

## VII Международный форум «Светопрозрачные конструкции, окна, фасады, двери, интерьерные решения 2025»



Исследование физико-механических свойств светопрозрачных конструкций из стекла

Авторы:

**Кудрявцев Никита Андреевич**

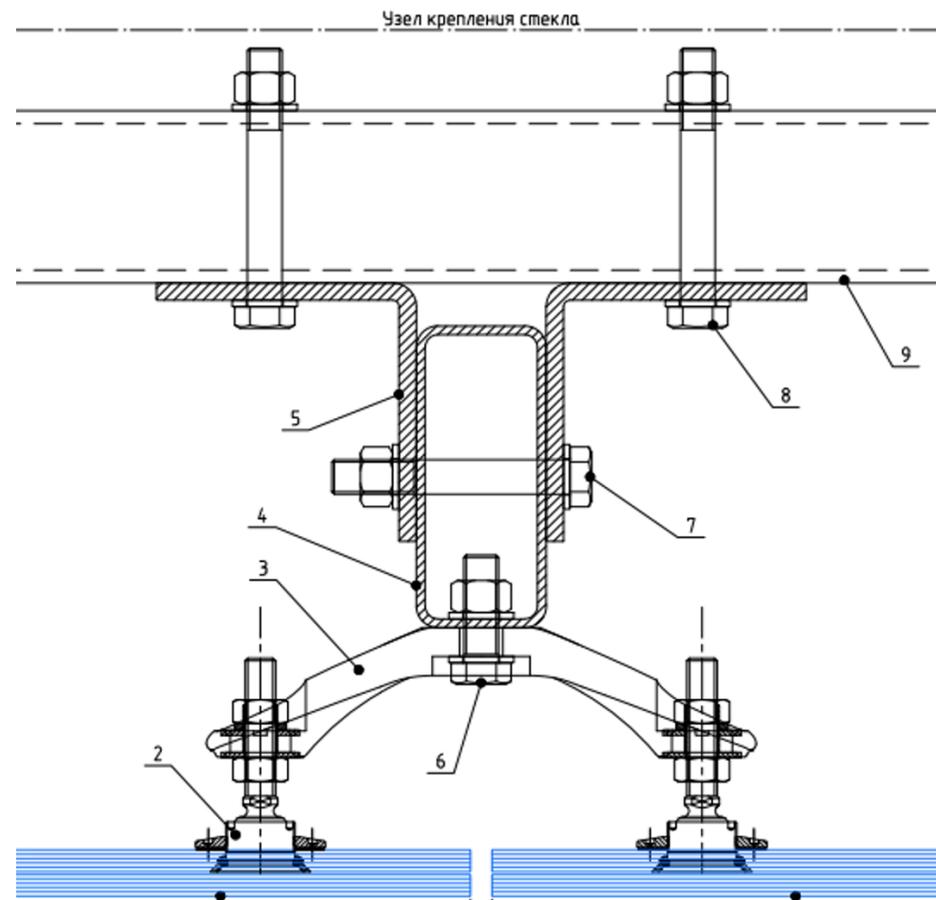
Инженер 3 категории

**Авдеев Кирилл Владимирович**

Зам. Генерального директора – Главный инженер

АО «ЦНИИПромзданий»

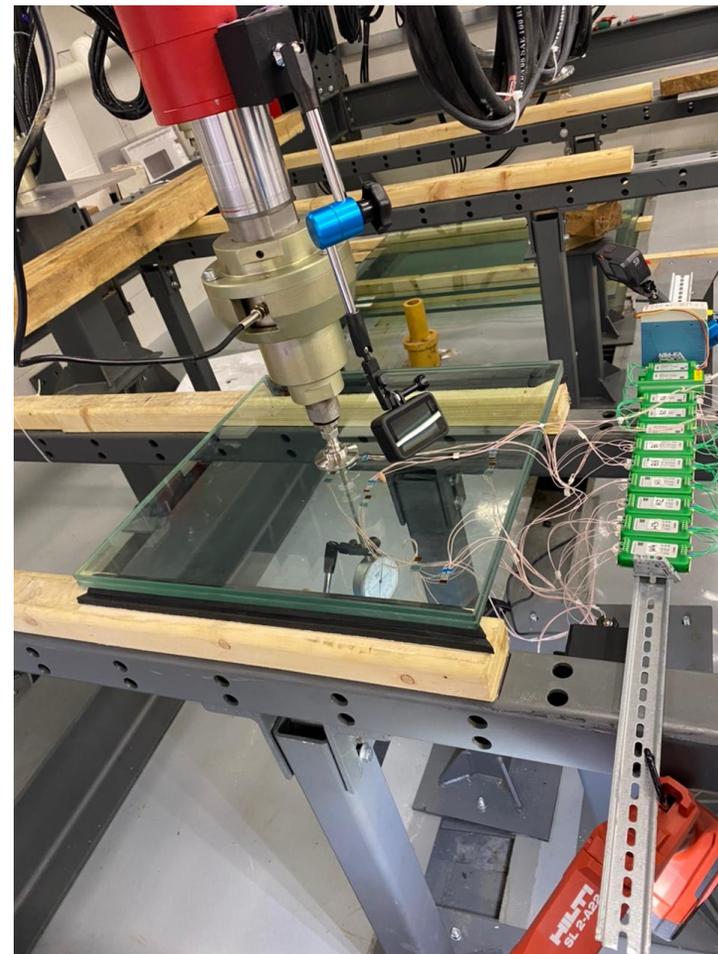
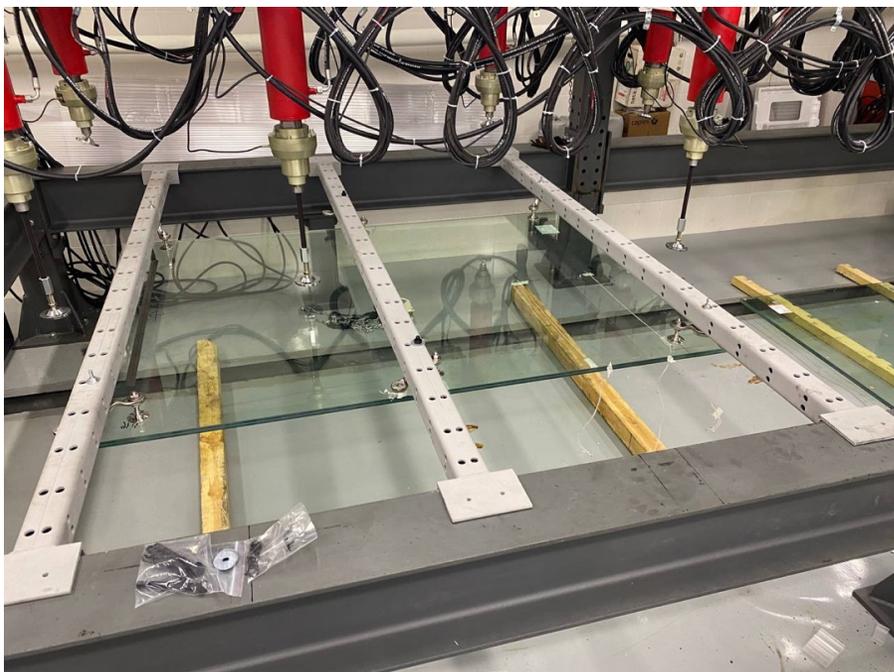
# Элемент крепления стекла «Рутель»



# Подготовленные испытательные образцы

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

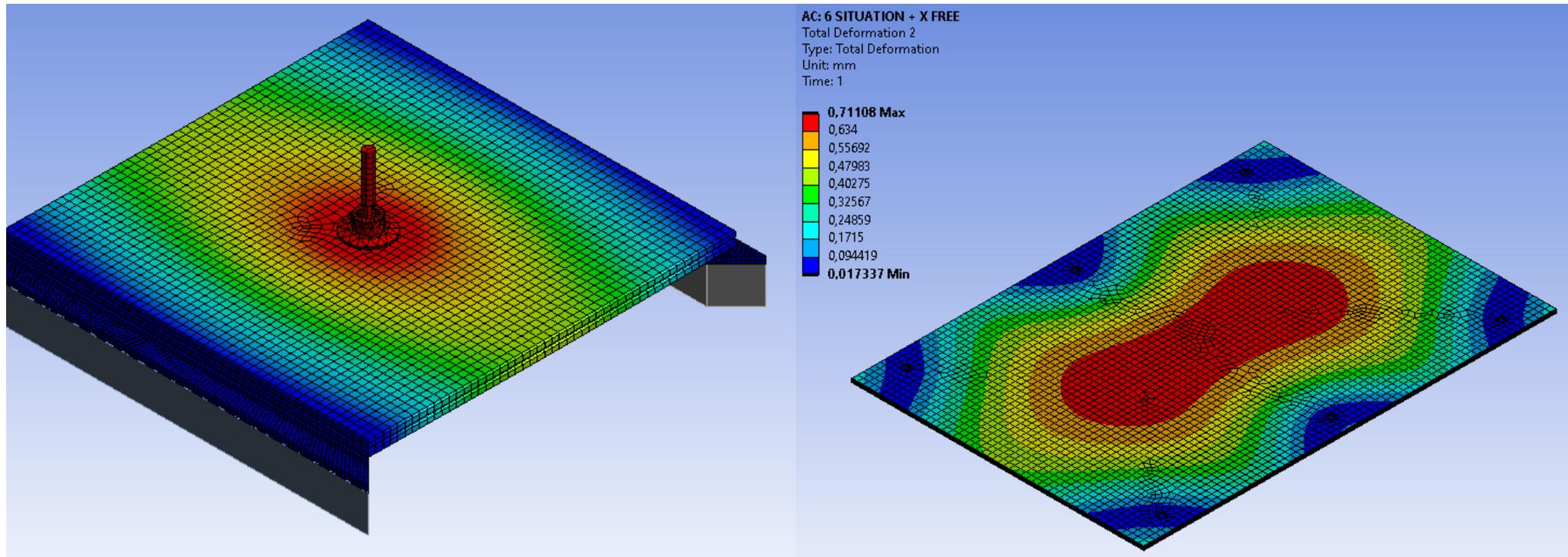
Нам были предоставлены несколько полноразмерных образцов и фрагментов изделий с креплениями «рутель».



