

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»
Кафедра теоретической и прикладной механики

ВЫПУСКНАЯ-КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
«Решение задач теории упругости прозрачных тел
методом полос»

Выполнил: студент гр. 4-33

Хватов А.С.

Руководитель: к.т.н., доцент

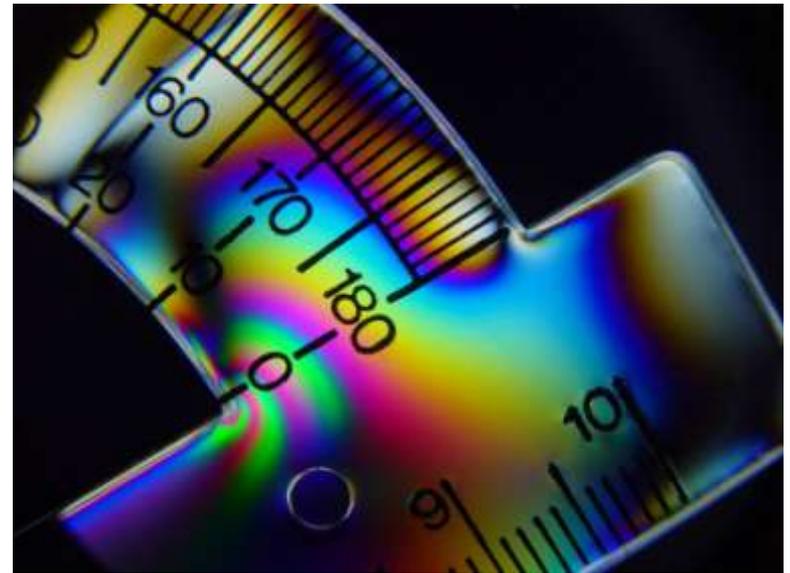
Шилов М.А.

Иваново 2022

Актуальность работы

Метод полос является широко распространенным экспериментальным методом решения задач механики деформируемого твердого тела.

Он позволяет определять распределение напряжений (деформаций) на прозрачных моделях в исследуемой области без использования аппарата математической теории упругости.



Метод фотоупругости

Преимущества

Обеспечивает надежные значения разности между основными нормальными напряжениями в плоскости модели в полном поле для плоских задач

Адаптирован к статическим и динамическим задачам

Прост в использовании

Не материалозатратный

Возможность однозначного определения значения, не исчезающего главного нормального напряжения по периметру (периметрам) модели, где напряжения обычно являются наибольшими

Позволяет определить полные значения основных направлений напряжений

Недостатки

Требует изготовления модели фактической детали (если не используются фотоупругие покрытия)

Может потребоваться дорогостоящее оборудование для точного анализа крупных компонентов

Времязатратно при работе с трехмерными объектами

Требует довольно трудоемких вычислений для разделения значений главных напряжений в общей внутренней точке

Введение

Цель: исследовать напряжения в оптически прозрачных образцах методом полос.

Задачи:

1. С применением аддитивных технологий, в частности 3D-печати, разработать экспериментальный стенд.
2. Определить физико-механические характеристики материала пластины.
3. Экспериментально определить напряженное состояние в пластине при четырехточечном изгибе методом фотоупругости (методом полос).
4. Определить напряженное состояние пластины при четырехточечном изгибе методом конечных элементов.
5. Провести сравнительный анализ результатов эксперимента и теоретических расчетов.

Введение

Структура выпускной-квалификационной работы

Глава 1.
Литературный обзор



Глава 2.
Экспериментальная установка и
определение физико-механических свойств
материала



Глава 3.
Расчет четырехточечного изгиба методом
фотоупругости, сравнение с
аналитическим и численным решениями



