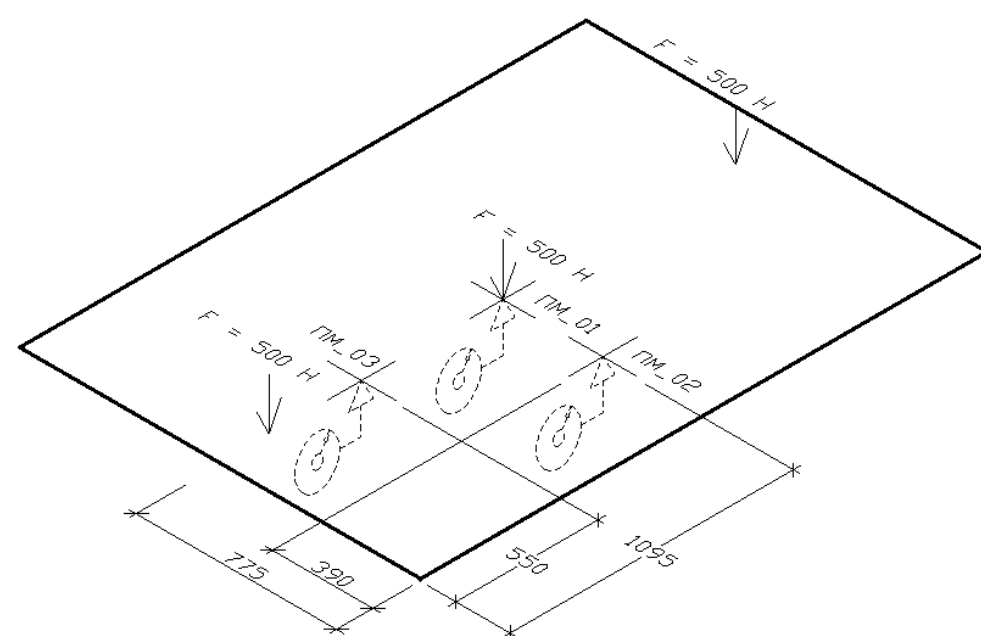


Схема установки тензорезисторов на нижнем стекле (установка симметрично)

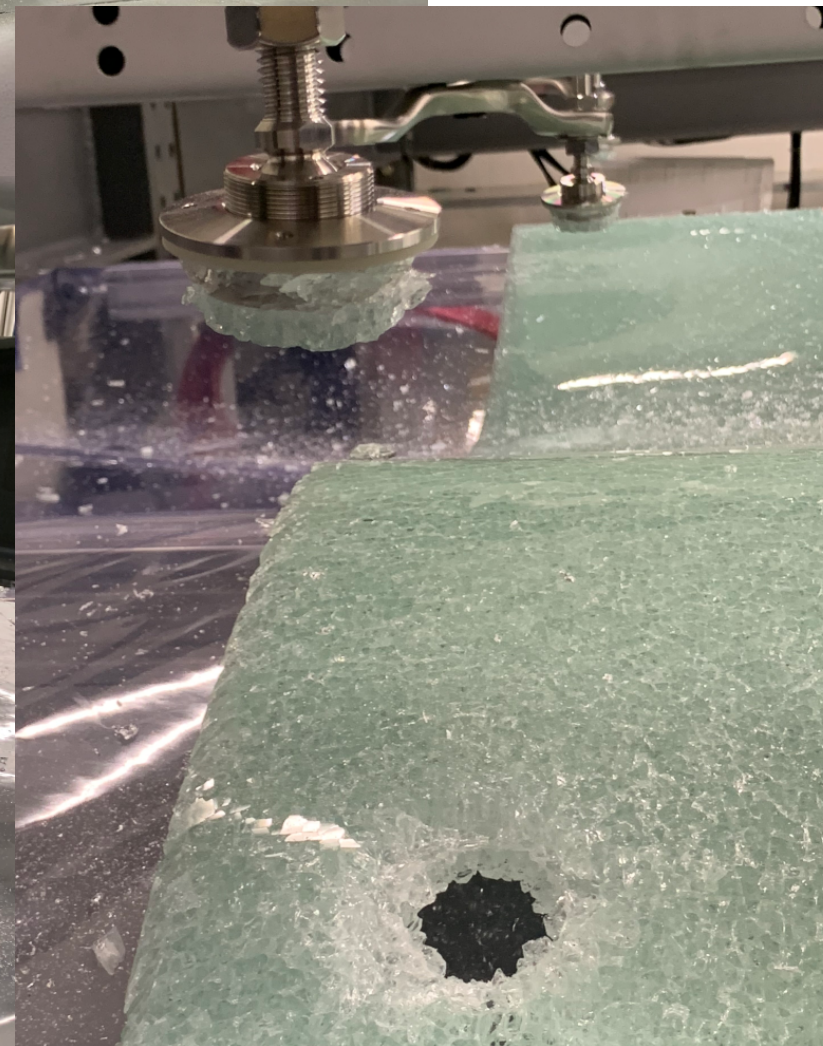
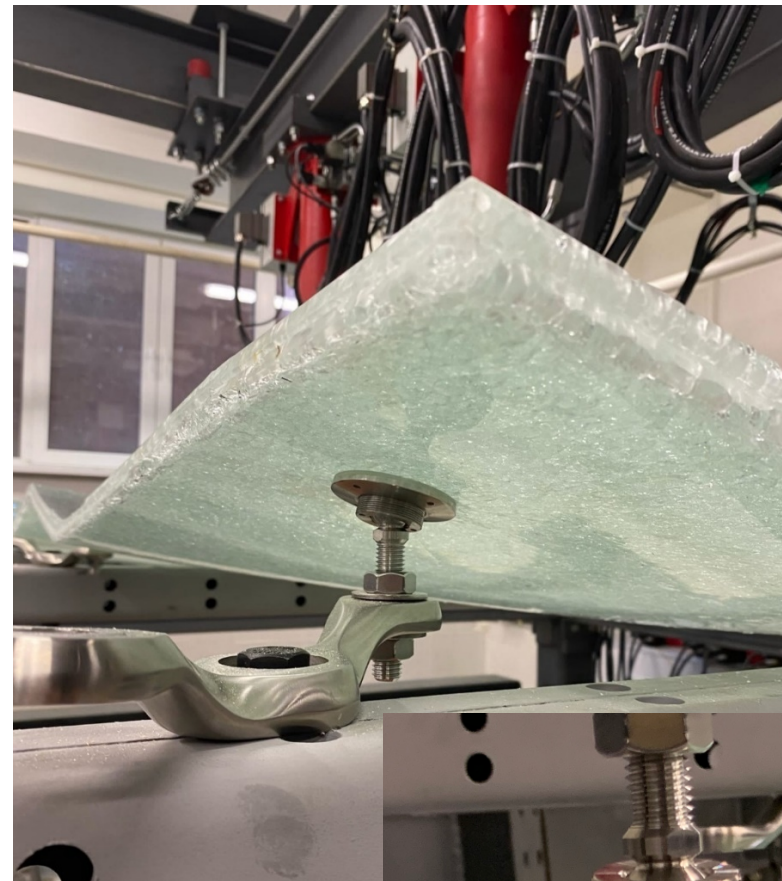


А также датчики перемещений

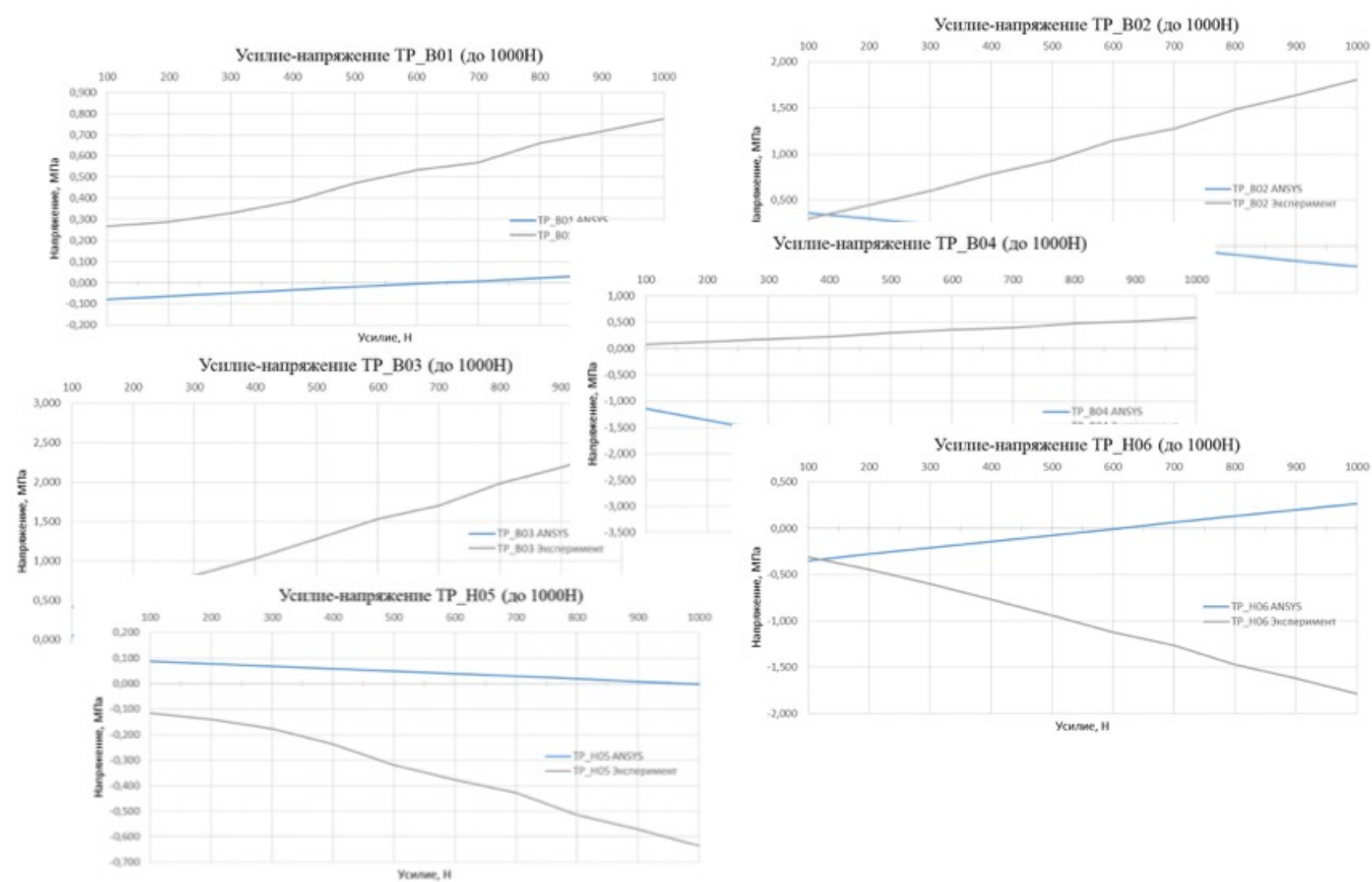


Испытание проводилось в три этапа, со снятием нагрузки после каждого этапа:

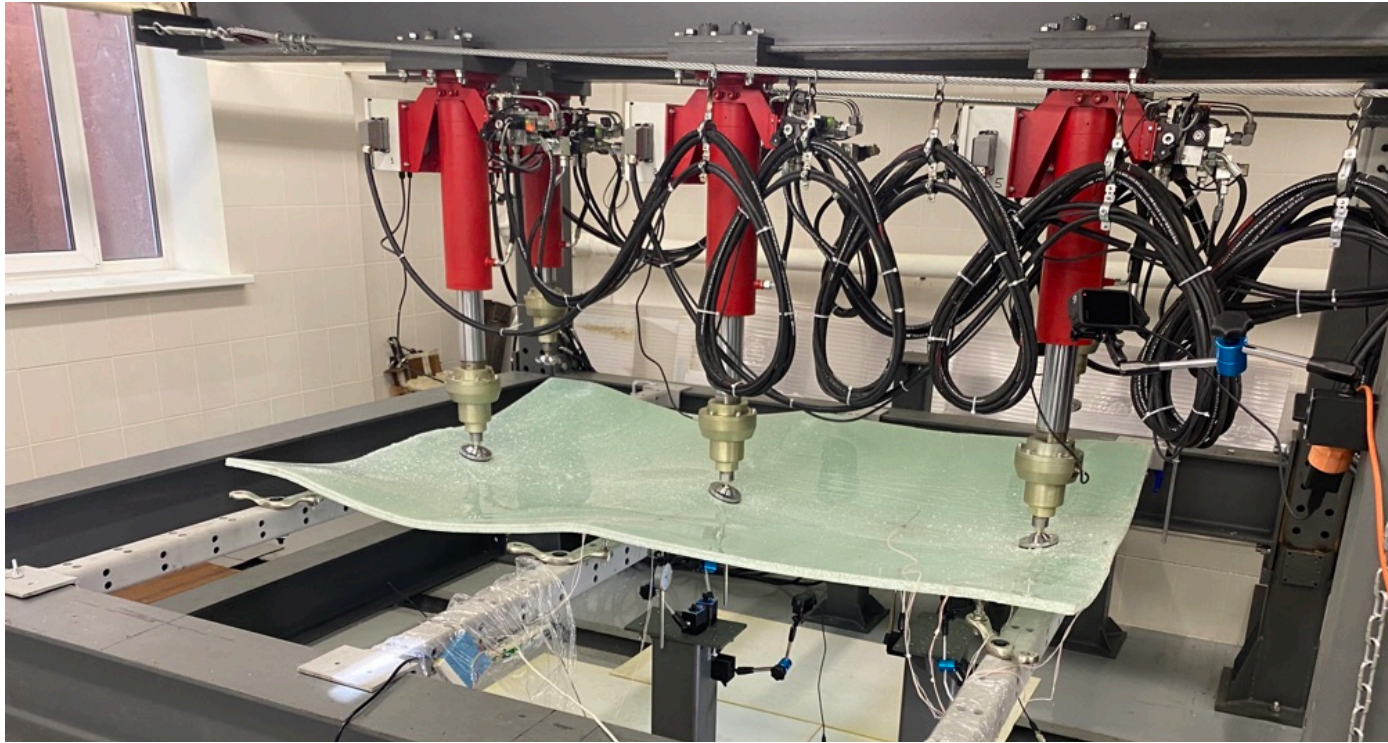
- до расчетных значений нагрузок (500 Н);
- до двойных расчетных нагрузок (1000 Н);
- до разрушения (13 000 Н)