# Математическое моделирование ИСПЫТУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

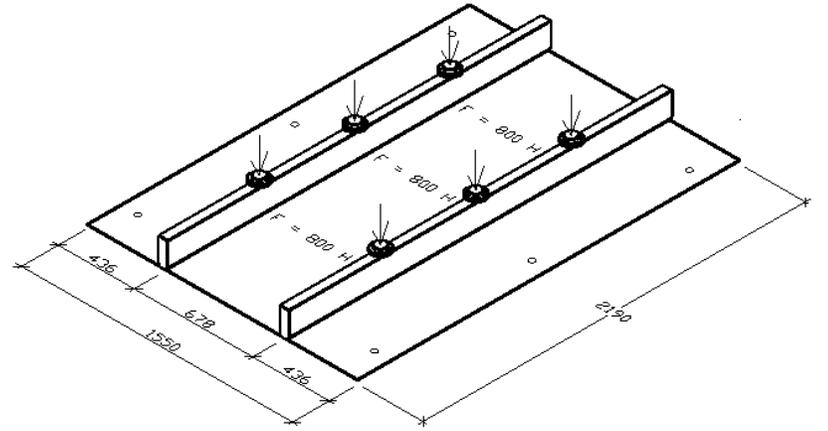
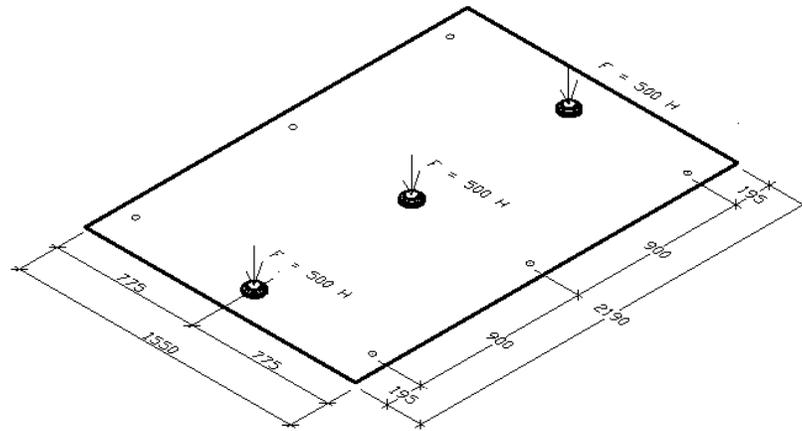
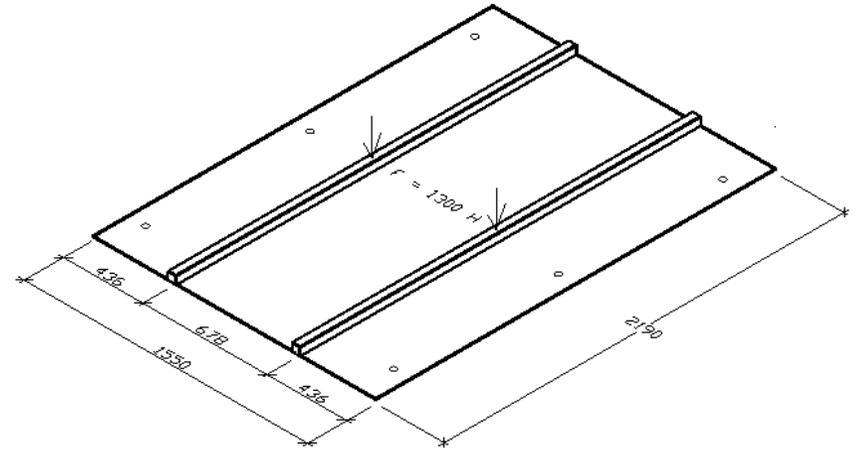
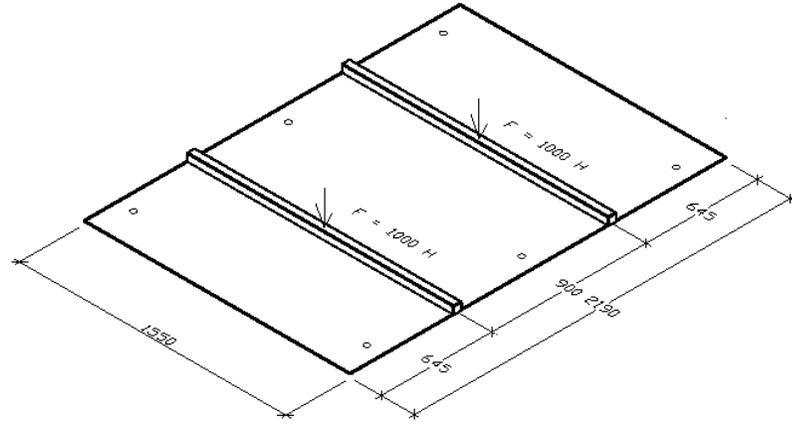
Перед испытанием необходимо было аналитическим способом проанализировать поведение конструкции, для этого мы математически моделировали испытание в различных расчетных программах, а именно в SCAD и ANSYS.

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/м<sup>2</sup>.



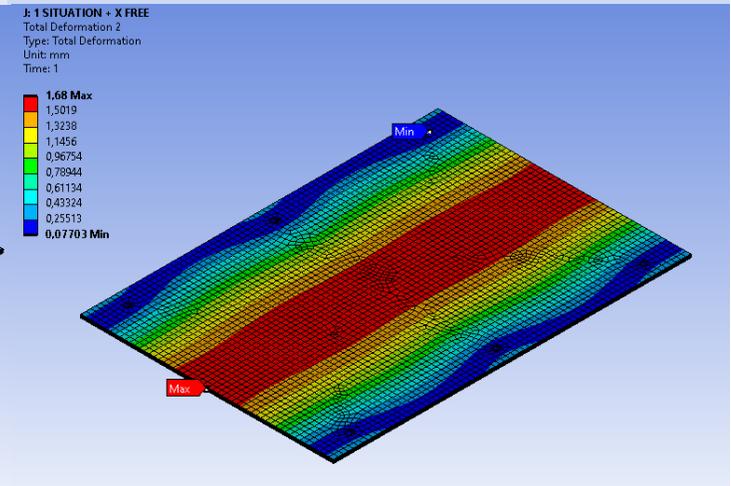
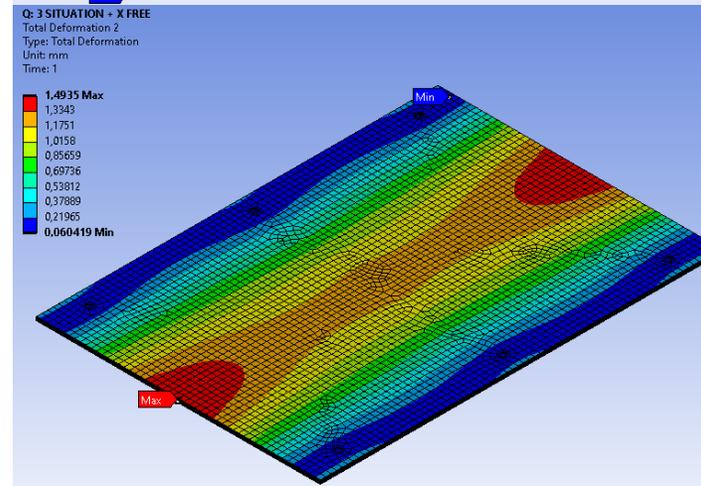
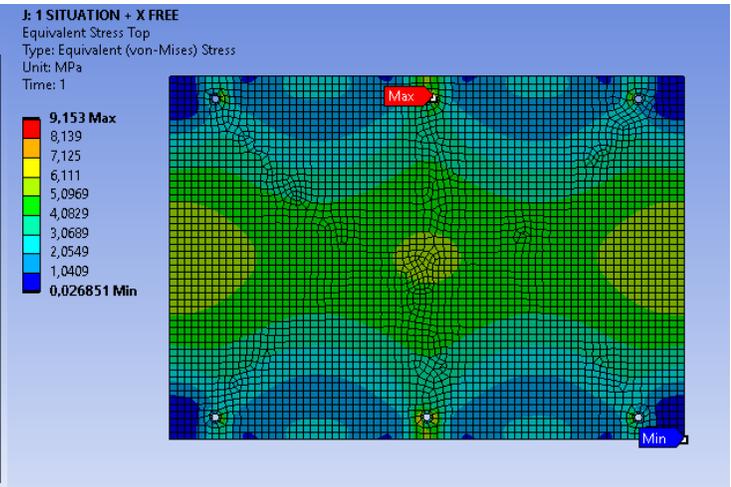
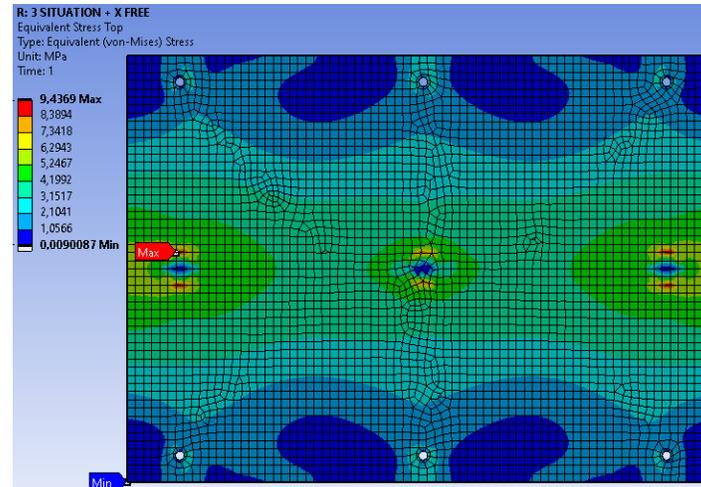
# Математическое моделирование ИСПЫТУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В результате проведенного математического моделирования методом подбора мы выбрали оптимальное расположение точечных нагрузок и их численное значение эквивалентное распределенной нагрузке, равной 120 кг/м<sup>2</sup>