Заключение

Переносная экспериментальная установка

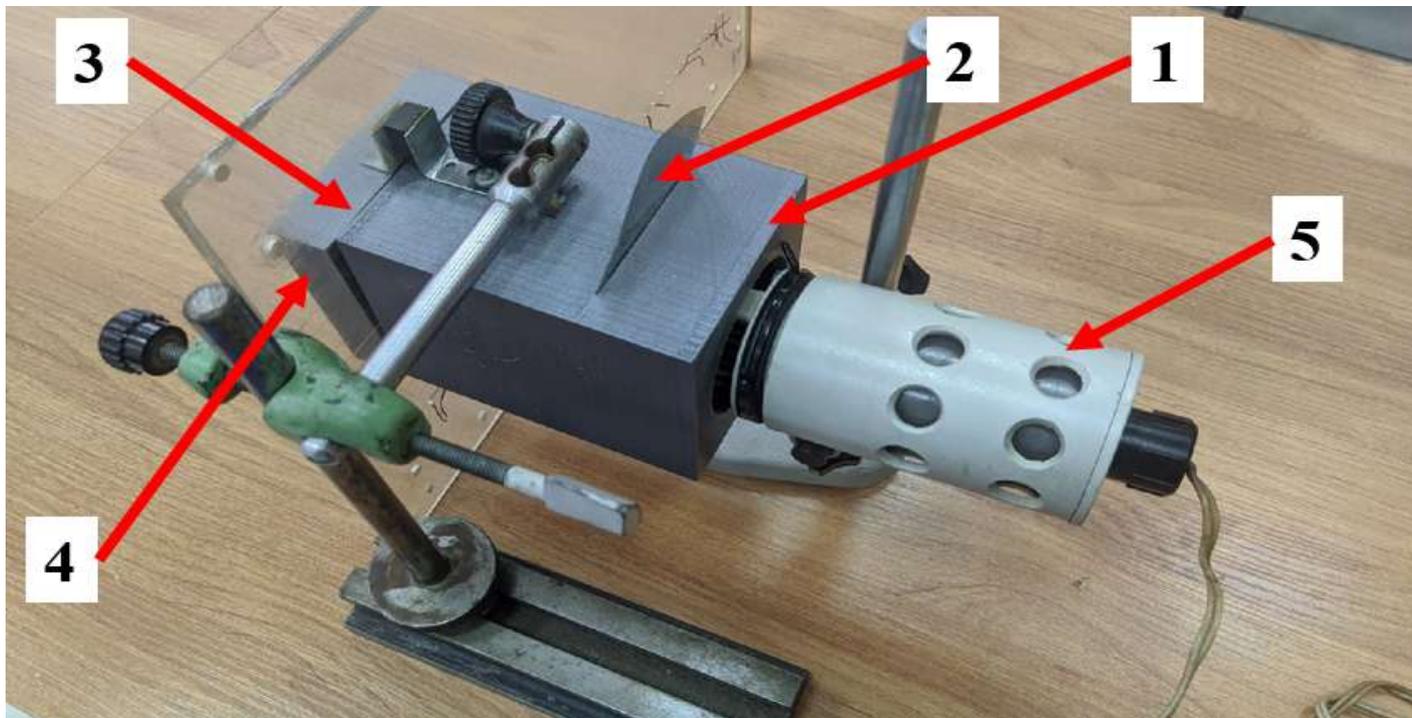


Рис. 2. Структурные элементы экспериментальной установки(в собранном виде)

Экспериментальная установка: 1 – каркас для крепления источника монохроматического света и поляризатора, 2 – поляризатор, 3 – каркас для крепления анализатора, 4 – анализатор, 5 – источник монохроматического света