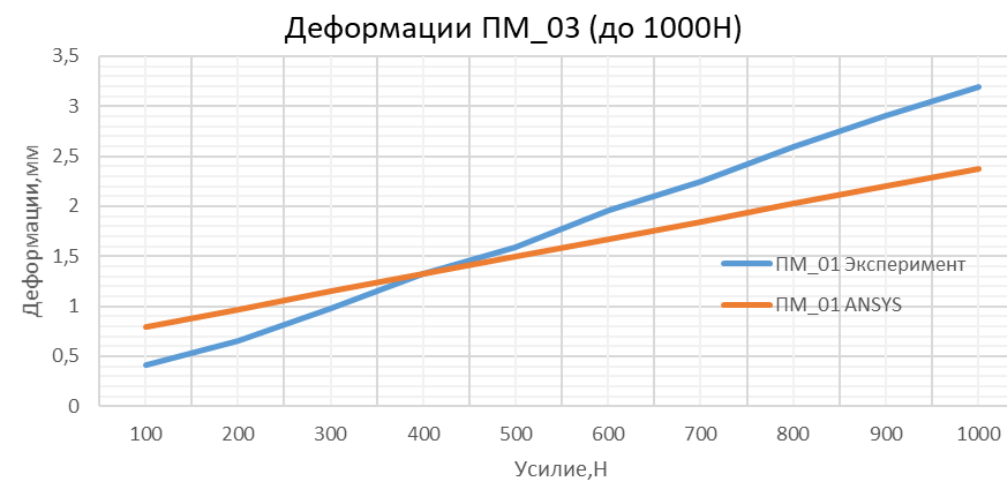
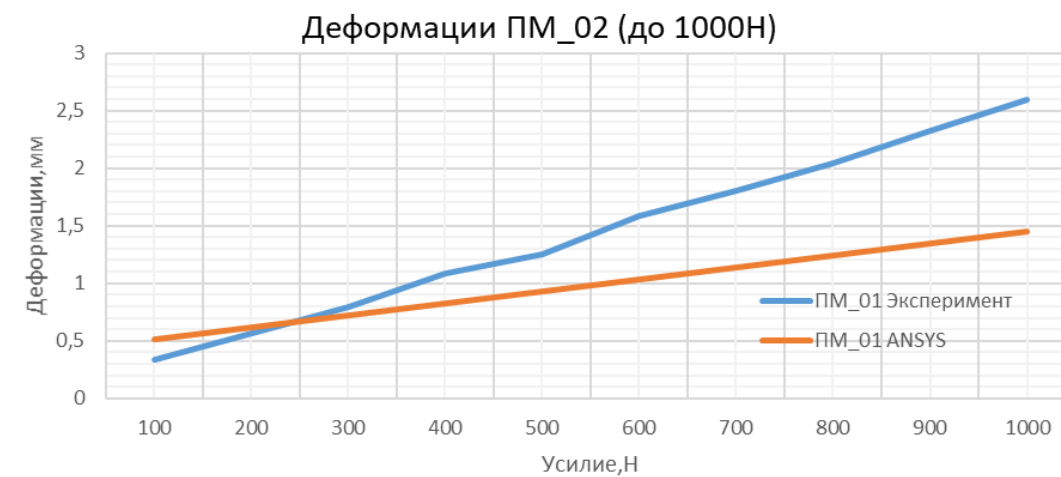
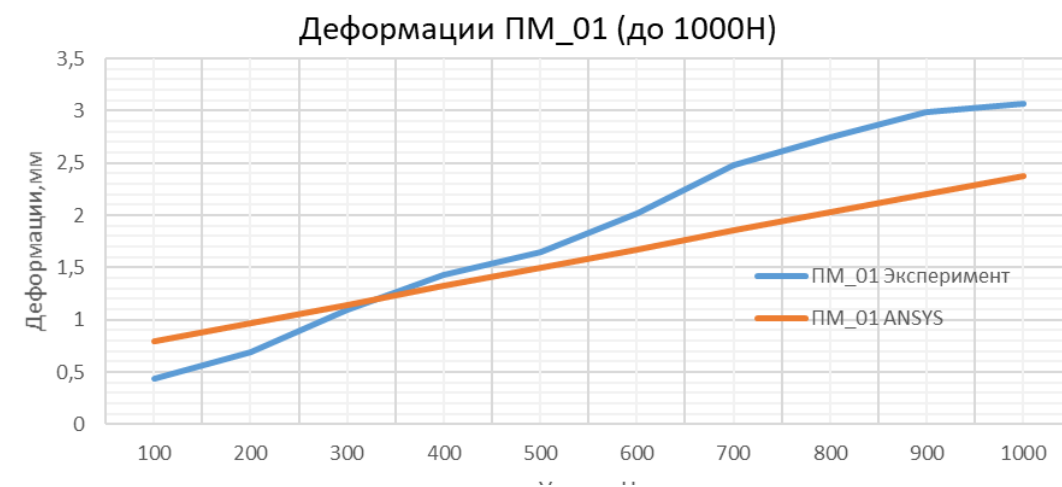
3. Обработка результатов испытаний



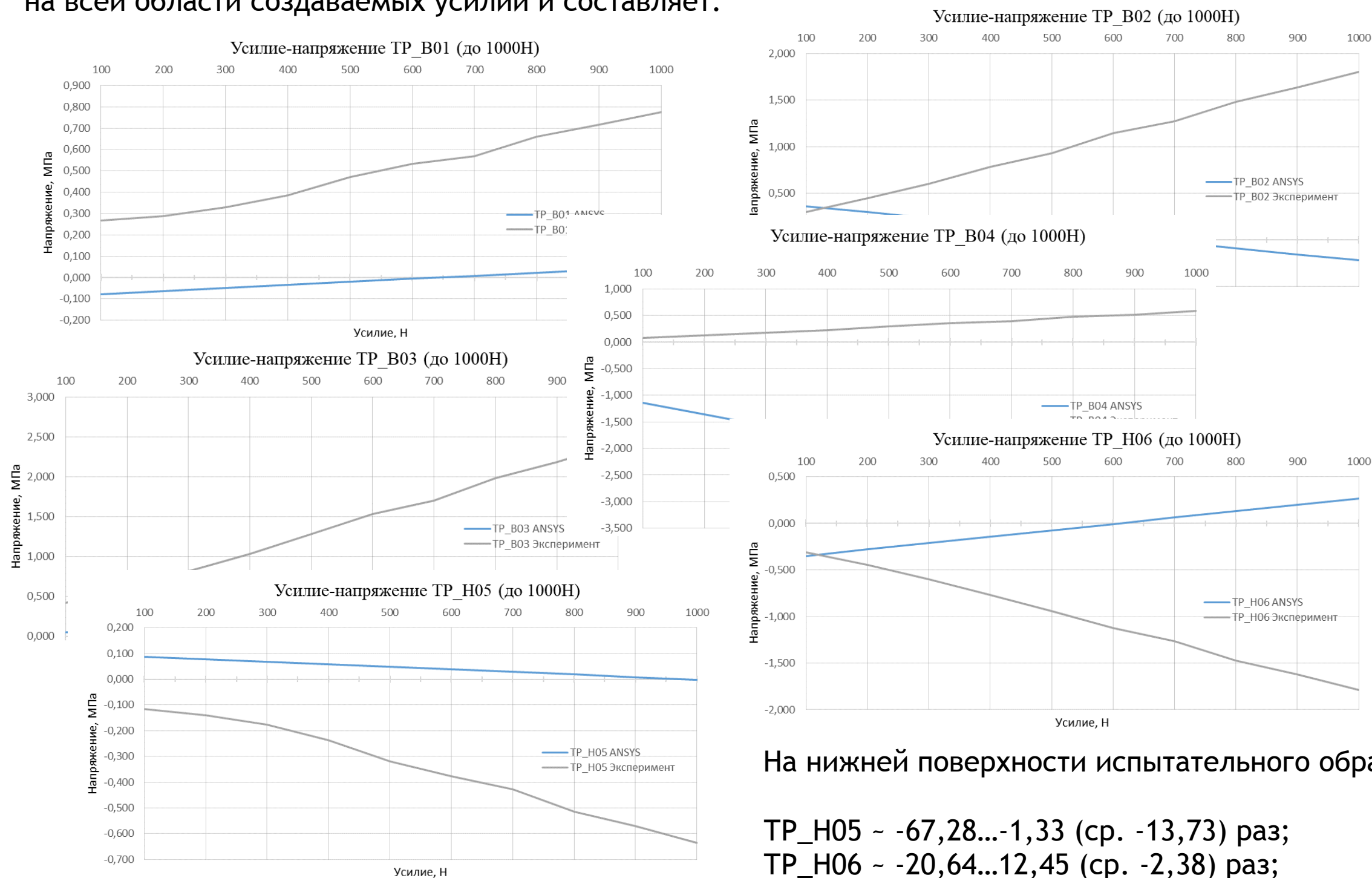
В процессе испытания фиксировались данные с силозадающих устройств, со смонтированных тензодатчиков и датчиков перемещений



Далее мы сравнили полученные экспериментальные данные с аналитическими



Разница в значениях напряжений (МПа)
не линейная и составляет различные коэффициенты
на всей области создаваемых усилий и составляет:



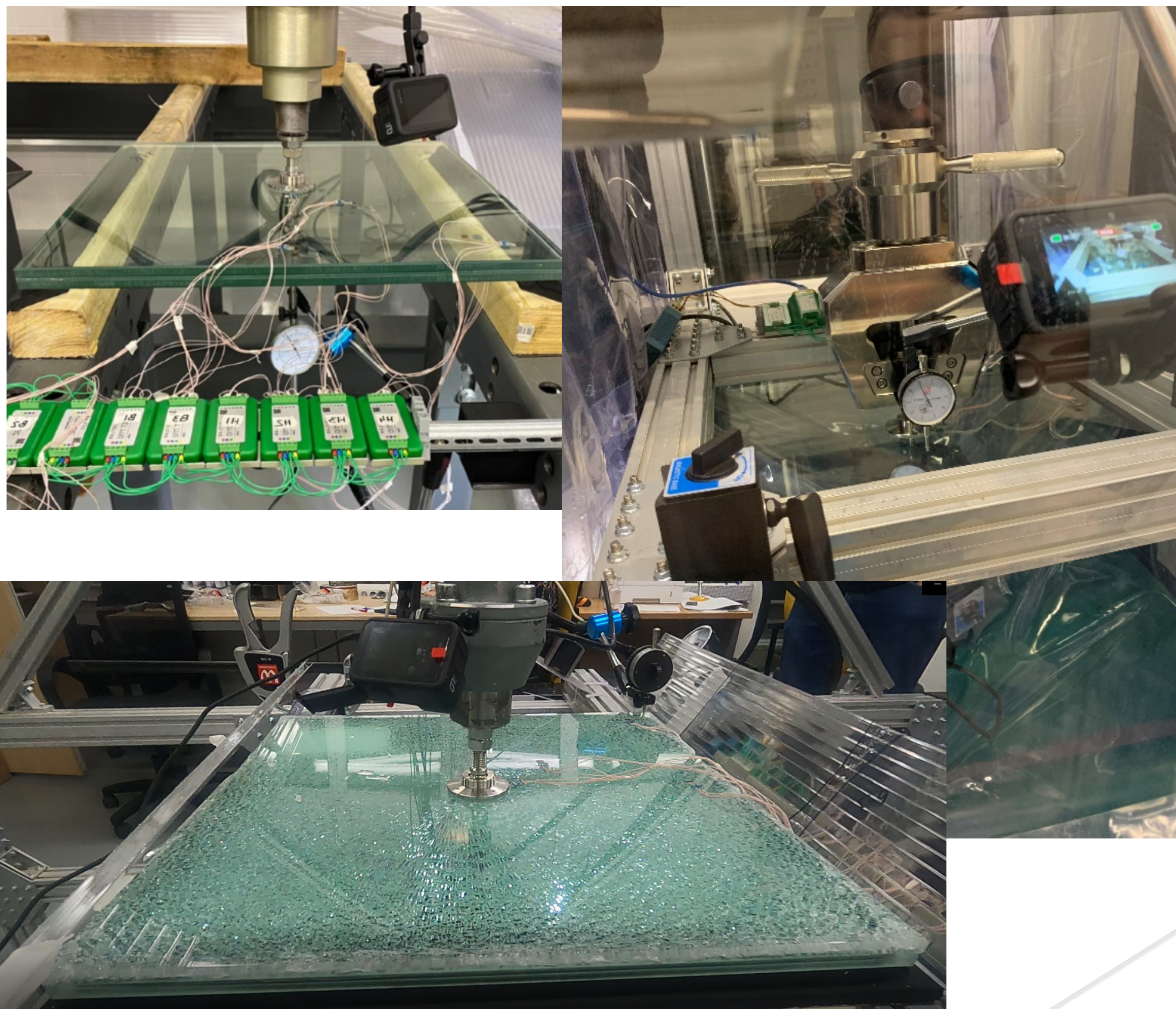
На нижней поверхности испытательного образца:

TP_H05 ~ -67,28...-1,33 (ср. -13,73) раз;
TP_H06 ~ -20,64...12,45 (ср. -2,38) раз;
TP_B07 ~ 5,92...8,68 (ср. 7,71) раз;
TP_B08 ~ -45,88...28,39 (ср. -9,96) раз;

На верхней поверхности испытательного образца:

TP_B01 ~ -92,12...67,10 (ср. -1,12) раз;
TP_B02 ~ -52,16...28,59 (ср. -4,07) раз;
TP_B03 ~ 7,81...10,14 (ср. 9,25) раз;
TP_B04 ~ -0,19...-0,07 (ср. -0,14) раз;

Для верификации данных по креплению данных изделий (рутелей) были произведены дополнительные аналогичные испытания, но на фрагментах креплений по различным возможным вариантам закреплений



По аналогии с уже проведенными испытаниями, также была разработана программа на основании проведенных расчетов и определены места с максимальными напряжениями для каждой схемы закрепления