# Математическое моделирование ИСПЫТУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

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



# Составление программы и проведение испытаний

По итогу проведенной аналитической работы была составлена программа испытаний, согласованная с производителем данных изделий

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

Схема установки тензорезисторов на верхнем стекле

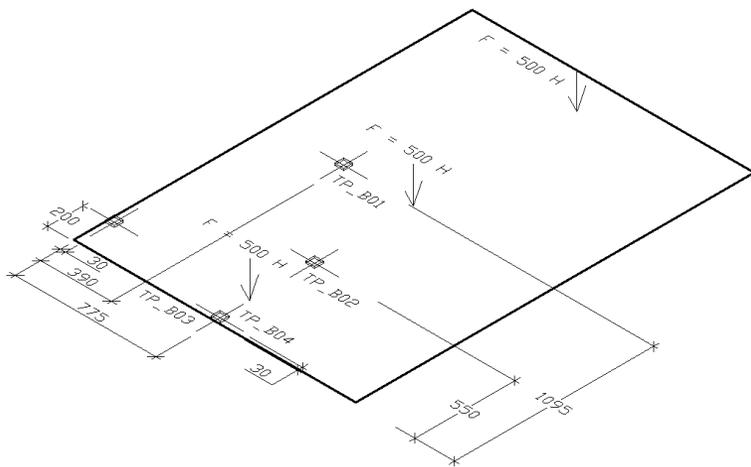
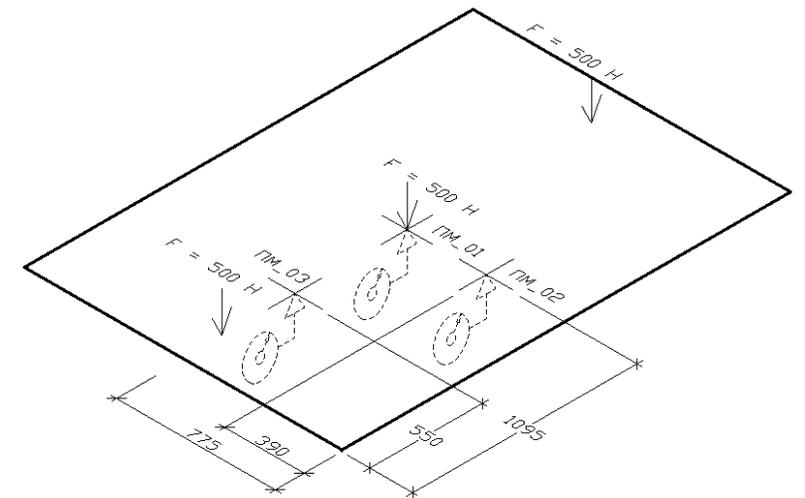
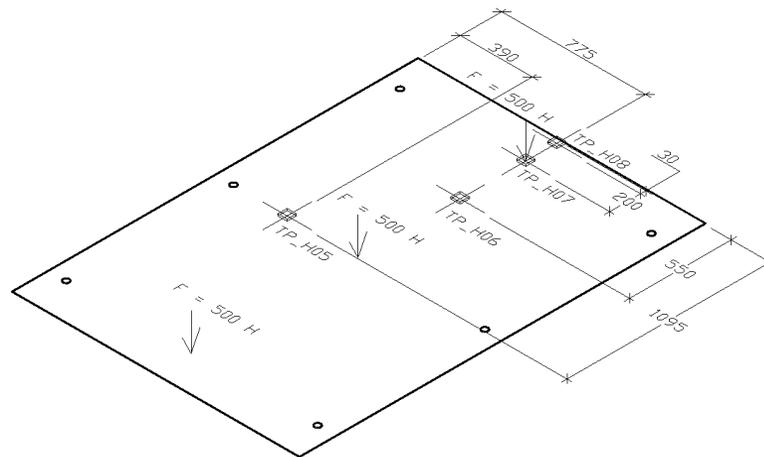


Схема установки тензорезисторов на нижнем стекле  
(установка симметрично)



# Составление программы и проведение испытаний

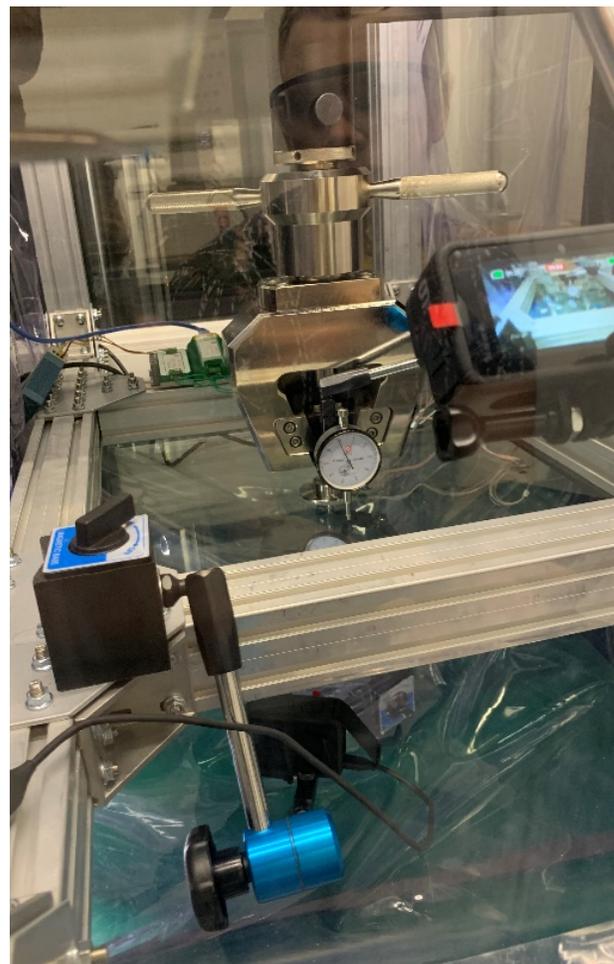
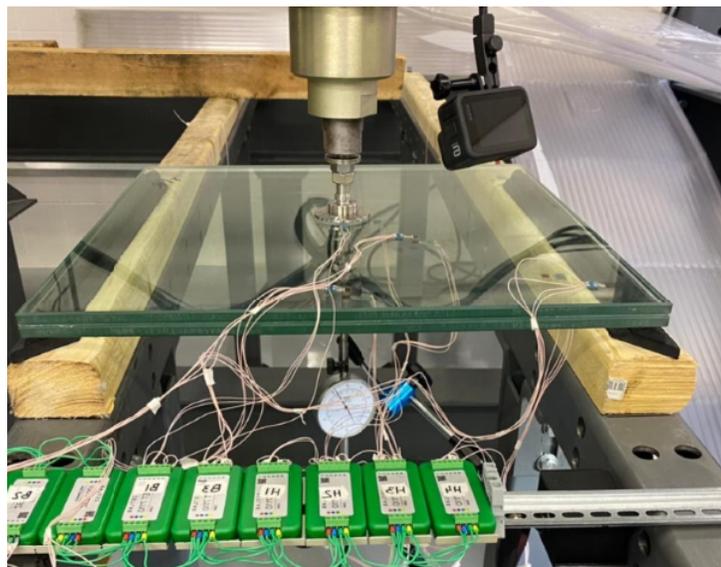
Испытание проводилось в три этапа, со снятием нагрузки после каждого этапа:

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



# Испытания рутелей

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



# Испытания рутелей

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

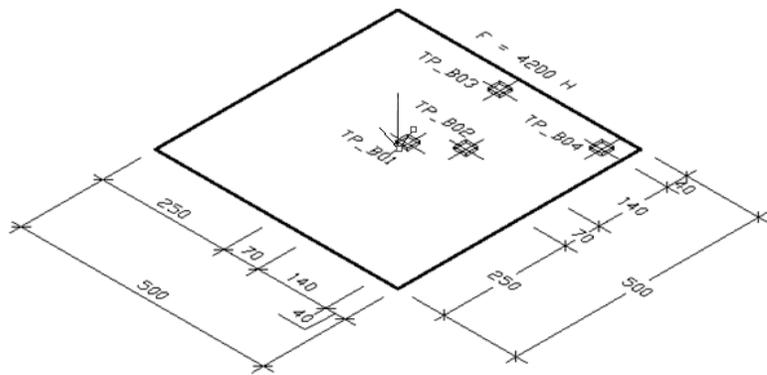
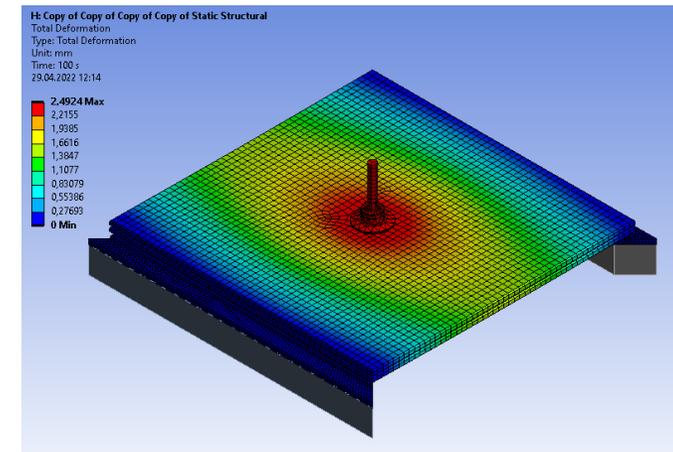
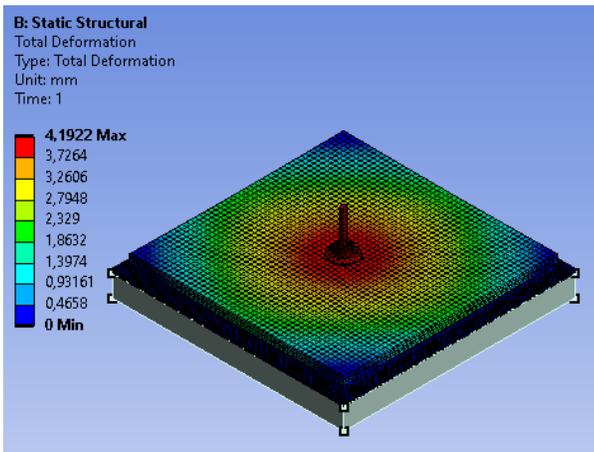
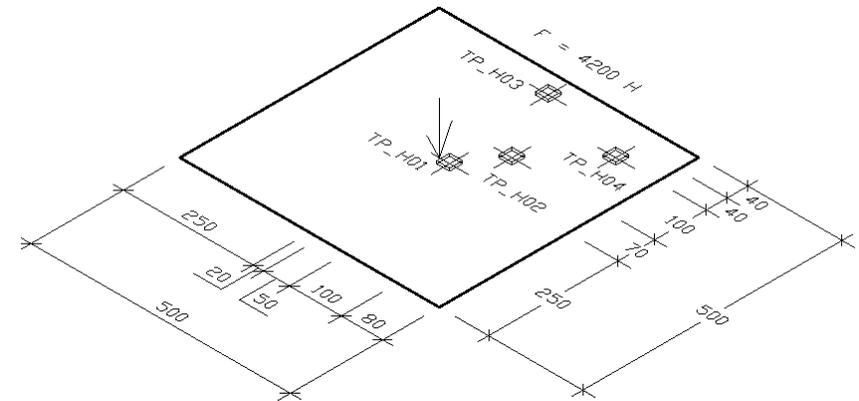


Схема установки тензорезисторов на нижнем стекле



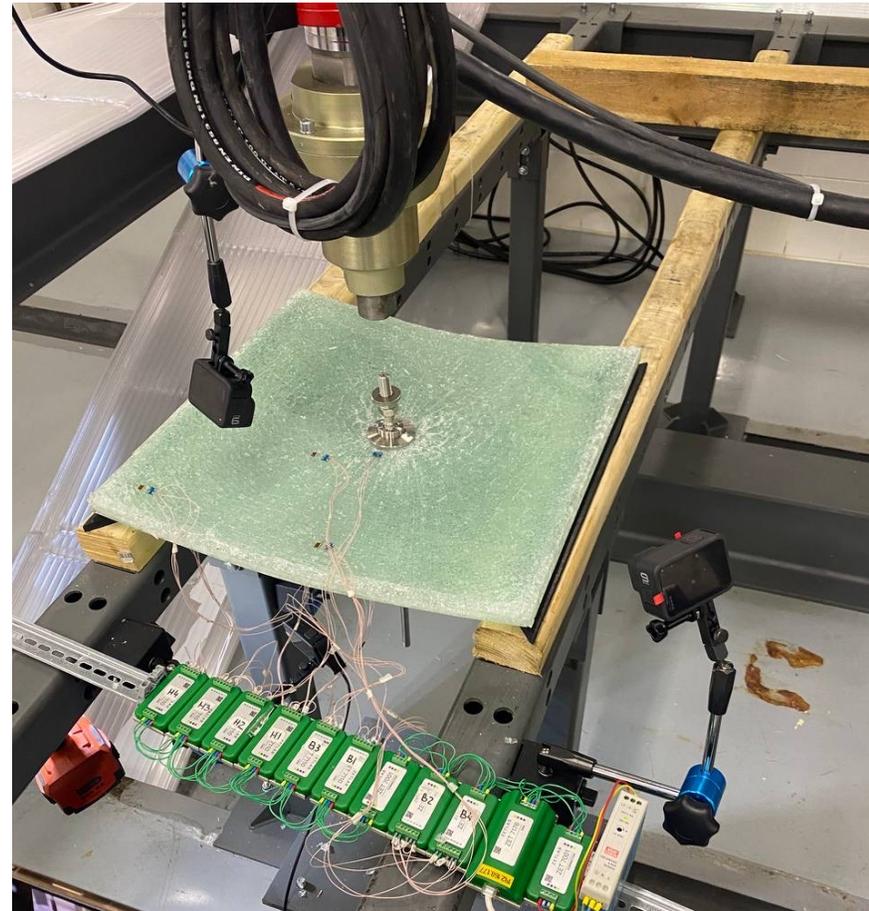
# Испытания рутелей

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 на слайде



# Серия испытаний на четырехточечную нагрузку

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 на слайде

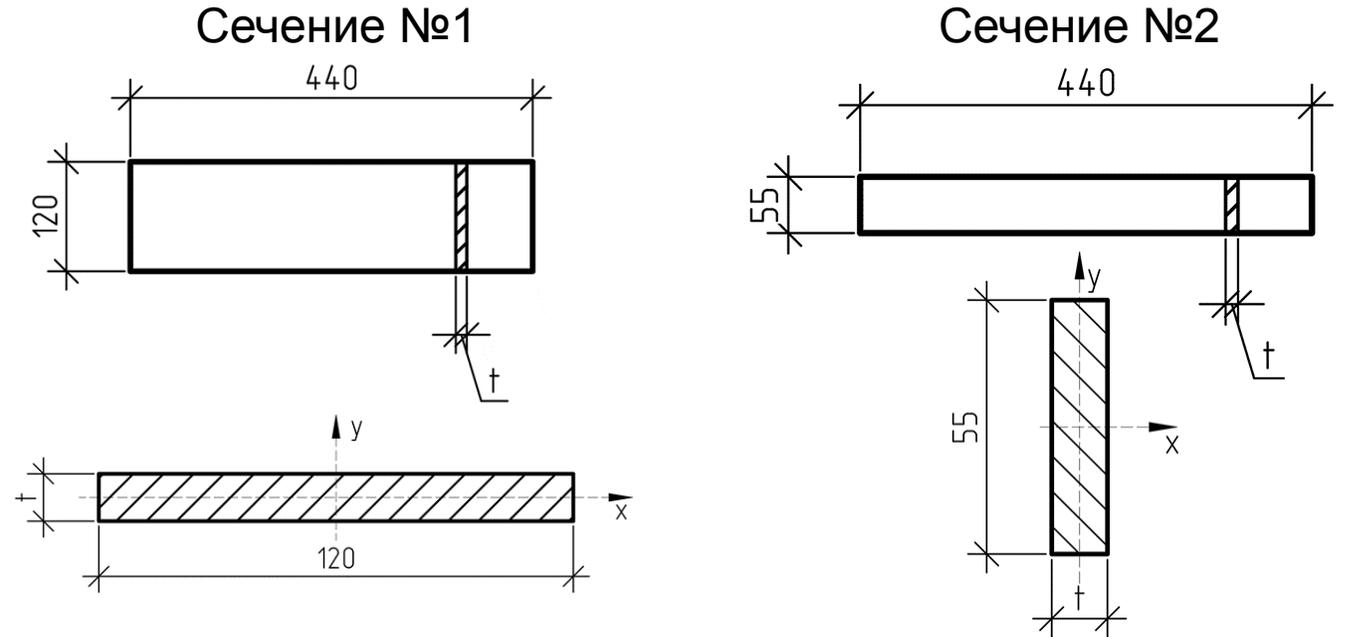
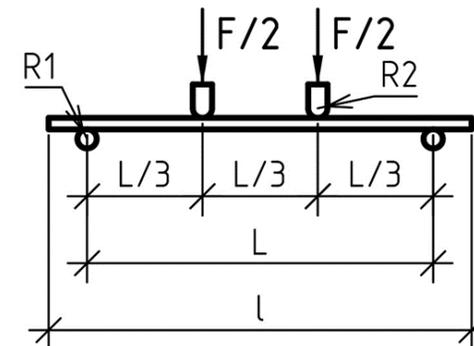
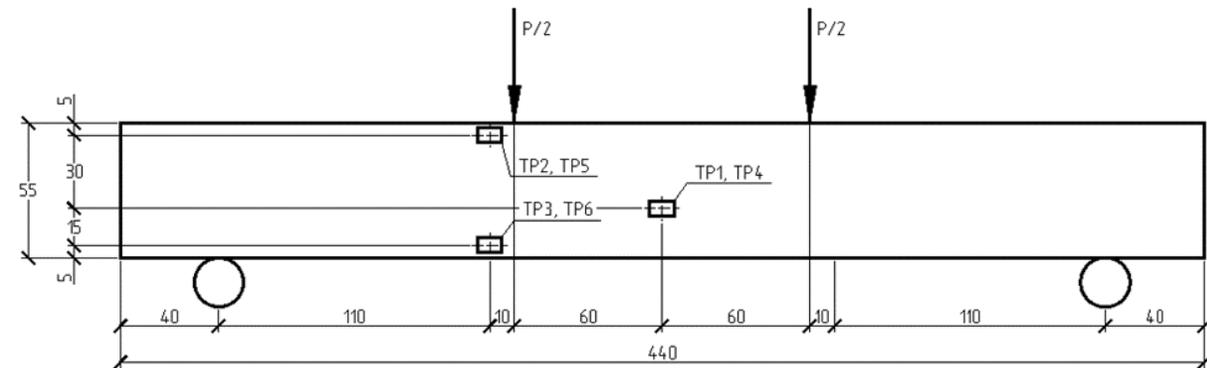
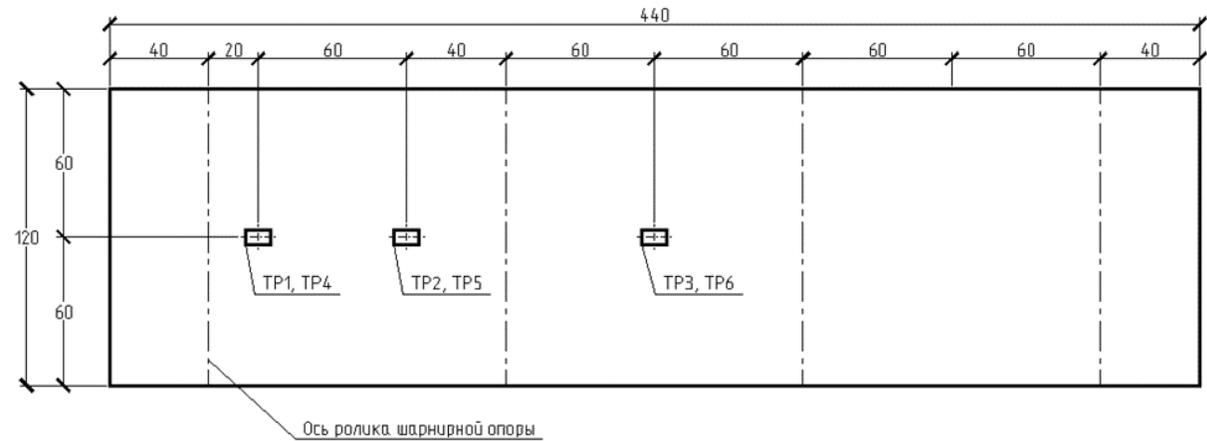
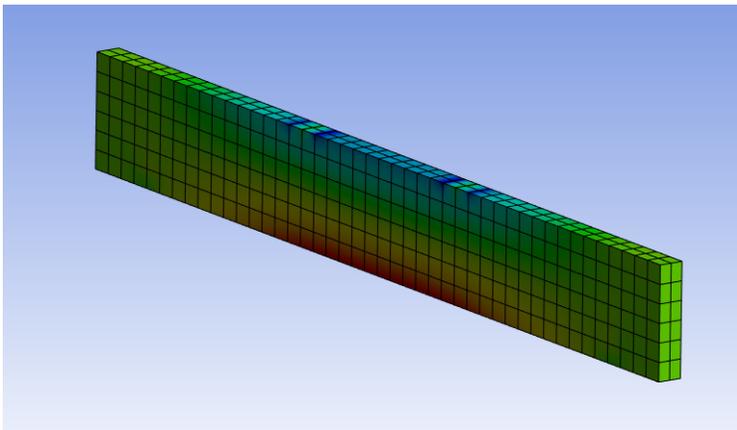
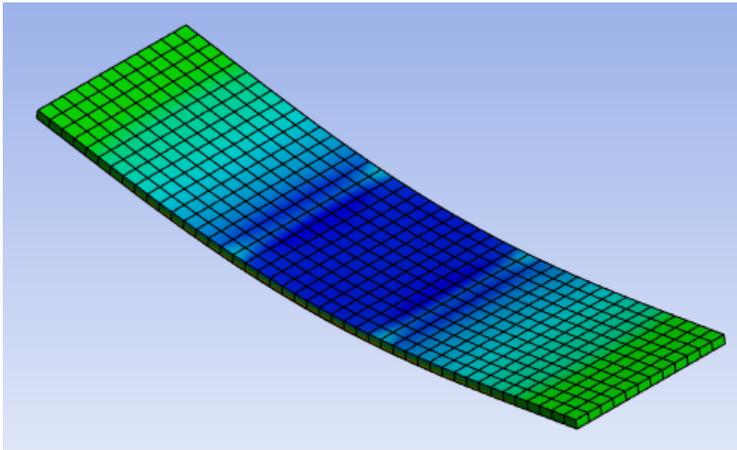