Переносная экспериментальная установка



Рис. 3. Процесс печати каркаса для крепления поляризатора

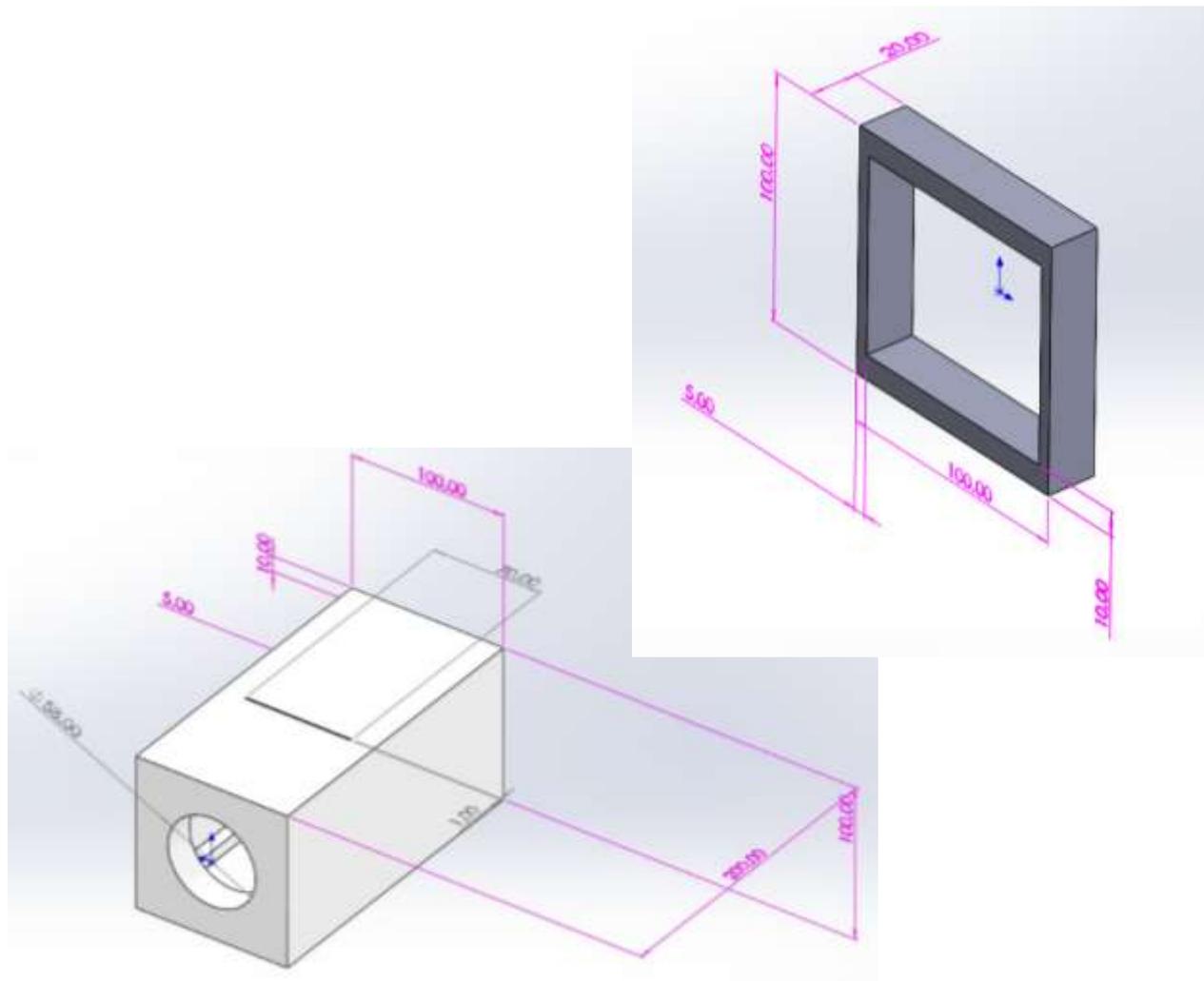


Рис. 4. Геометрия корпуса экспериментальной установки

Четырехточечный изгиб оптически прозрачной балки

$$|\sigma_x| = \sigma_1 - \sigma_2 = \frac{nf_\sigma}{h} = \frac{9 \cdot 11,32}{3} = 33,96 \text{ МПа}$$