Схема установки тензорезисторов на верхнем стекле

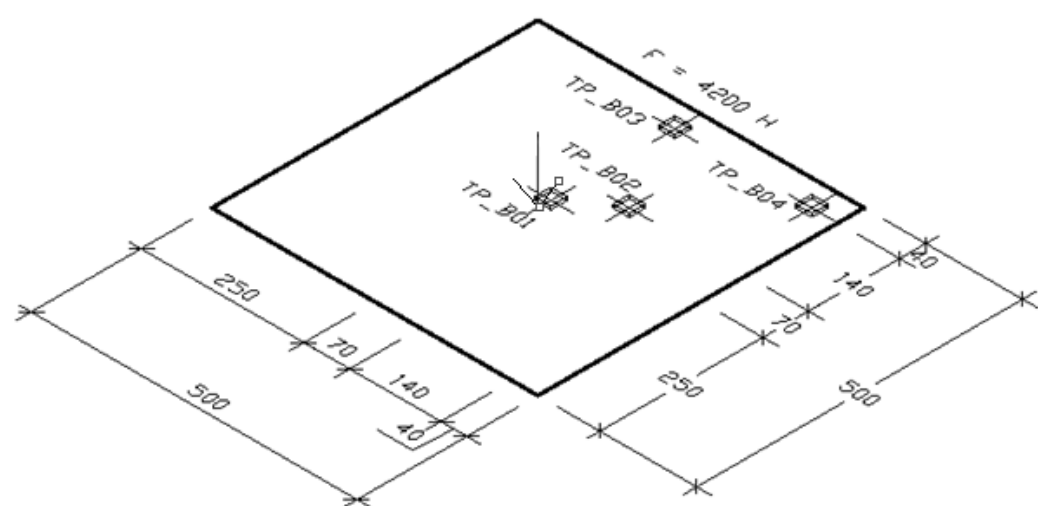
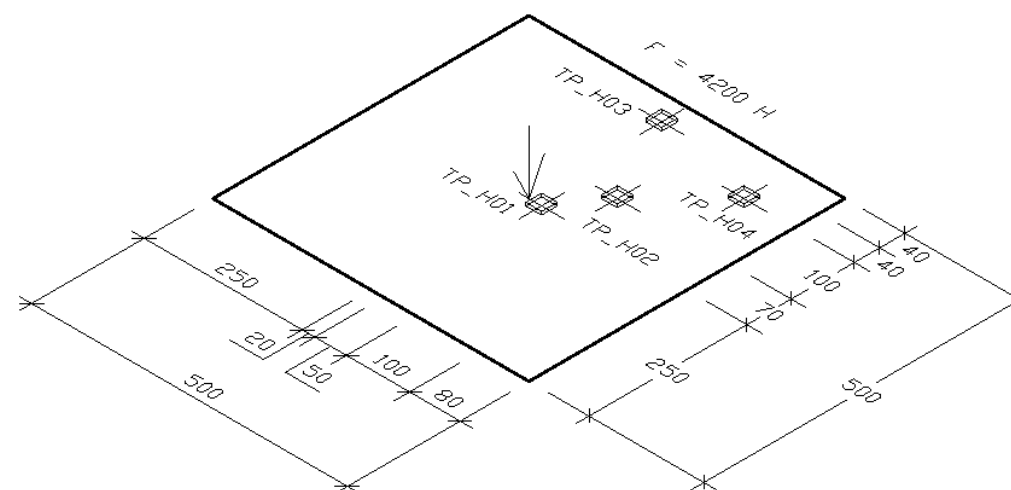
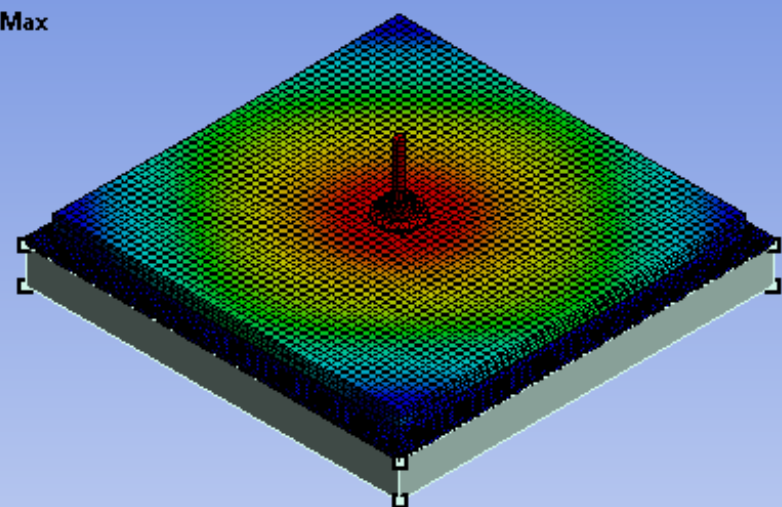


Схема установки тензорезисторов на нижнем стекле



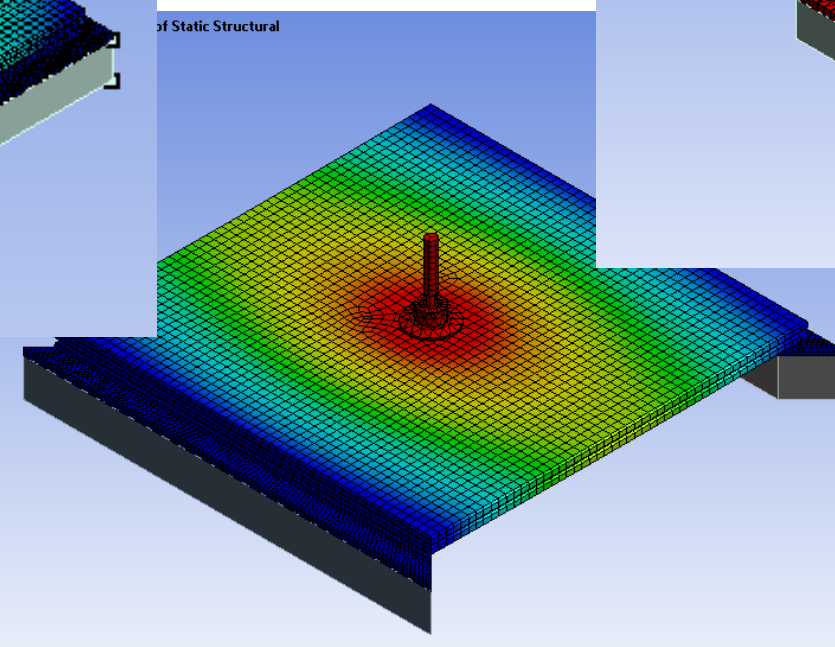
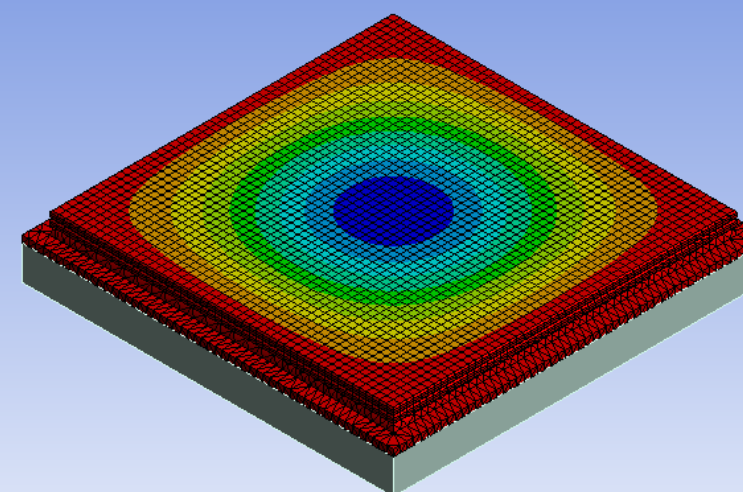
B: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1

4,1922 Max
3,7264
3,2606
2,7948
2,329
1,8632
1,3974
0,93161
0,4658
0 Min



AM: Static Structural
Directional Deformation
Type: Directional Deformation(Y Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System
Time: 10 s
01.08.2022 13:32

0,025596 Max
-0,044957
-0,11551
-0,18606
-0,25662
-0,32717
-0,39772
-0,46827
-0,53883
-0,60938 Min

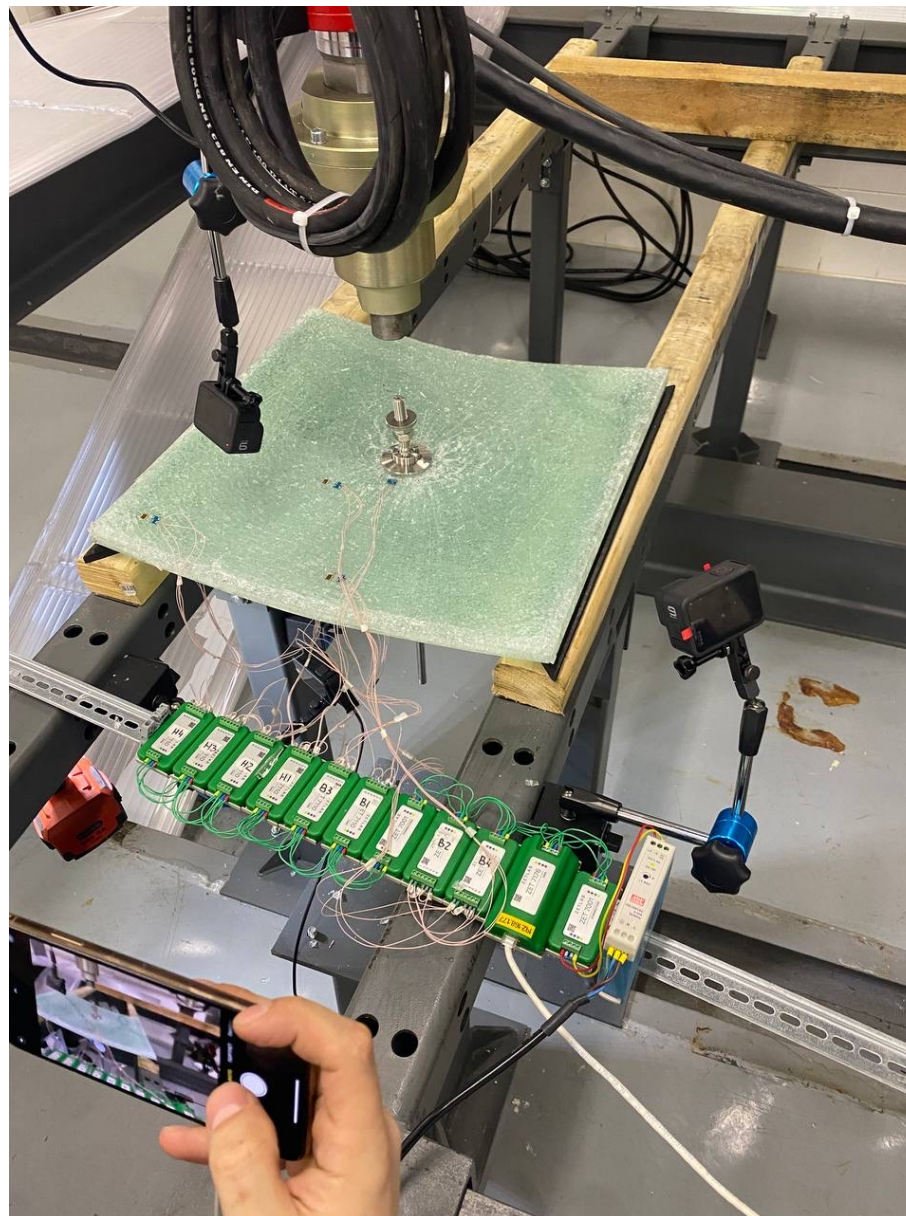


Остаточная деформация после снятия двойной расчетной нагрузки в 8400 Н составляет 0,64 мм, так же были заметны медленные процессы, приводящие остаточные деформации к нулевому значению.

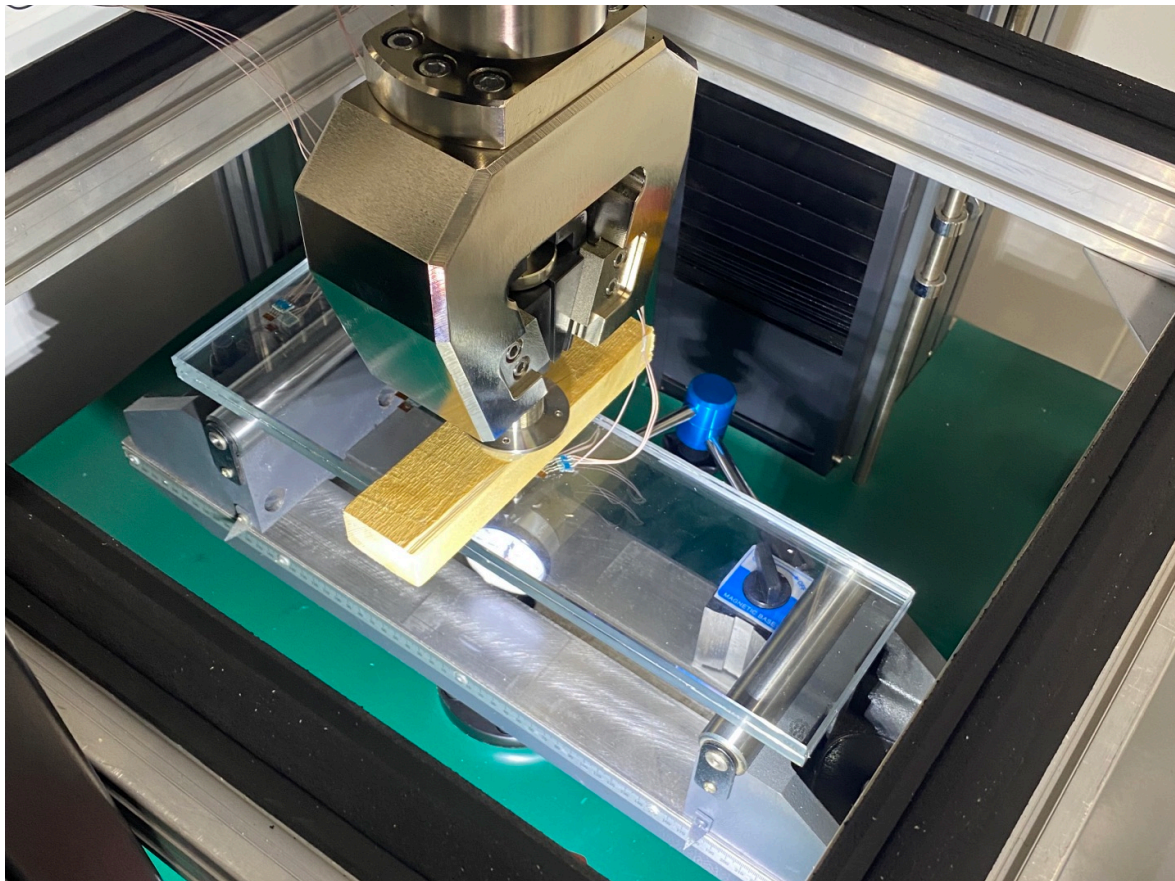
Разрушение верхнего стекла испытательного образца произошло при нагрузке около 20063 Н, далее последовало падение нагрузки до 1937 Н.