Схема проведения испытаний

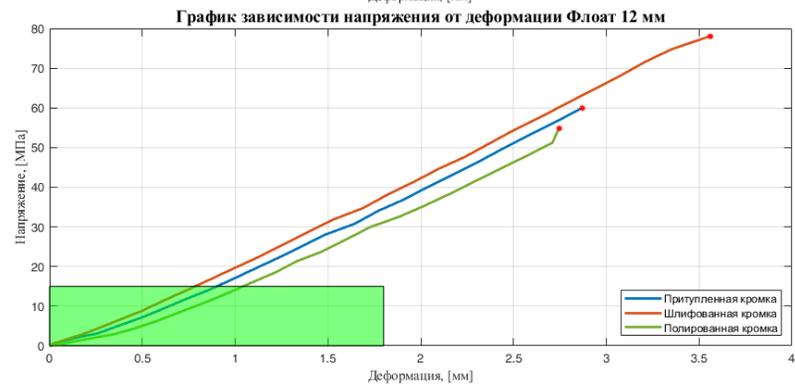
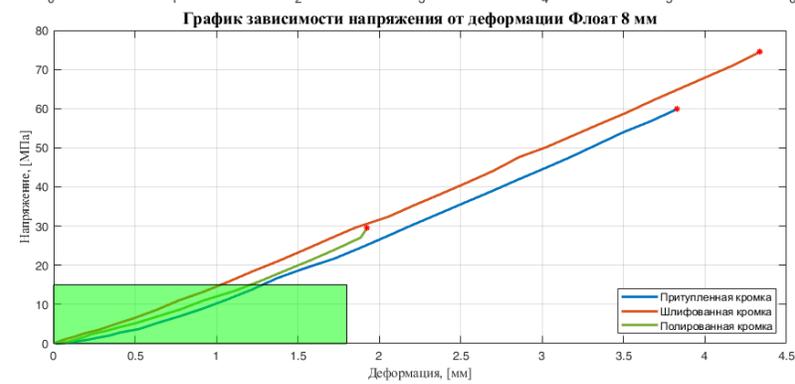
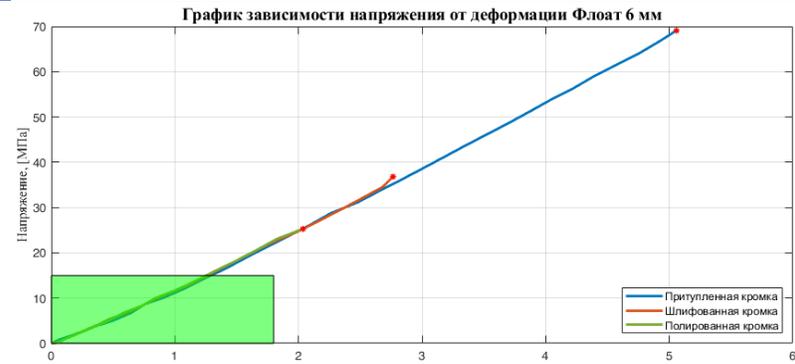


# Серия испытаний на четырехточечную нагрузку

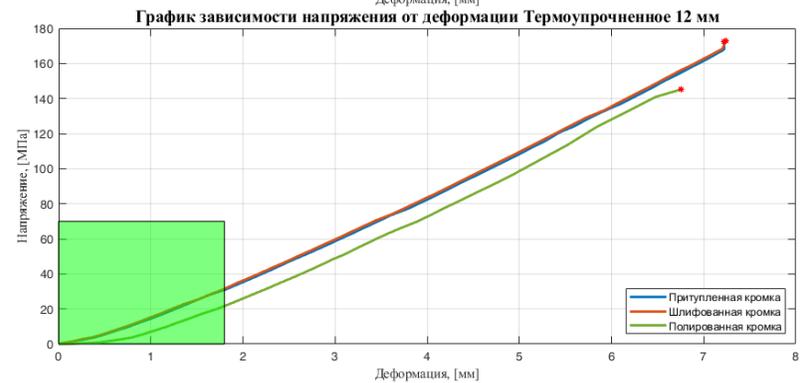
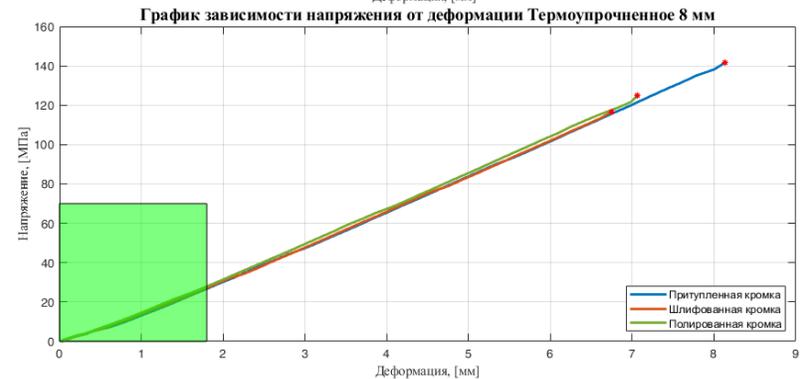
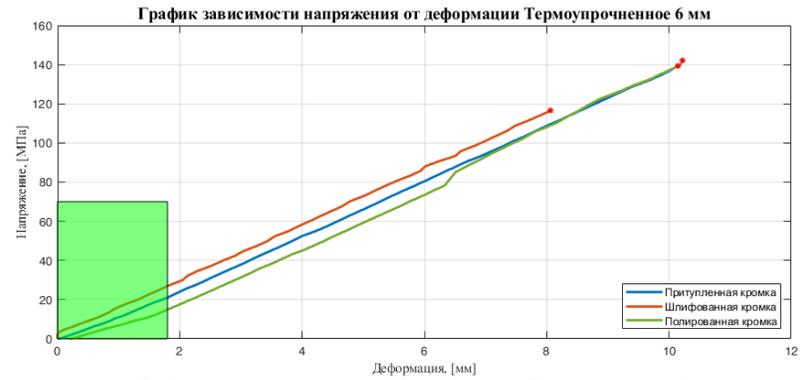
Схемы расположения тензорезисторов были выбраны по изополям напряжений исходя из результатов расчетов, выполненных в программных комплексах SCAD и ANSYS.