Результат расчета методом полос



Рис. 4. Испытуемые образцы

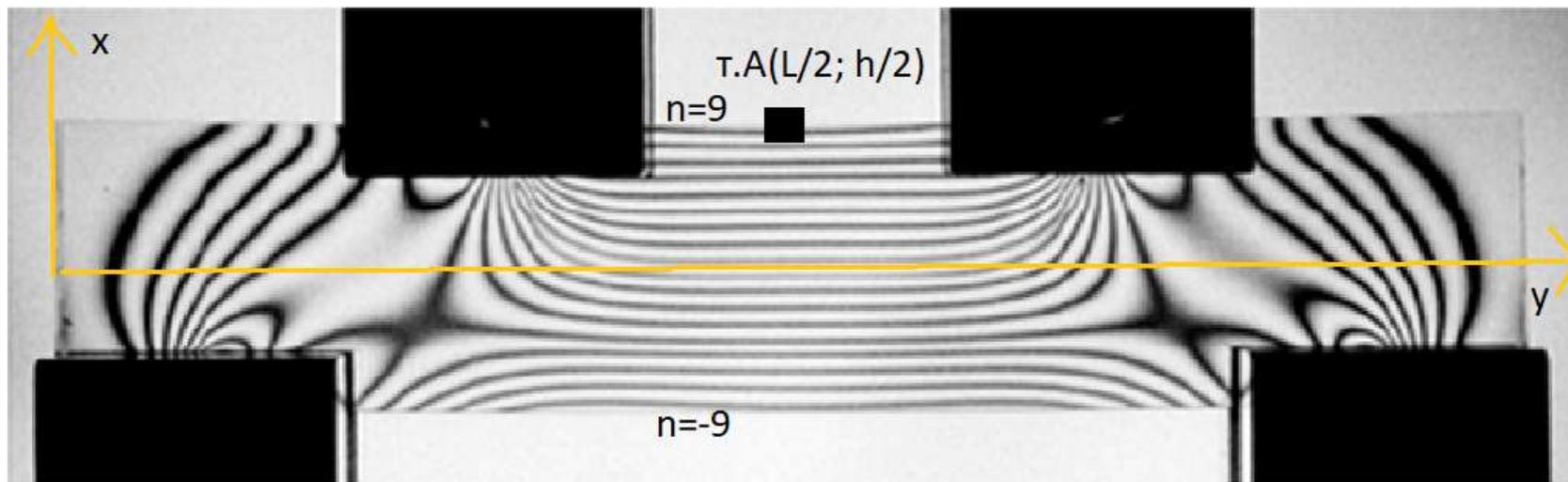
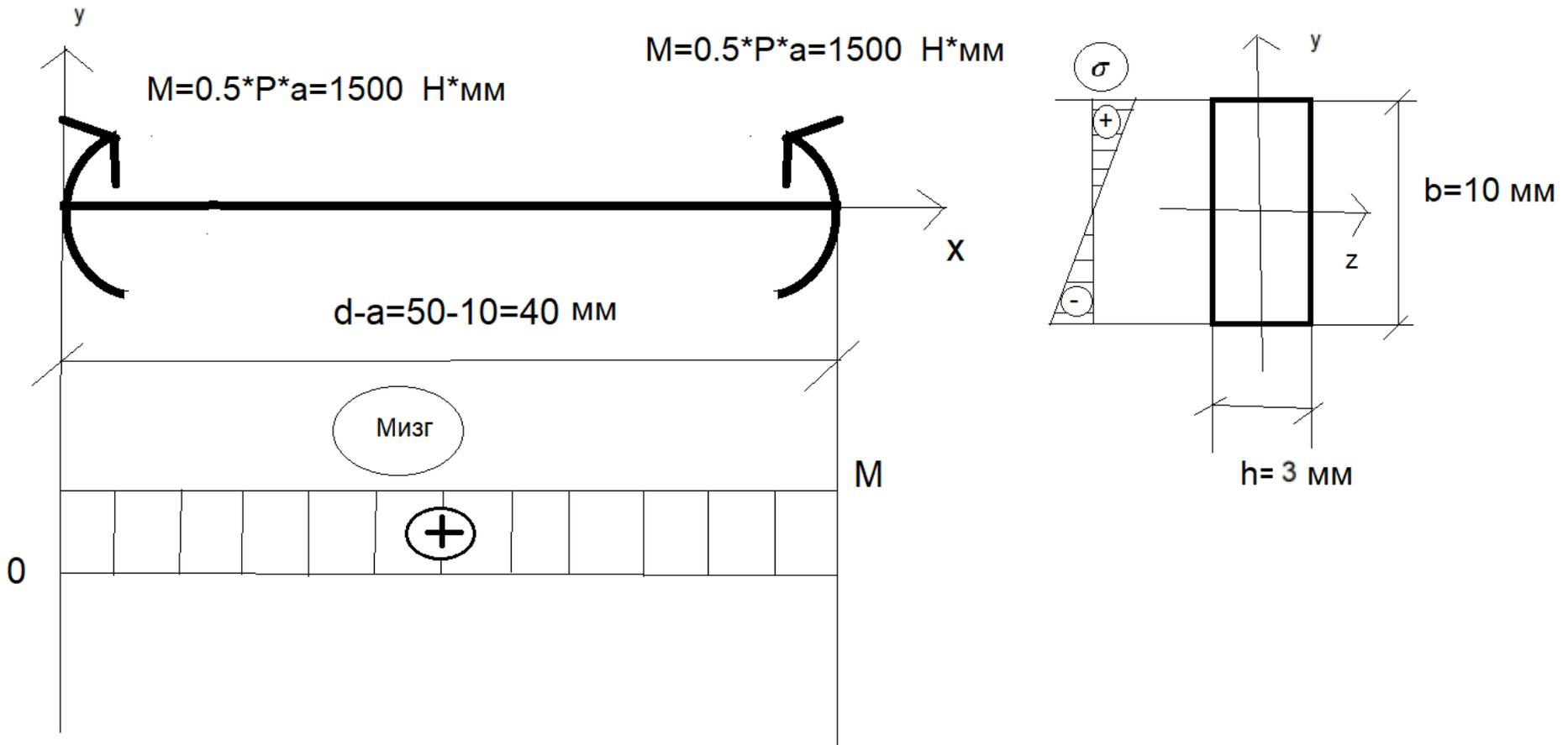