Разрушение нижнего стекла испытательного образца произошло при нагрузке около 2217 Н.

В результате разрушения произошел скол кромок стекла и остались следы воздействия нагрузки от рутеля, что видно на фотофиксации, представленной ниже

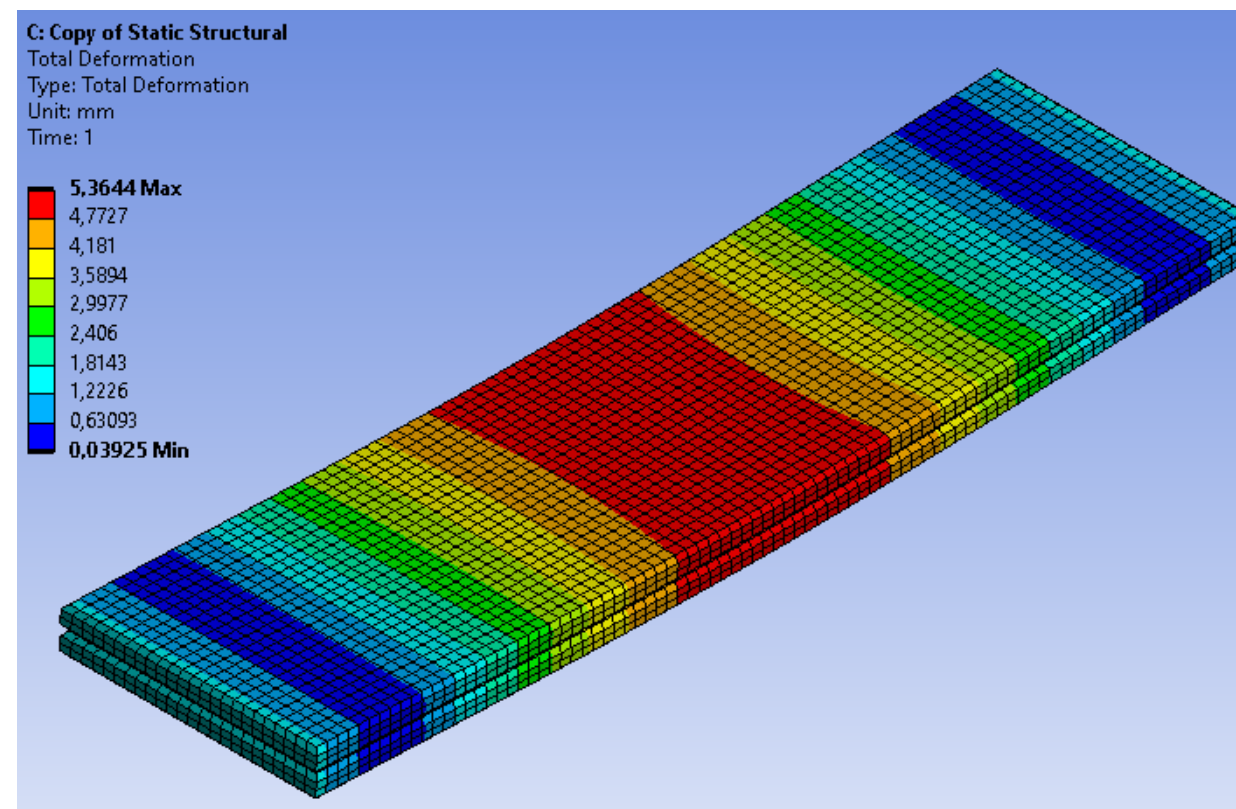


Для верификации тензодатчиков была испытана стеклянная балка представленная ниже



В качестве исходных данных, для сравнения напряжений по аналогии с предыдущими экспериментами была построена математическая модель данного испытательного образца

На основании полученных данных были откалиброваны тензорезисторы монтируемые на поверхности стекла

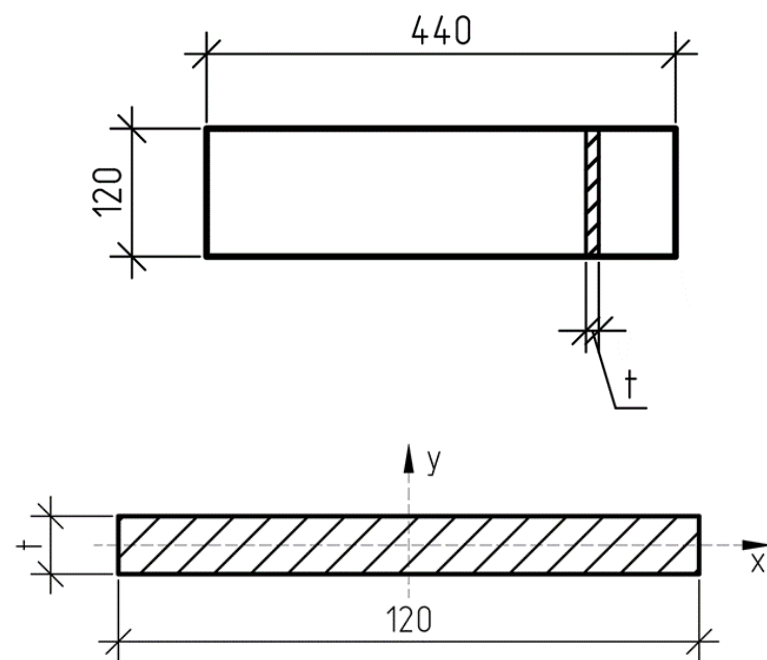


Испытательной лабораторией АО «ЦНИИПромзданий» были определены напряжения при четырехточечной нагрузке на поверхности стекол следующих типов:

- Флоат-стекло;
- Термоупрочненное стекло;
- Закаленное стекло.

Испытания проводились на серии из 36 образцов толщиной 6, 8 и 12 мм с разной обработкой кромок (притупление, шлифовка, полировка). Схема проведения испытаний и геометрические характеристики образцов представлены ниже:

Сечение №1



Сечение №2

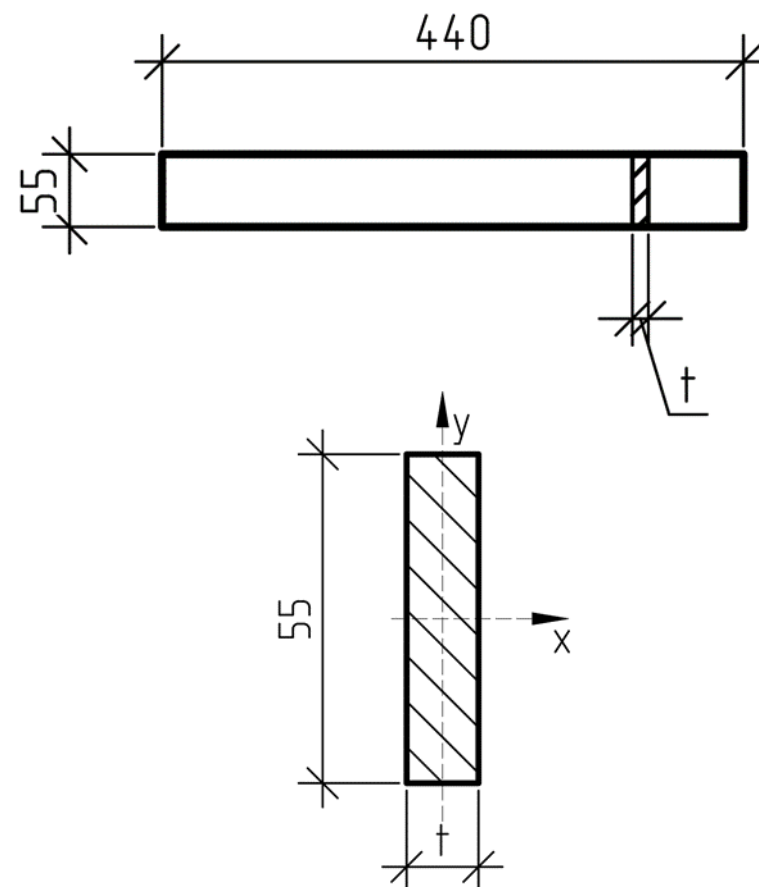
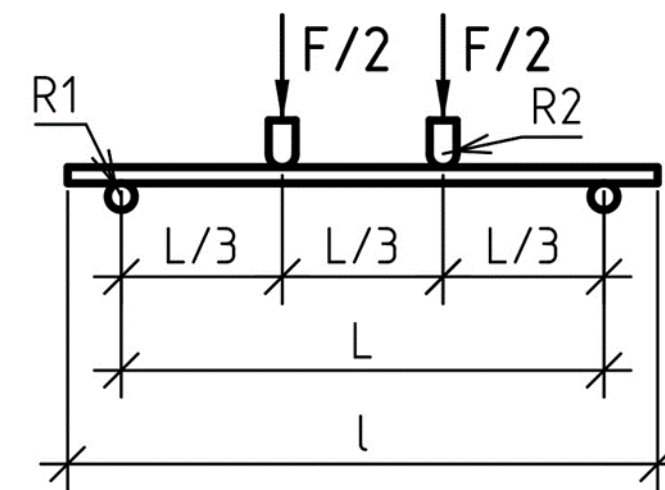
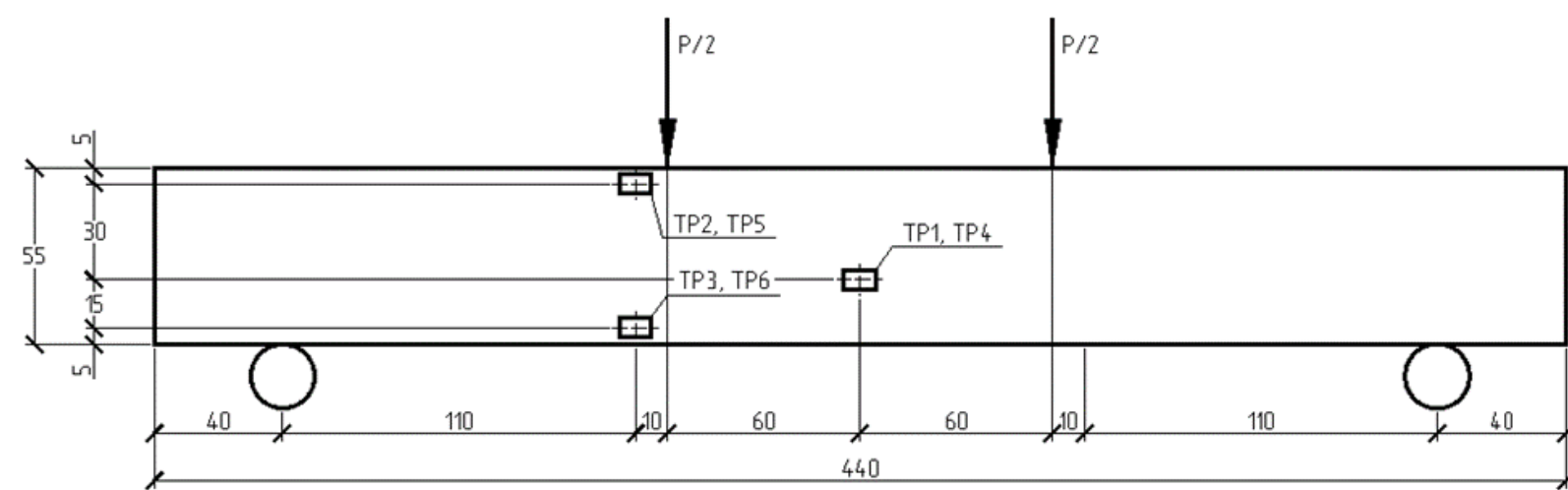
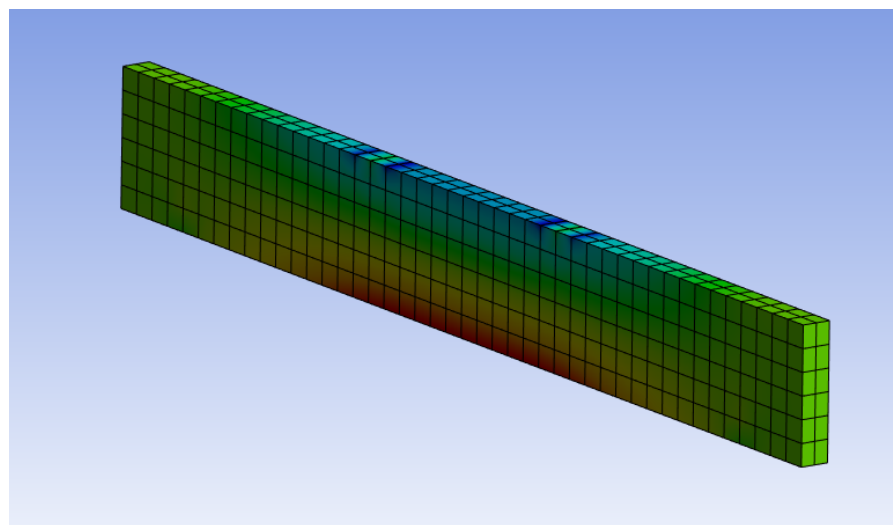
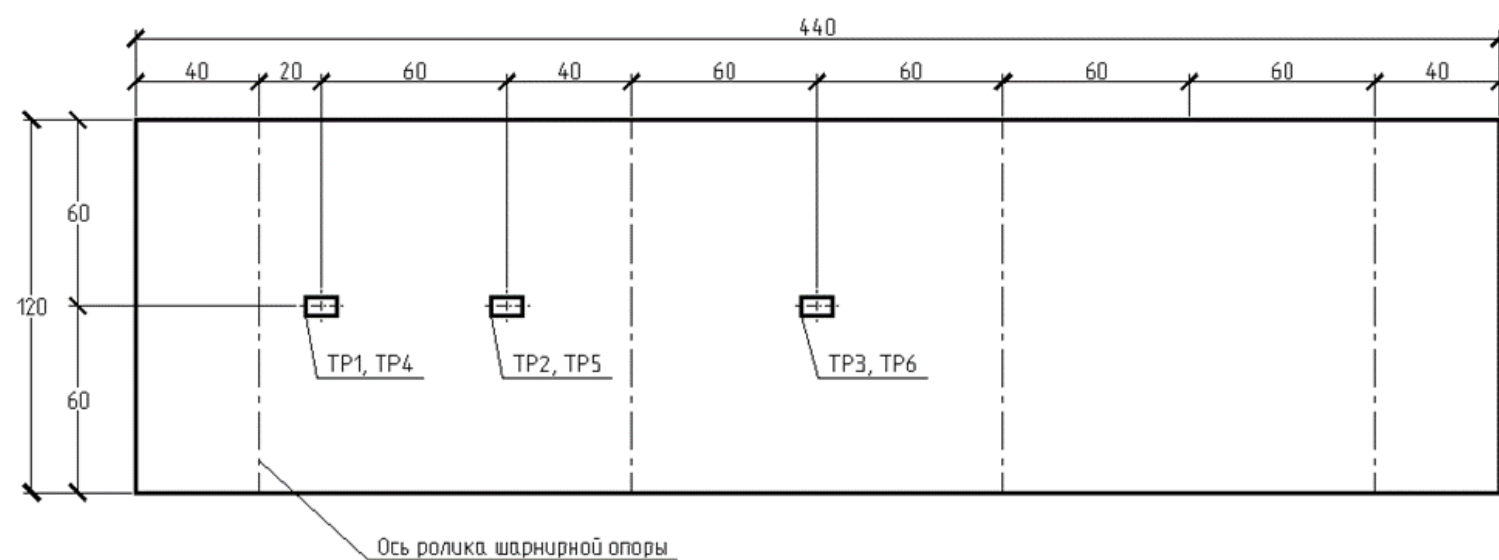
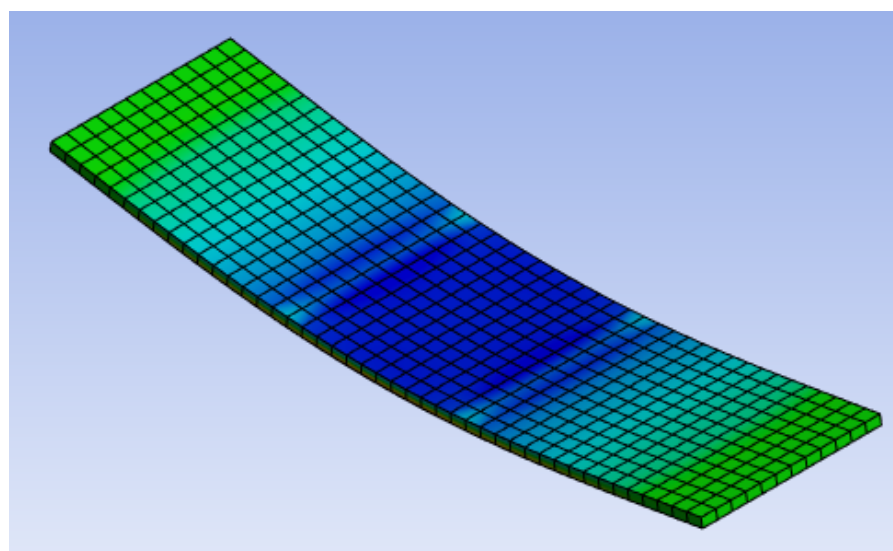
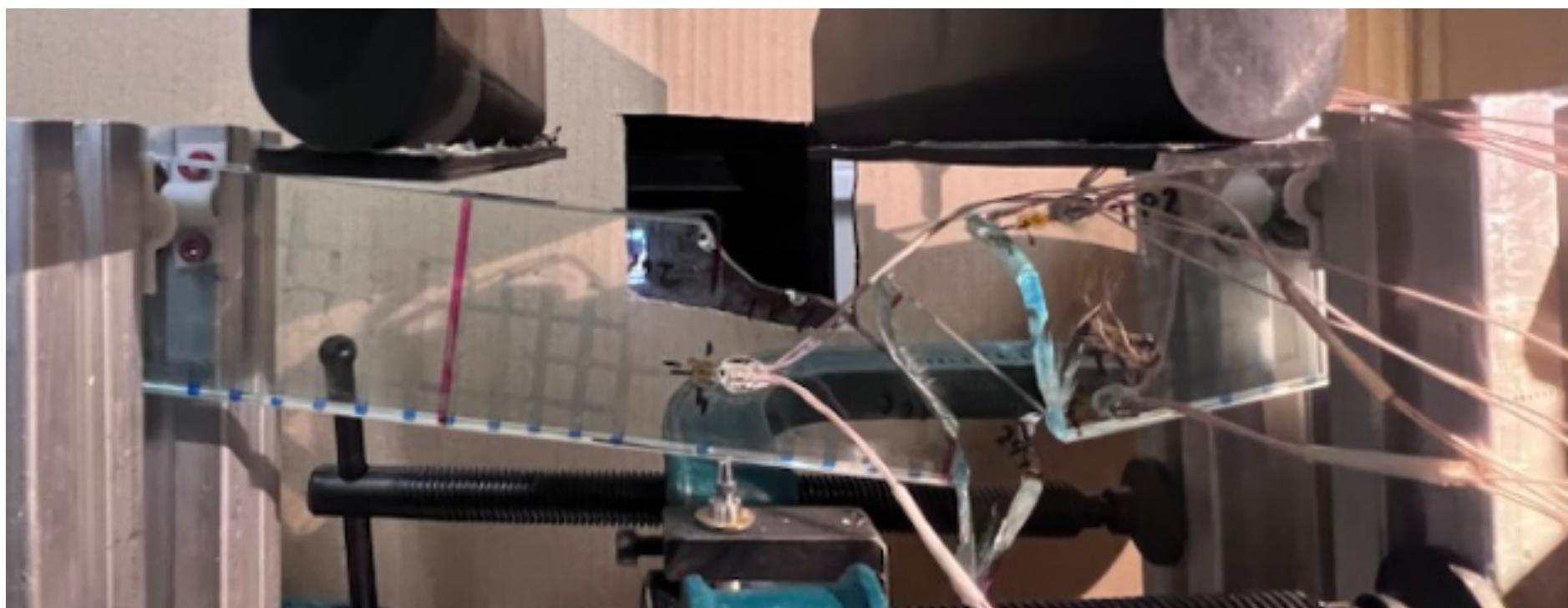