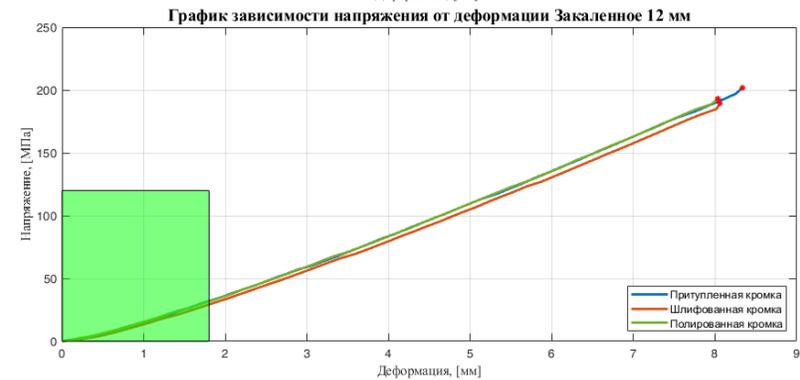
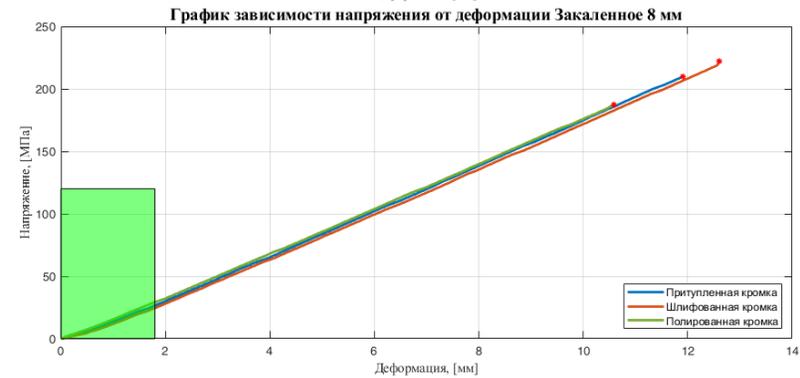
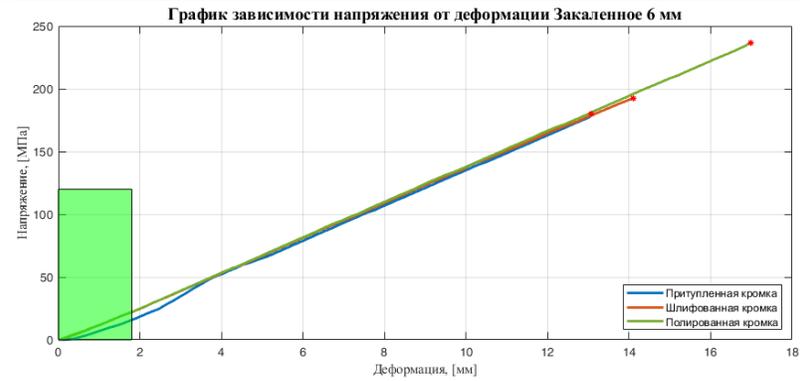
# Результаты испытаний флоат-стекла



# Результаты испытаний термоупрочненного стекла



# Результаты испытаний закаленного стекла



# Результаты испытаний

Разрушение образцов всех типов и толщин происходило вне зоны нормативных значений. Запас прочности представлен в таблице ниже:

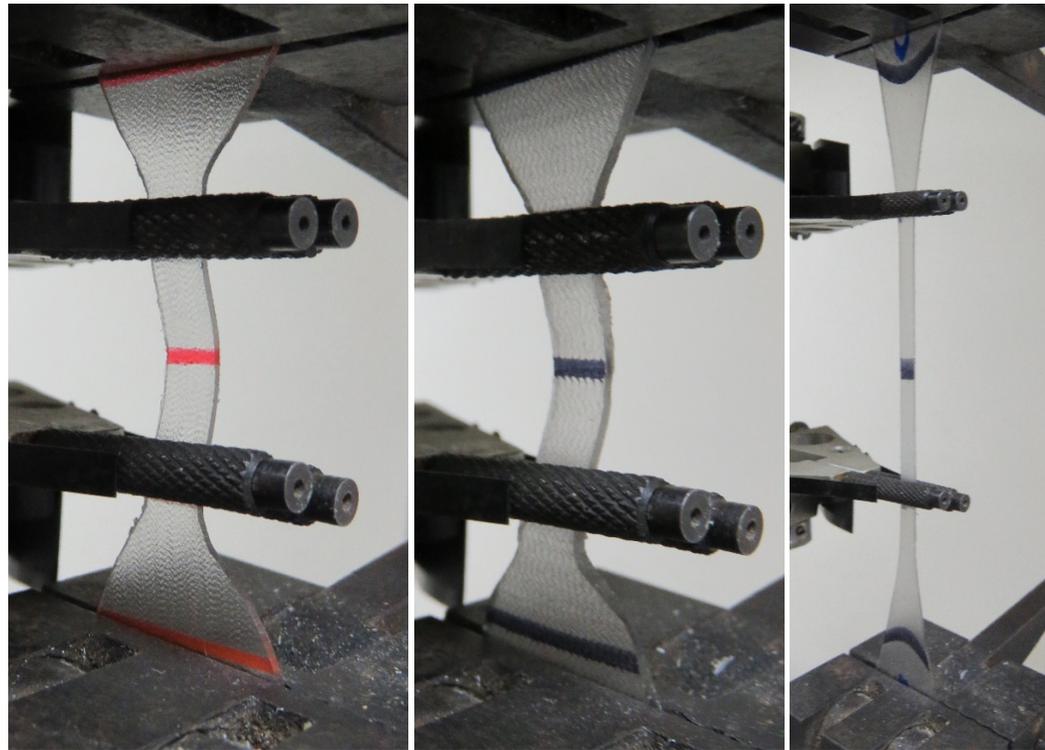
Тип стекла	Толщина, мм	Минимальное напряжение разрушения (из трех образцов), МПа	Нормативная прочность, МПа	Запас прочности, %
Флоат	6	25.305	15	69
	8	29.477		97
	12	54.917		266
ТП	6	116.429	70	66
	8	116.631		67
	12	145.233		107
ЗС	6	180.229	120	50
	8	187.296		56
	12	189.786		58

# Исследование ПВХ плёнки для производства триплекса

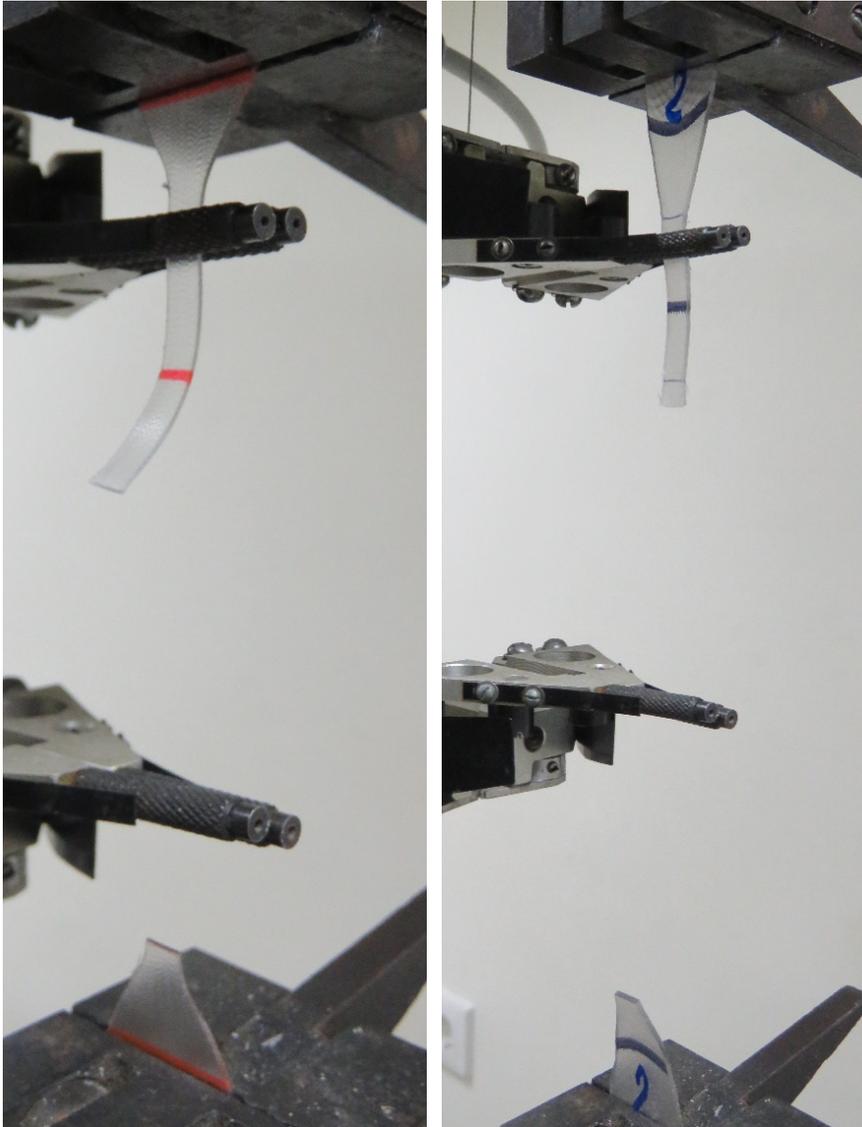
Измерение прочности производилось до воздействия ультрафиолета и после воздействия ультрафиолета.

До воздействия ультрафиолета прочность жёсткой плёнки 25 МПа, мягкой плёнки 15 МПа.

Относительное удлинение жёсткой пленки составило 140%, а мягкой плёнки 250%.