Рис. 5. Результат испытаний

Аналитический расчет



$$\sigma_{max} = \frac{M_{изг.макс} * y}{I_z} = 30 \text{ МПа}$$

$$I_z = \frac{h * b^3}{12} = 250 \text{ мм}^4$$

Численный расчет напряженного состояния

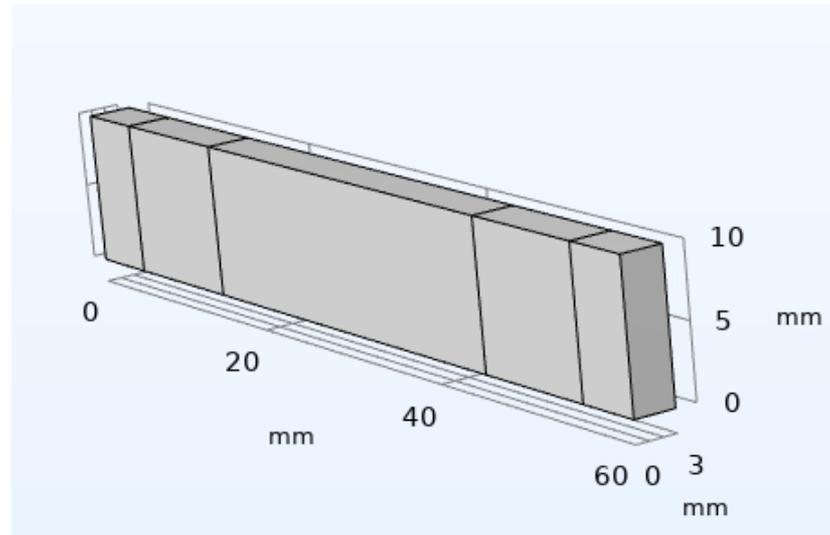


Рис. 6. Геометрическая модель

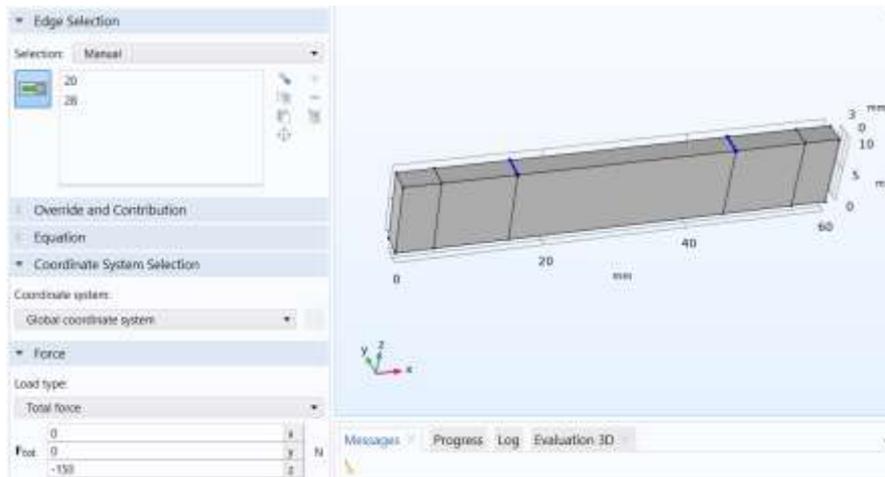


Рис. 7. Силовые граничные условия

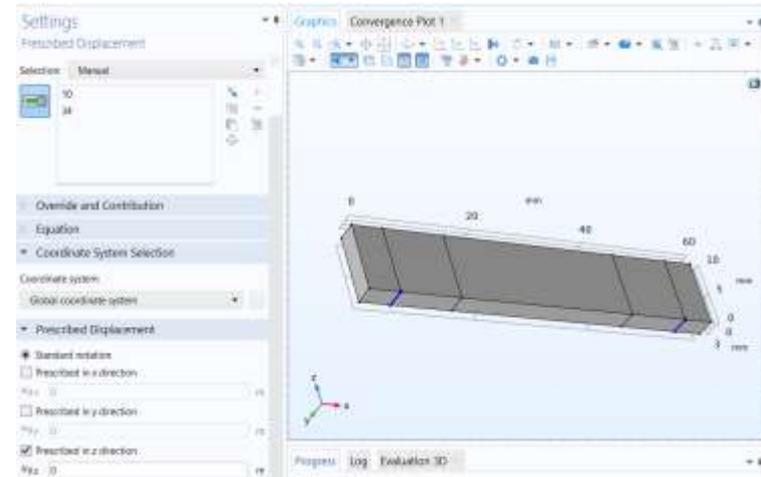
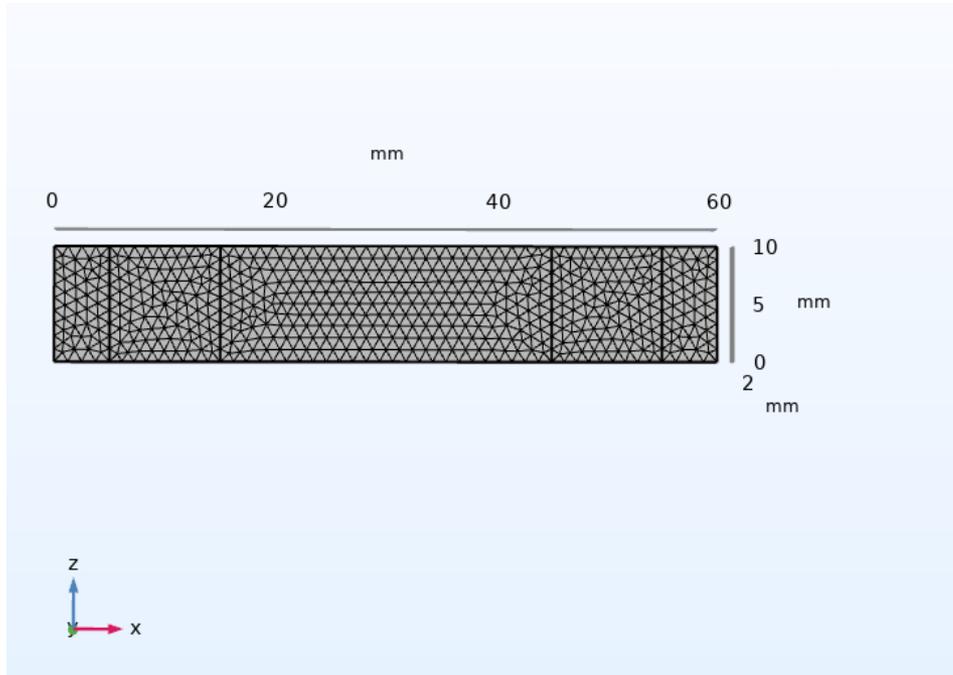