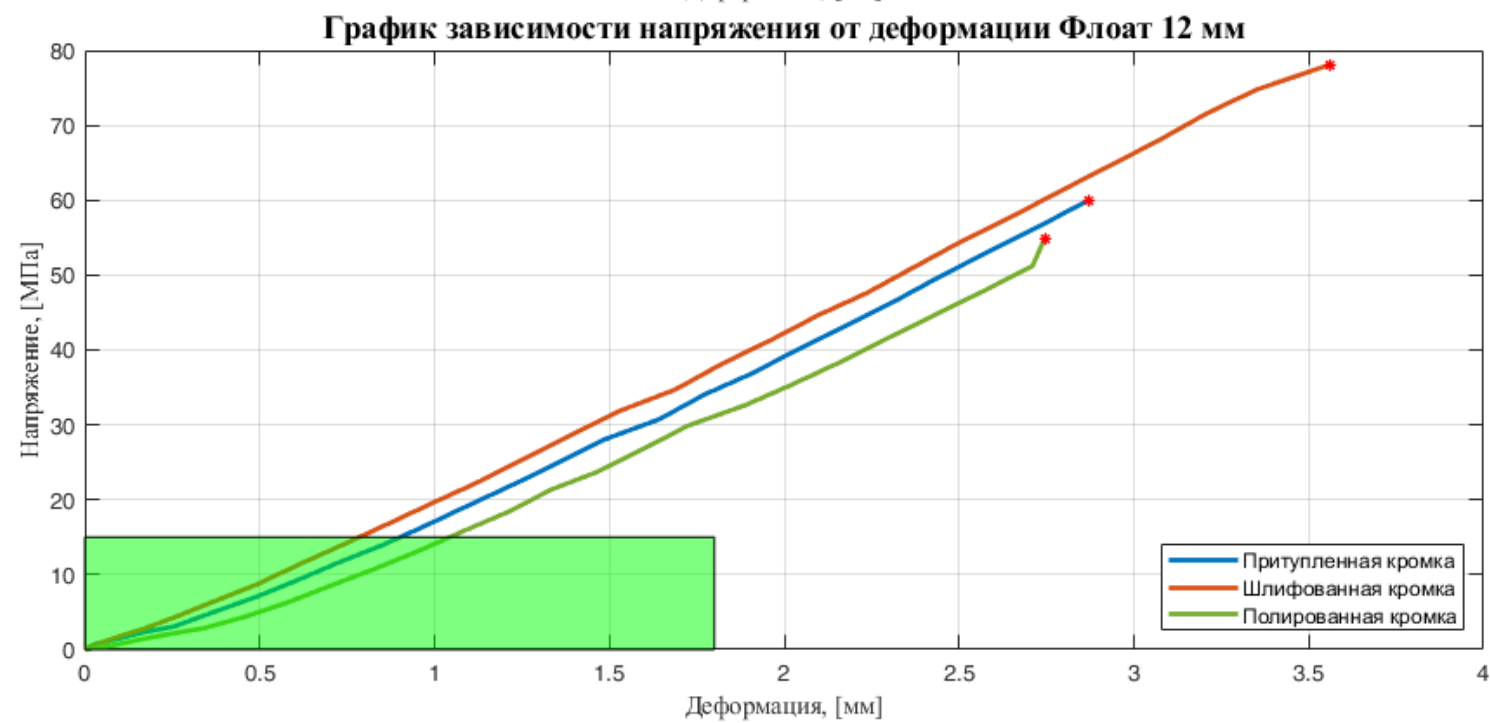
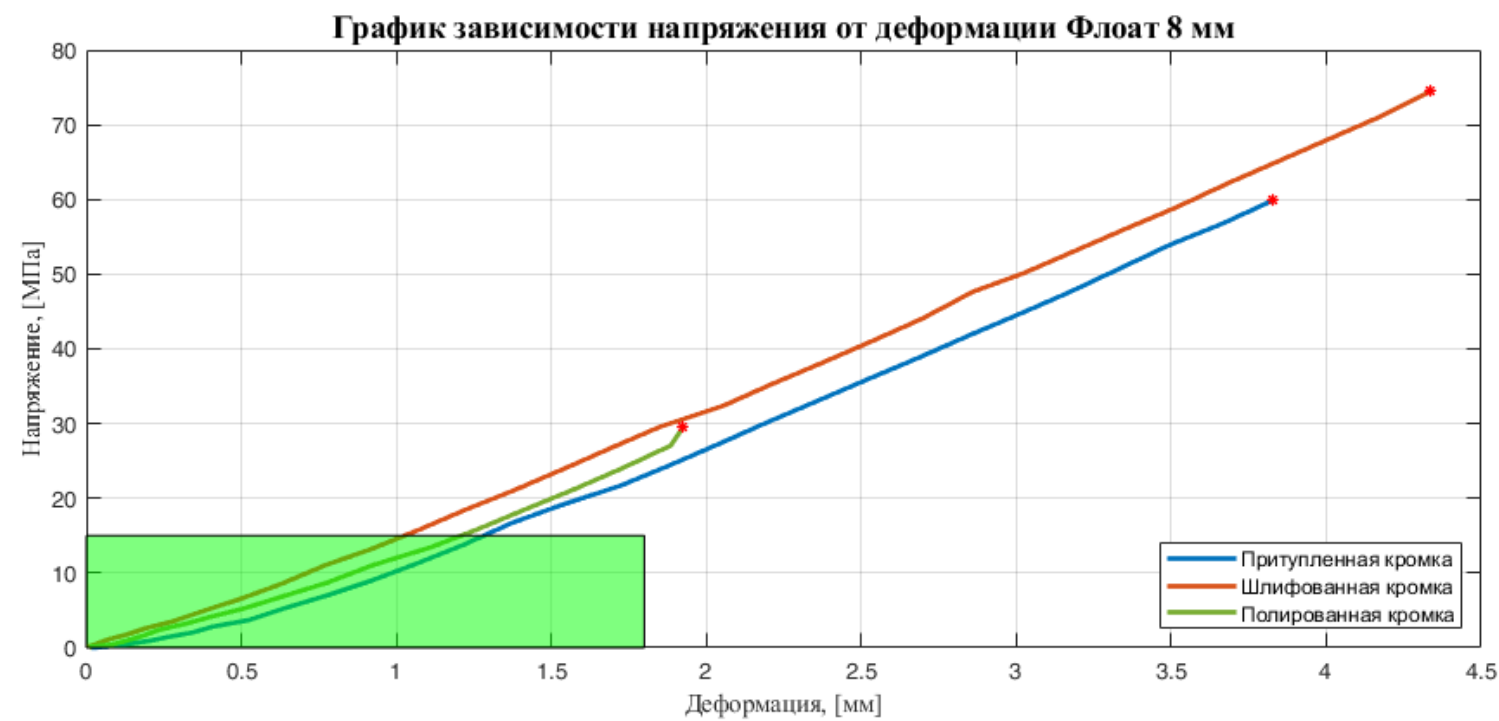
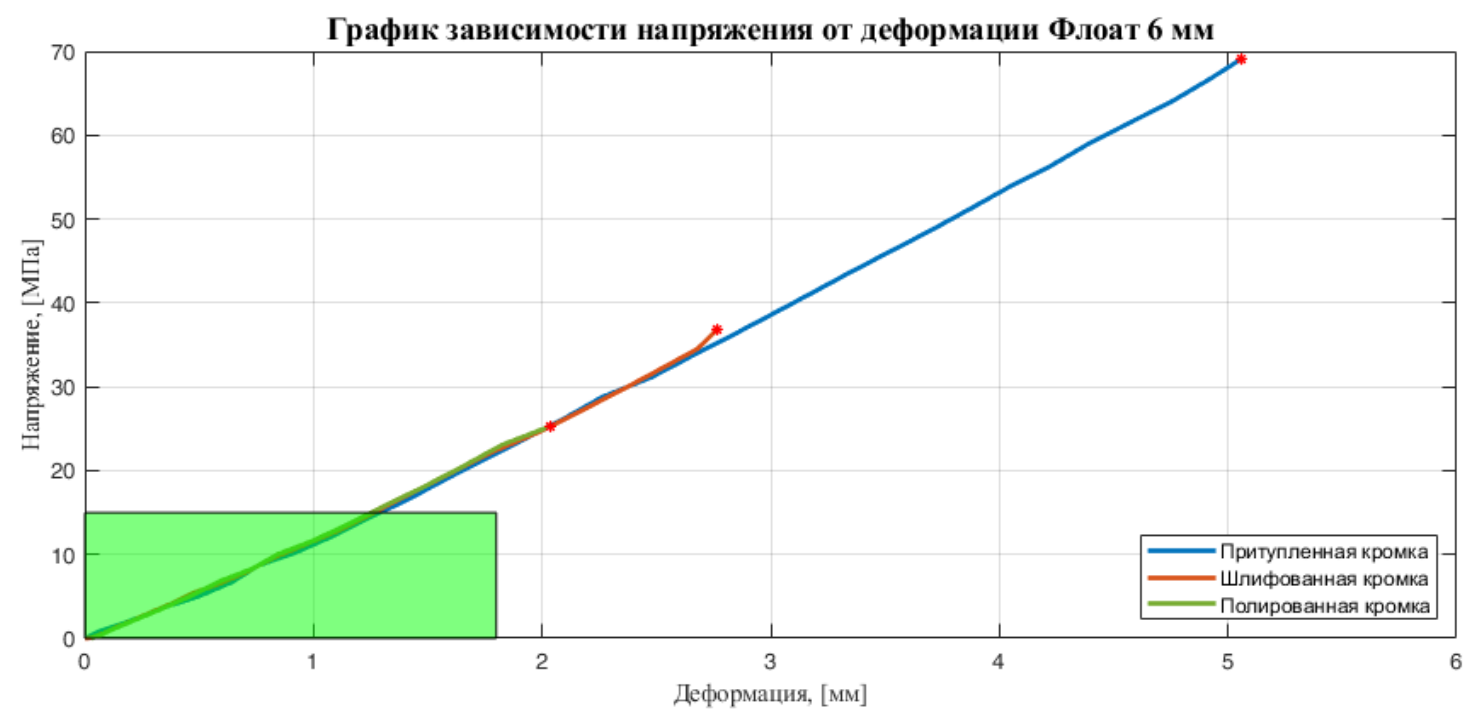
Схема проведения испытаний