# Исследование ПВХ плёнки для производства триплекса

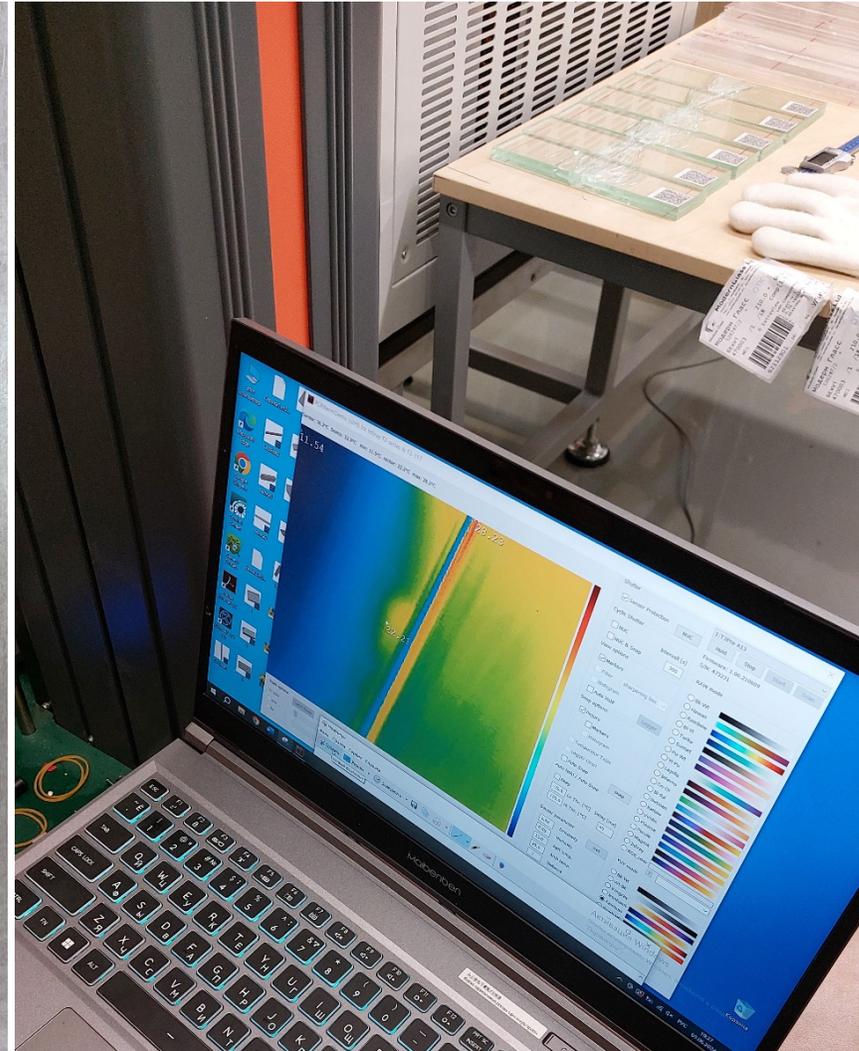
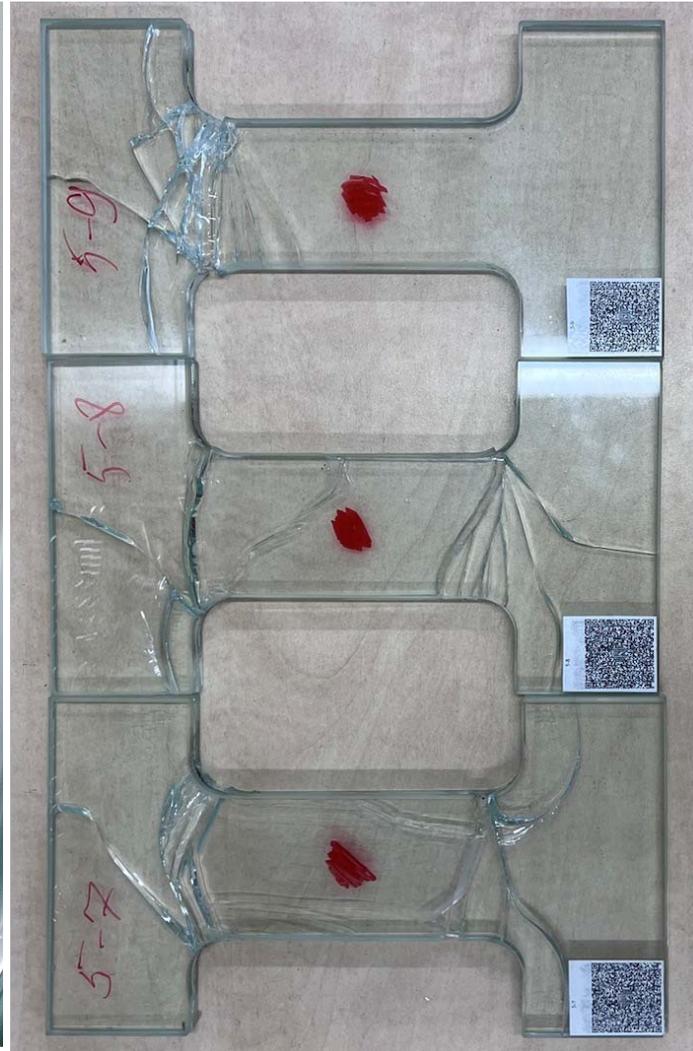
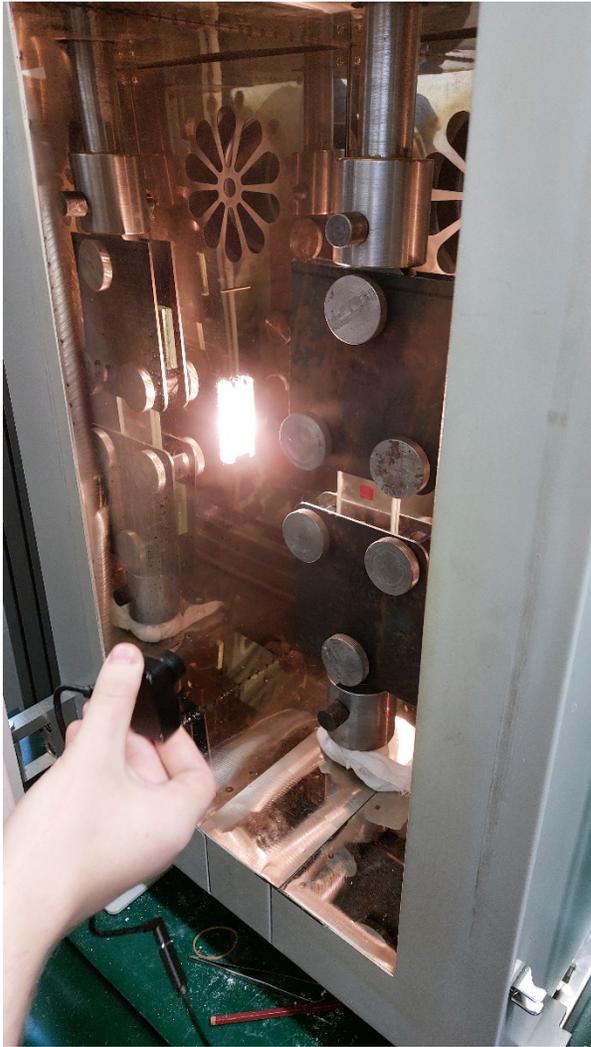


После интенсивного воздействия ультрафиолетового облучения прочность жёсткой плёнки составили 15 МПа (снижение на 40%), прочность мягкой пленки составили 11 МПа (снижение на 27%).

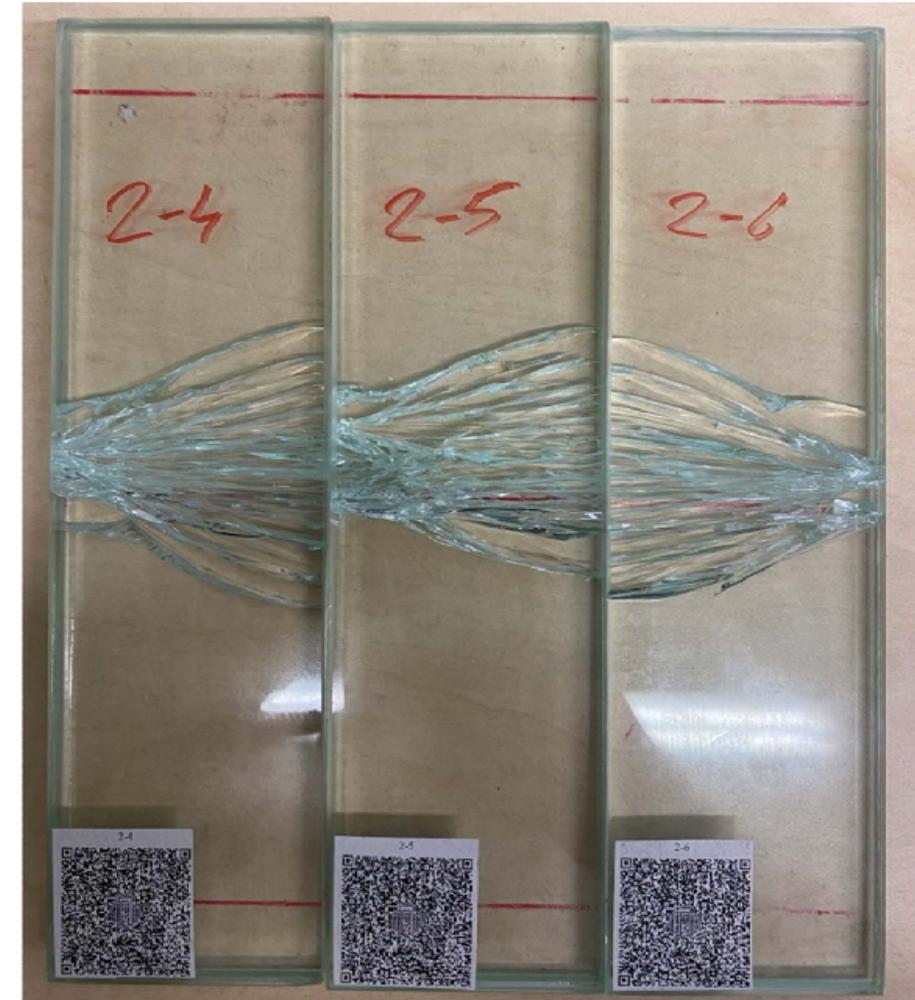
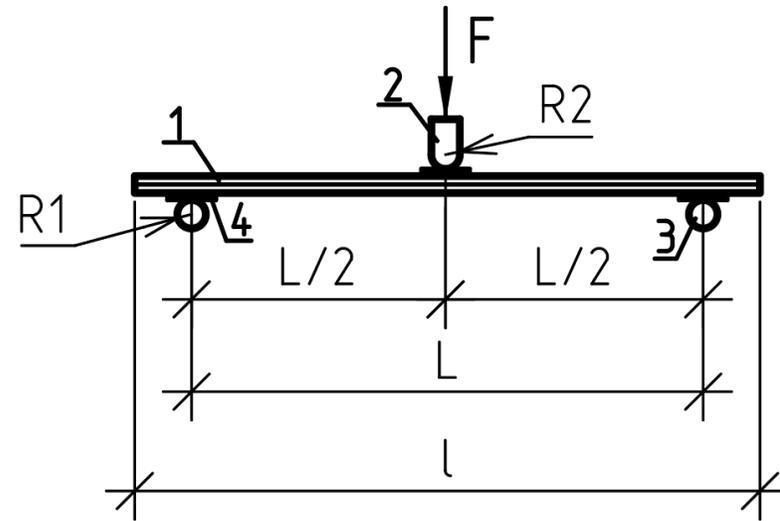
Относительное удлинение жёсткой пленки составило 120%, а мягкой плёнки 210%.