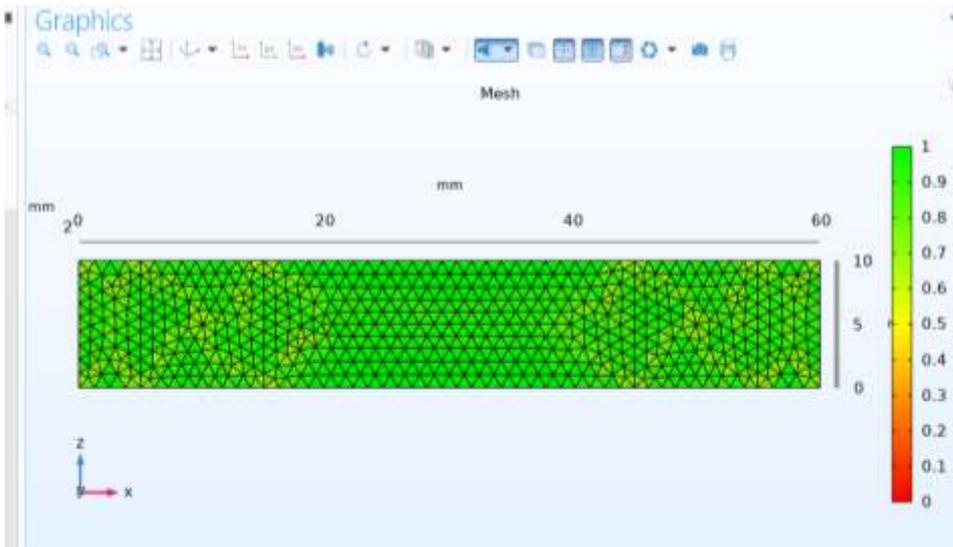
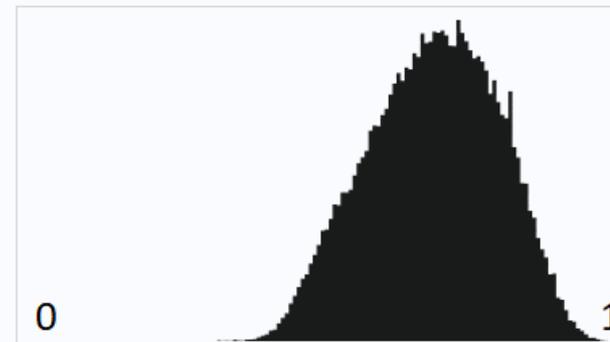
Рис. 8. Кинематические ГУ

Построение сетки и оценка качества КЭ-элементов



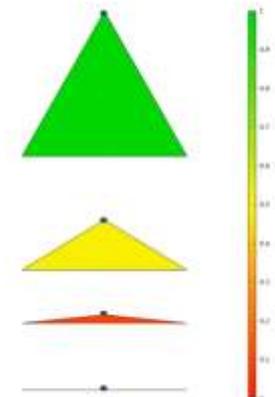
Tetrahedra: 78095
Triangles: 8220
Edge elements: 552
Vertex elements: 24