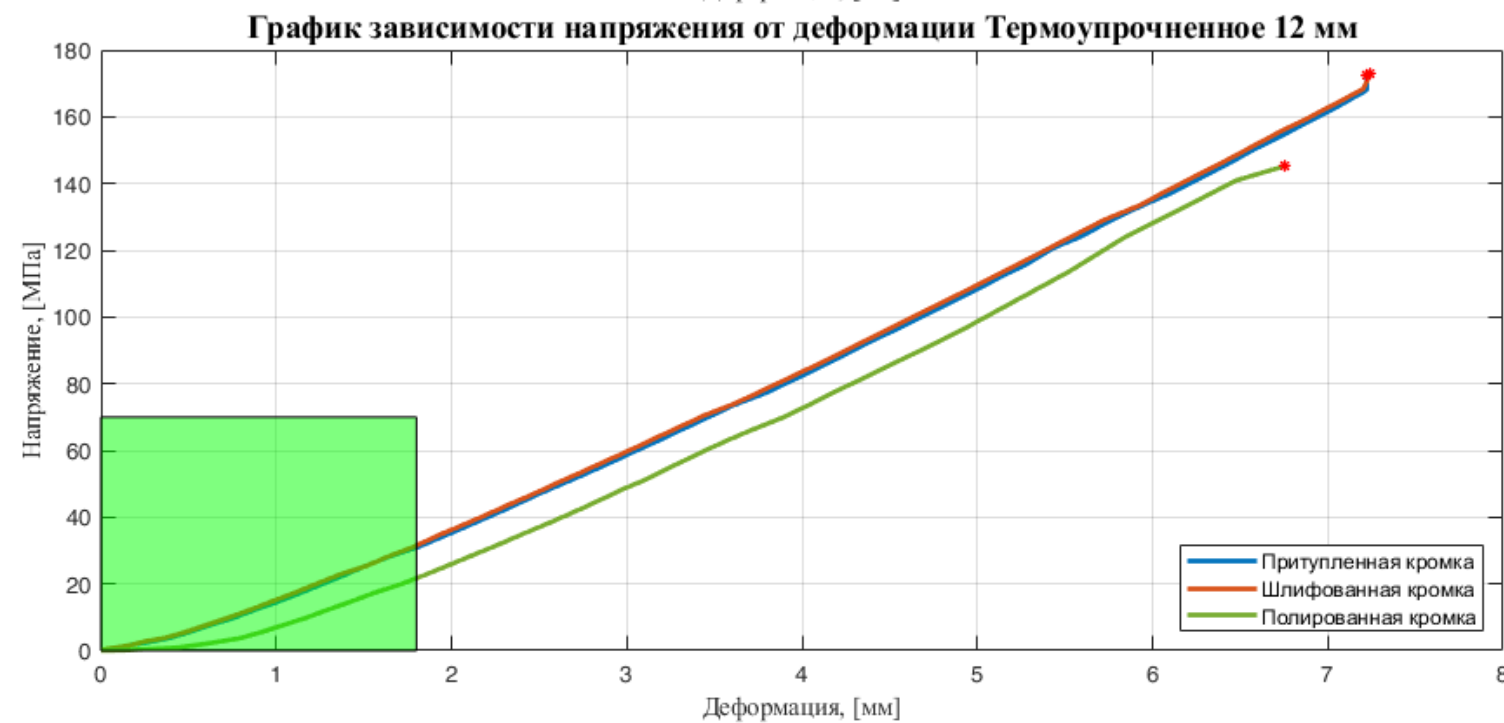
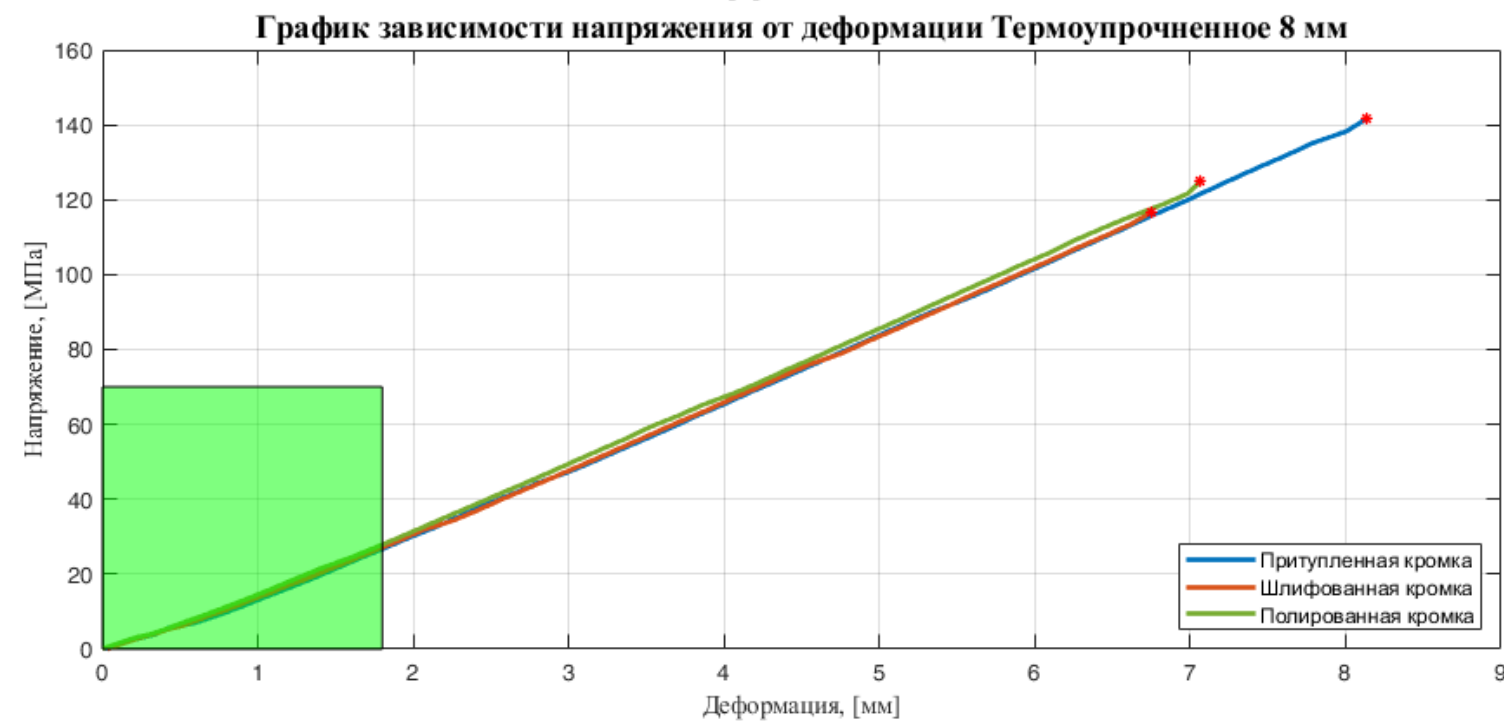
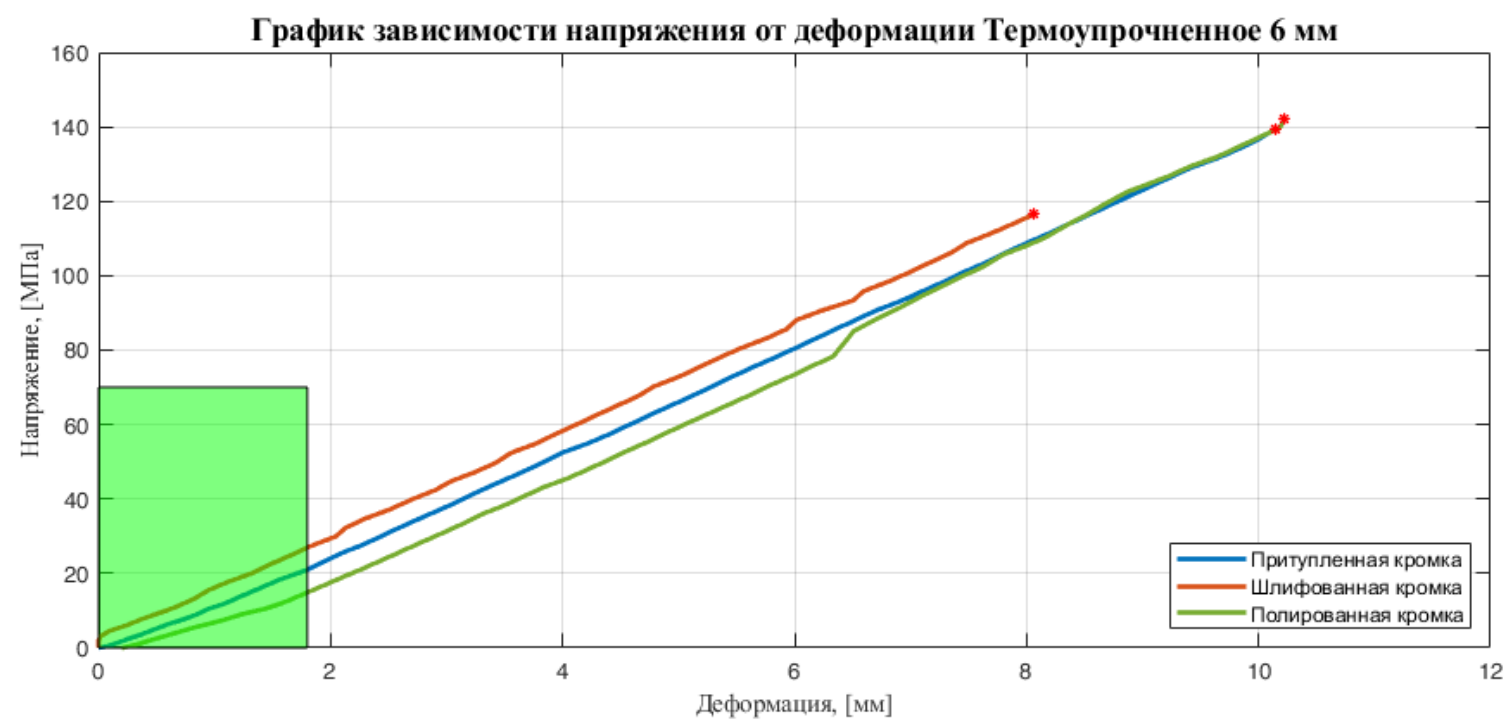