Ограничение применения жёсткой плёнки по относительному удлинению, мягкой плёнки по прочности.

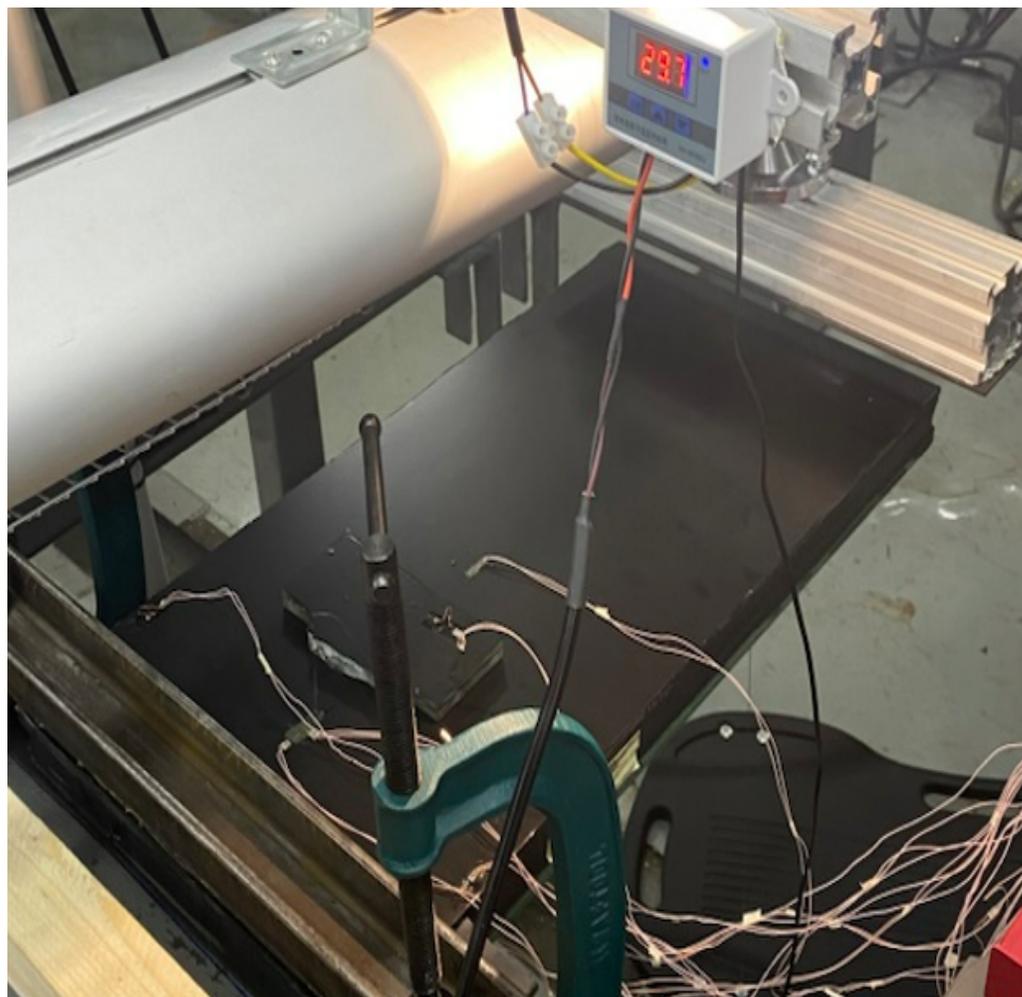
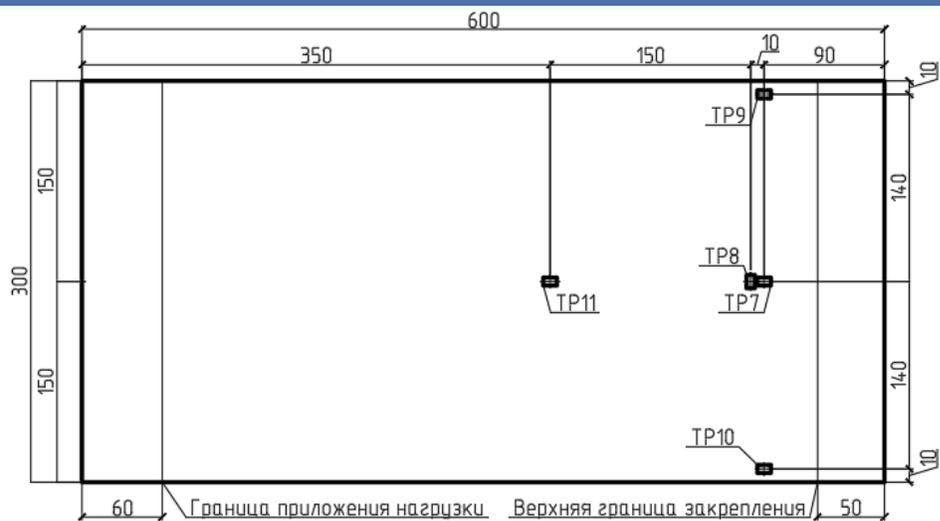
# Определение влияния температуры на прочность при растяжении образца из триплекса



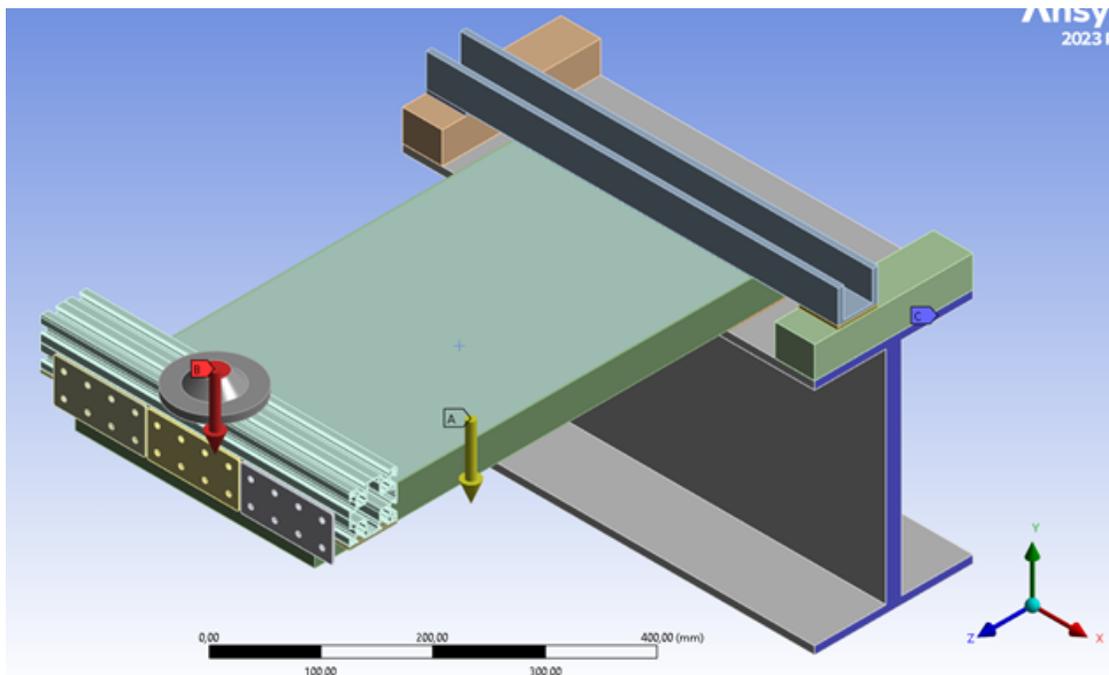
# Определение влияния температуры на прочность при изгибе образца из триплекса



# Влияние температуры на прочность стеклопакета



# Расчёт прочности стеклопакета



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

В качестве исходных данных для прочностного испытания была принята распределенная нагрузка по краю стеклопакета с равнодействующей равной 2000 Н. Шаг приложения нагрузки для испытаний принят 200 Н.

По результатам первых испытаний шаг был откорректирован до 100 Н, так как фактическая разрушающая равнодействующая от домкрата сила оказалась 1200 Н.