Element Quality Histogram

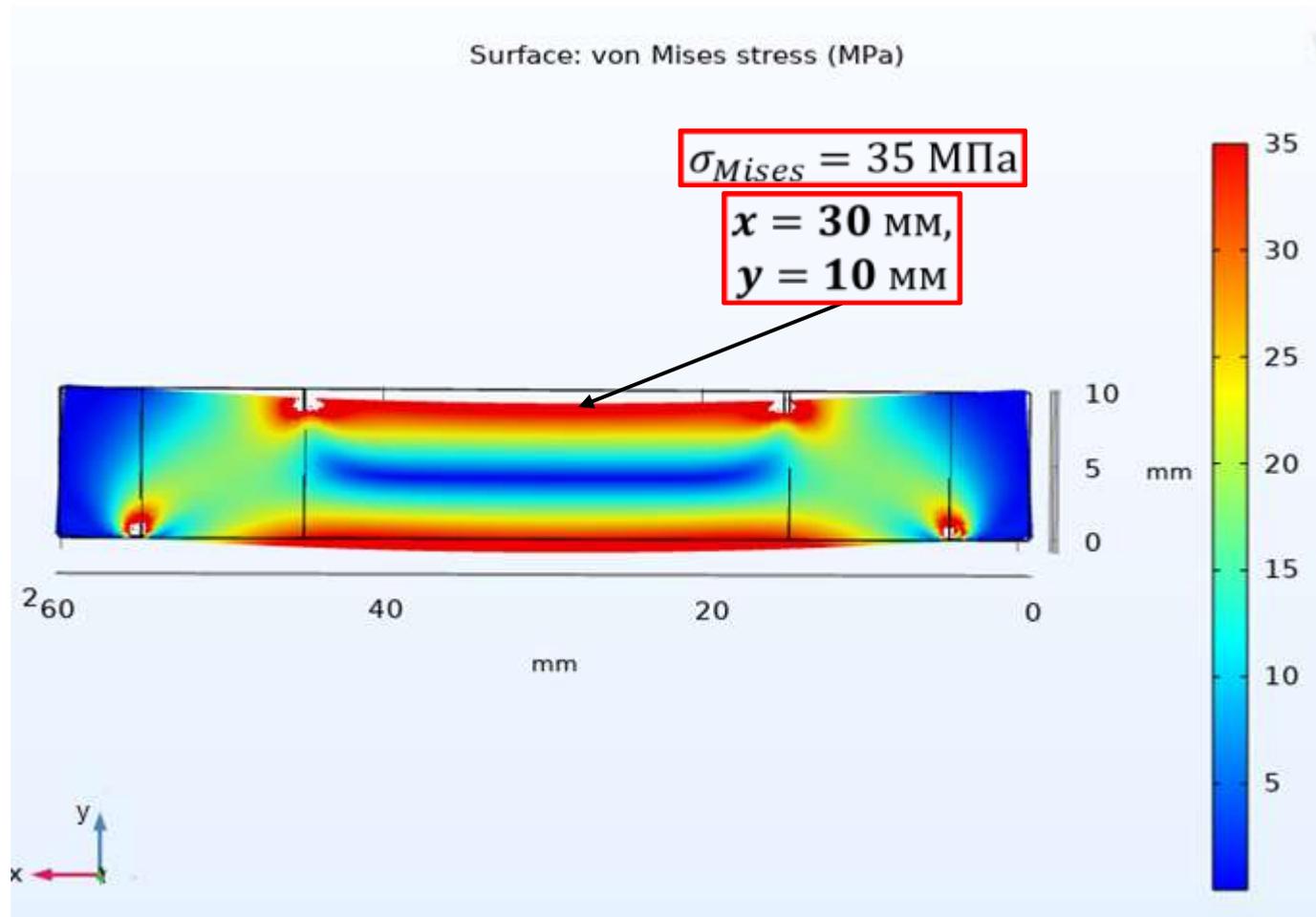


Качество КЭ-элементов

- Значения между 0 и 1
- Качество 1, если элемент равносторонний
- Оценивает правильность формы элементов сетки
- Доступные показатели качества:
 - Ассиметрия
 - Максимальный угол
 - Объем в зависимости от окружности
 - Номер условия
 - Скорость роста



Результат конечно-элементного анализа



Сравнительный анализ

Таблица 1 – Сравнение результатов расчетов

Экспериментальный расчет	Аналитический расчет	Результат КЭ- моделирования
$\sigma_1 = \sigma_x = 33.96 \text{ МПа}$ $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_y = 0 \text{ МПа}$	$\sigma_1 = \sigma_x = 30 \text{ МПа}$ $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_y = 0$ МПа	Эквивалентные напряжения по Мизесу $\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sigma_1 = 35 \text{ МПа}$

Заключение

По результатам выпускной квалификационной работы можно сделать *следующие выводы*.

1. С применением аддитивных технологий разработана экспериментальная установка, позволяющая определять напряженно-деформированное состояние прозрачных образцов методом фотоупругости (методом полос).
2. В соответствии с методикой, представленной в ГОСТ 1497 получены экспериментальные данные о физико-механических характеристиках органического стекла марки СЭП.
3. Экспериментально определено напряженное состояние в пластине при четырехточечном изгибе методом полос.
4. Определено напряженное состояние пластины при четырехточечном изгибе методом конечных элементов.
5. Проведен сравнительный анализ решения задачи четырехточечного изгиба пластины экспериментальным методом полос с аналитическим решением и численным решением. Показано, что напряжения, полученные методом полос, несущественно (\approx на 11 %) отличаются от полученных аналитическим методом. С численным решением расхождение составляет около 2 %. Это может быть связано как с несовершенством установки, так и с погрешностями измерений. Оценка степени соответствия результатов эксперимента, аналитического расчета и конечноэлементного моделирования показала правильность и целесообразность метода фотоупругости.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»
Кафедра теоретической и прикладной механики

ВЫПУСКНАЯ-КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
«Решение задач теории упругости прозрачных тел
методом полос»

Выполнил: студент гр. 4-33

Хватов А.С.

Руководитель: к.т.н., доцент

Шилов М.А.

Иваново 2022