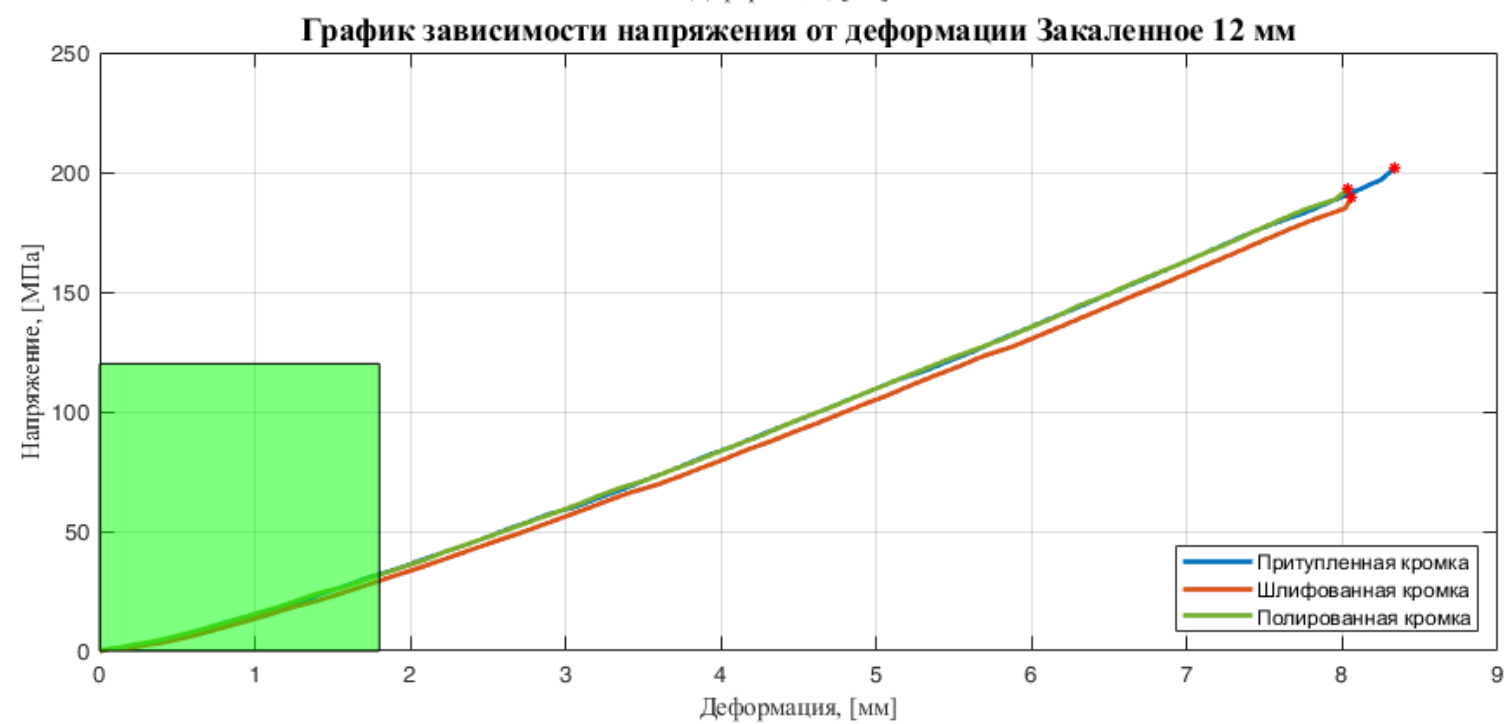
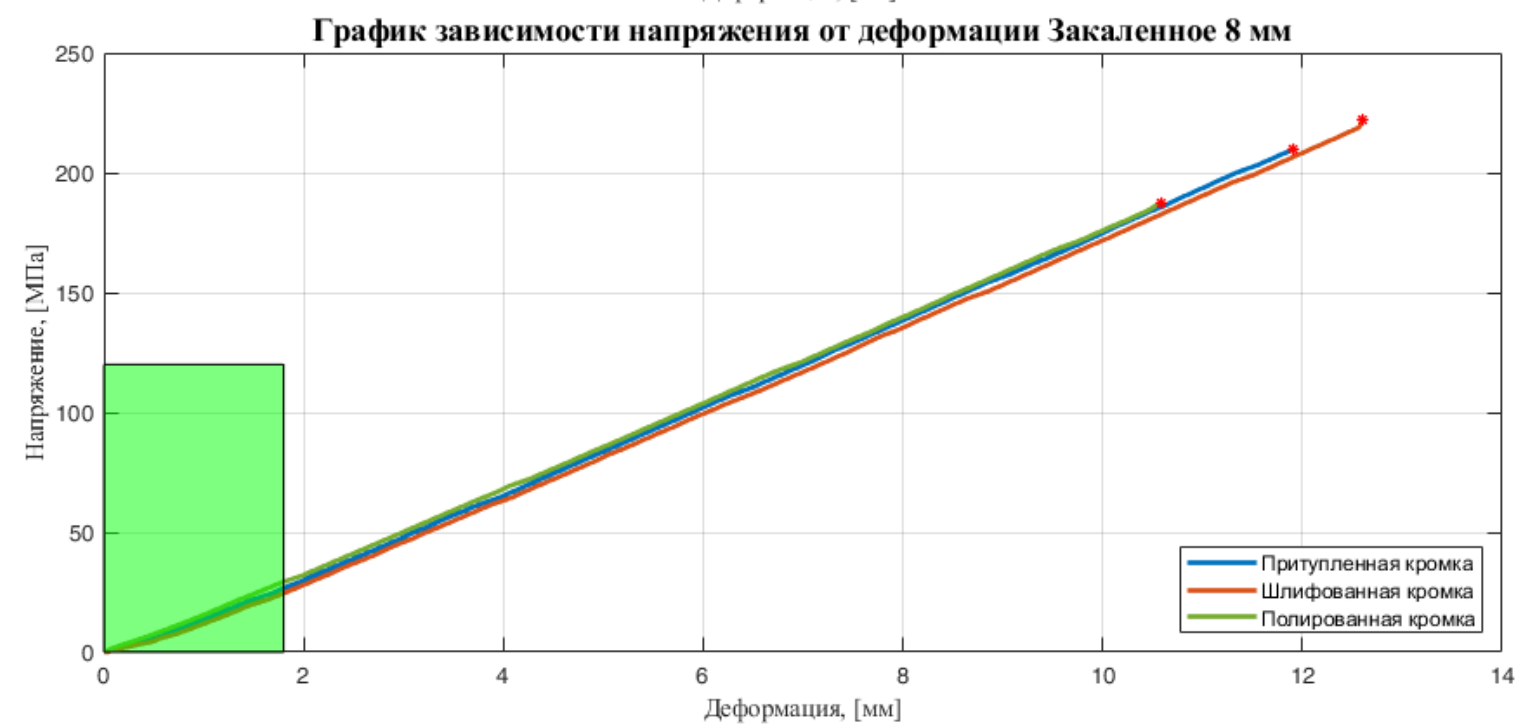
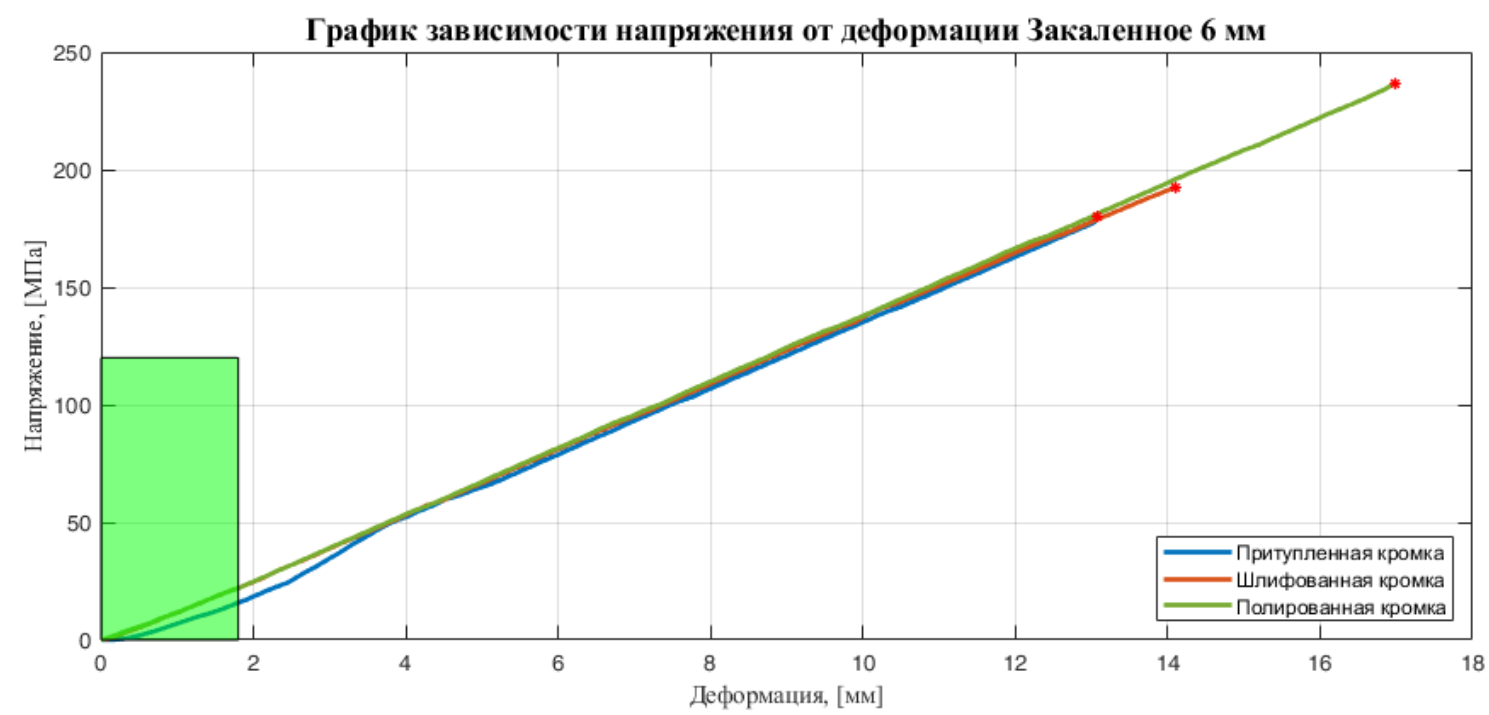
Схемы расположения тензорезисторов были выбраны по изополям напряжений исходя из результатов расчетов, выполненных в программных комплексах SCAD и ANSYS.











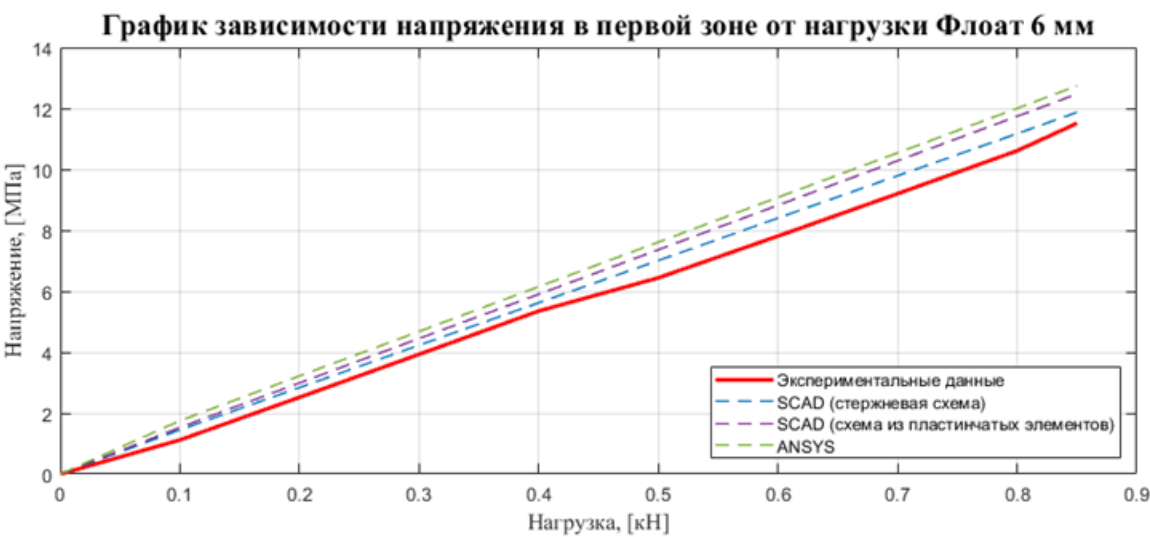
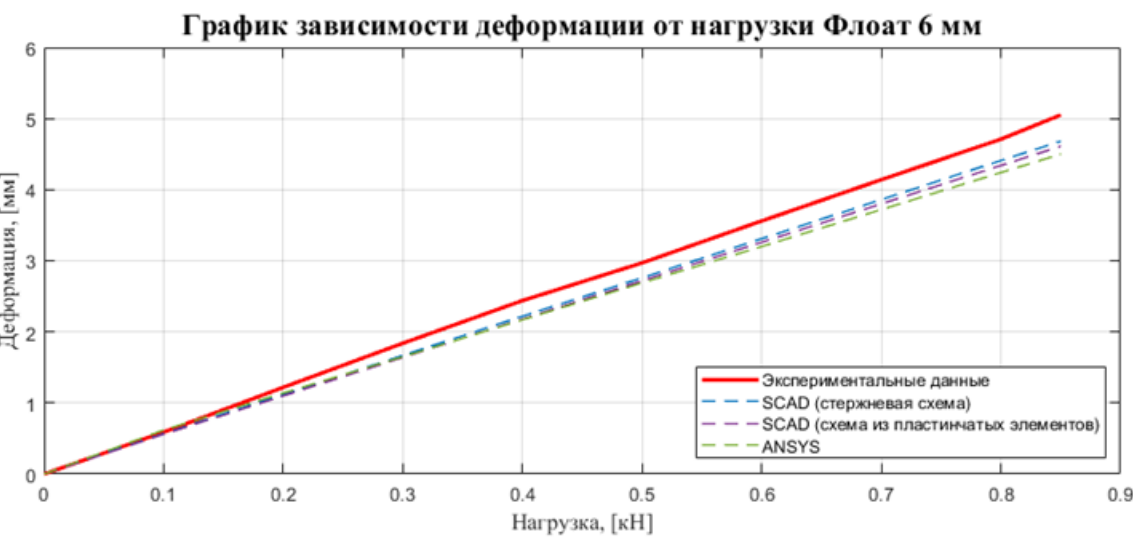
Разрушение образцов всех типов и толщин происходило вне зоны нормативных значений.

Запас прочности представлен в таблице ниже:

Тип стекла	Толщина, мм	Минимальное напряжение разрушения (из трех образцов), МПа	Нормативная прочность, МПа	Запас прочности, %
Флоат	6	25.305	15	69
	8	29.477		97
	12	54.917		266
ТП	6	116.429	70	66
	8	116.631		67
	12	145.233		107
ЗС	6	180.229	120	50
	8	187.296		56
	12	189.786		58

Ниже представлены результаты сравнения экспериментальных данных с аналитическими для различных типов стекол толщиной 6 мм:

Флоат-стекло толщиной 6 мм



Термоупрочненное стекло толщиной 6 мм

График зависимости деформации от нагрузки ТП 6 мм

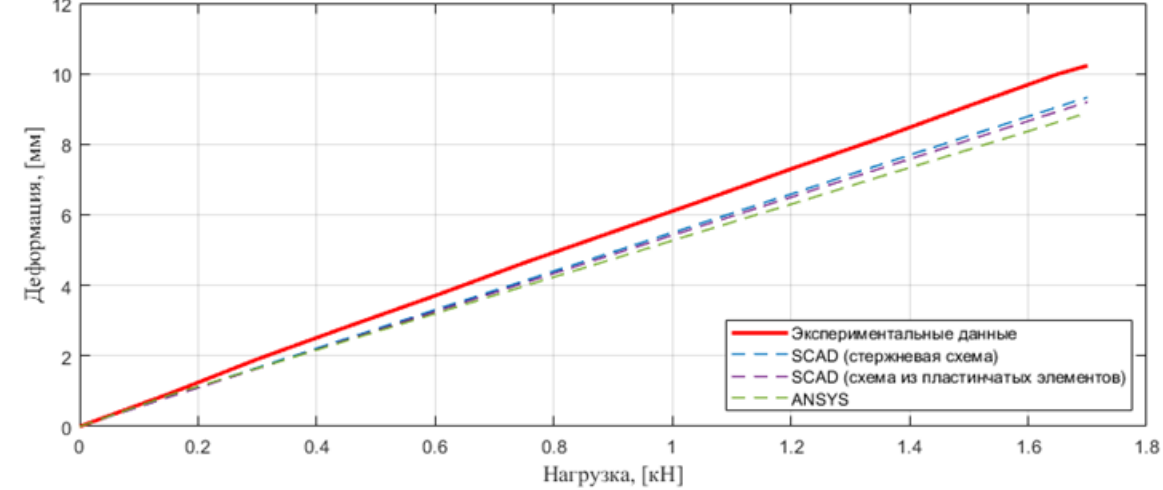


График зависимости напряжения в первой зоне от нагрузки ТП 6 мм

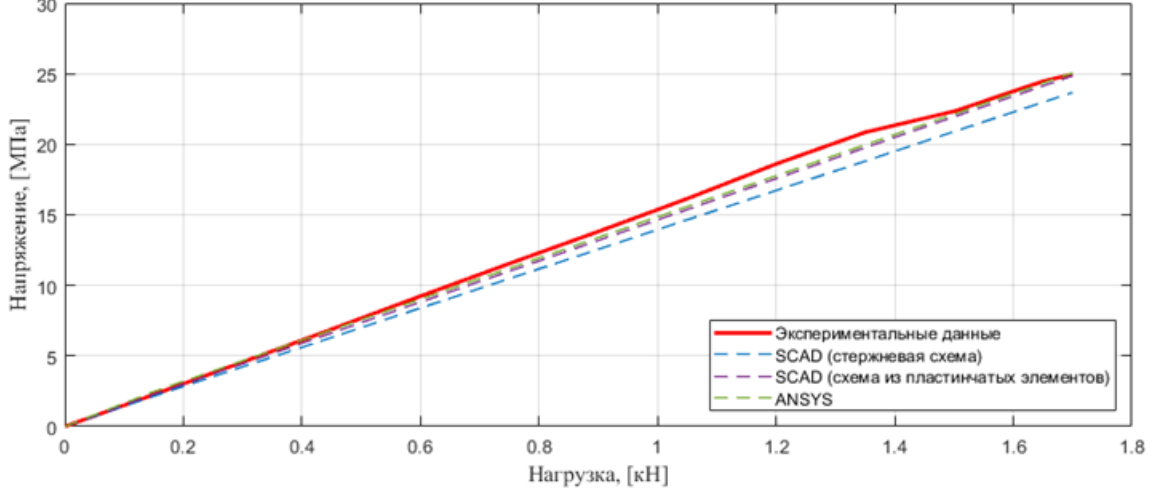


График зависимости напряжения во второй зоне от нагрузки ТП 6 мм

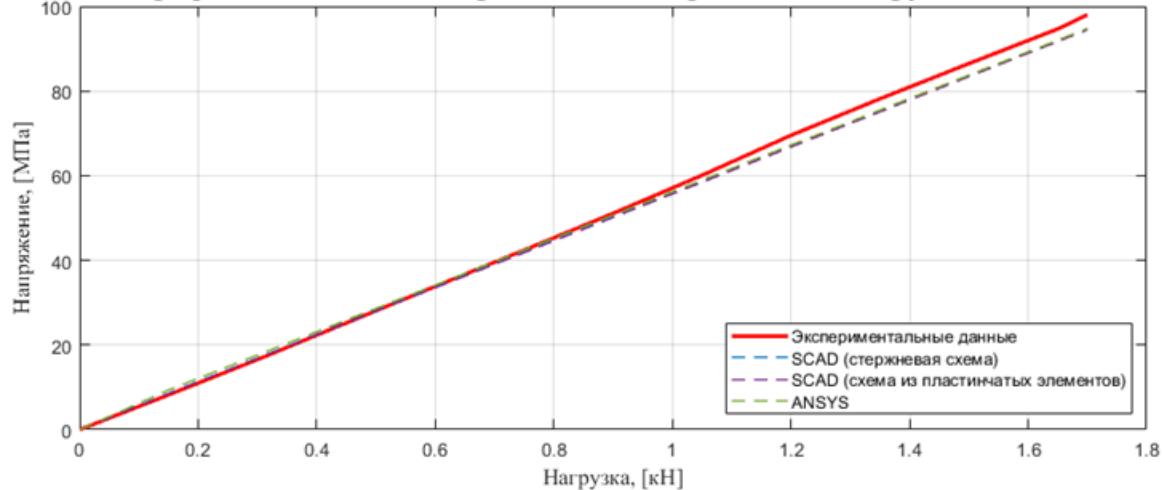
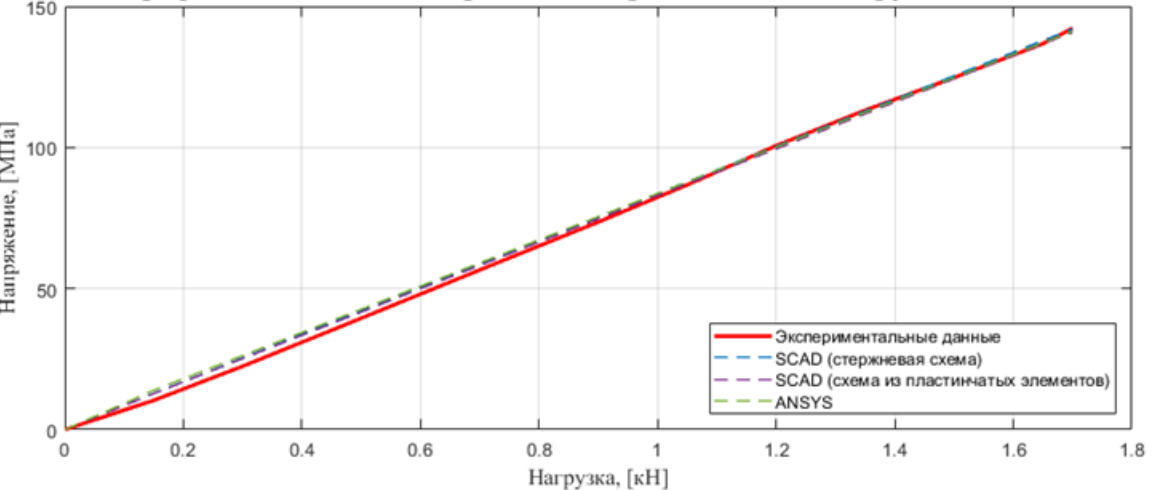


График зависимости напряжения в третьей зоне от нагрузки ТП 6 мм



Закаленное стекло толщиной 6 мм

График зависимости деформации от нагрузки ЗС 6 мм

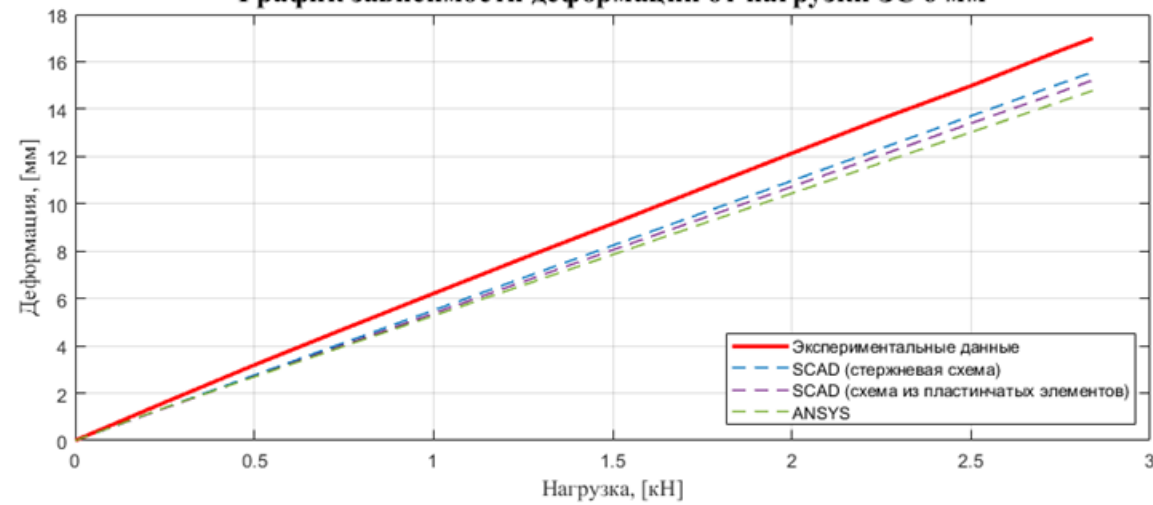


График зависимости напряжения в первой зоне от нагрузки ЗС 6 мм

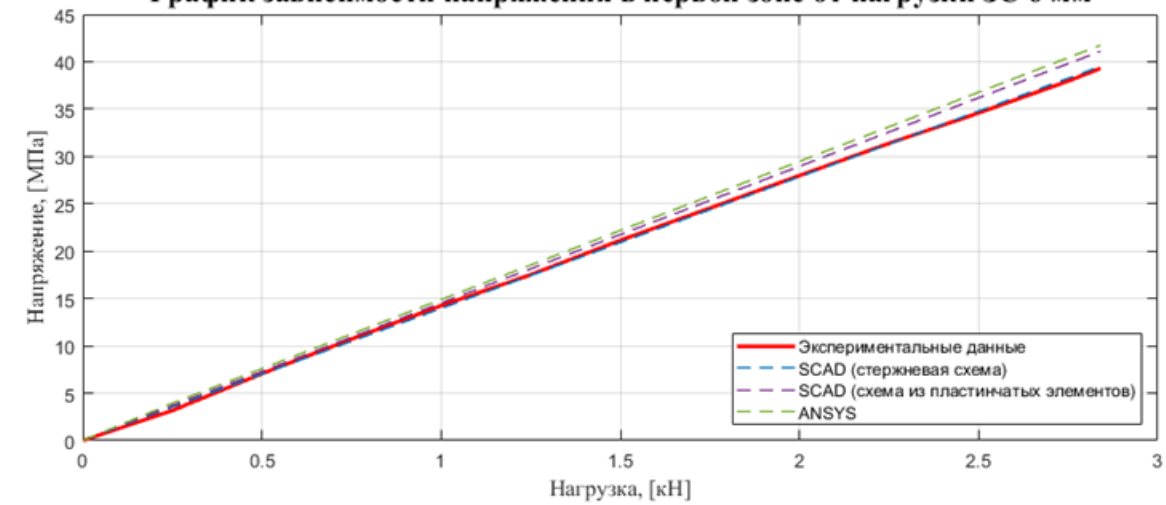


График зависимости напряжения во второй зоне от нагрузки ЗС 6 мм

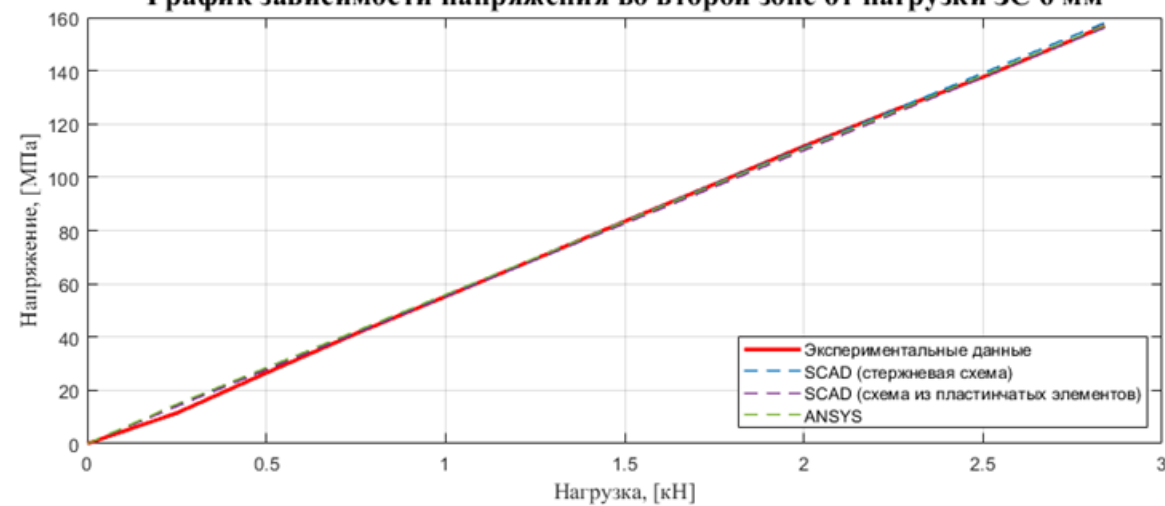
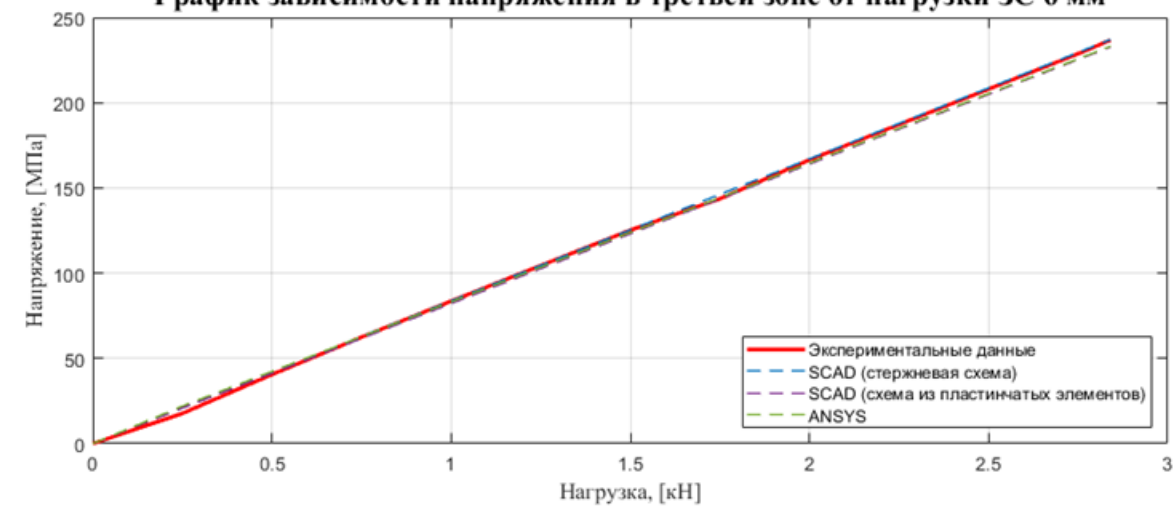


График зависимости напряжения в третьей зоне от нагрузки ЗС 6 мм



Исходя из сравнения полученных экспериментальных данных со смонтированных тензорезисторов на поверхности стекла и аналитических данных, полученных в пограмных комплексах, следует, что при толщине стекол до 12 мм, расчеты на термоупрочненное и закаленное стекло можно проводить по расчетным схемам, применяемым для флоат-стекла.

