

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
на тему «Определение напряженно-
деформированного состояния оптически
прозрачных образцов методом фотоупругости»

Выполнила: студентка гр. 4-33

Кузьмичева М.Д.

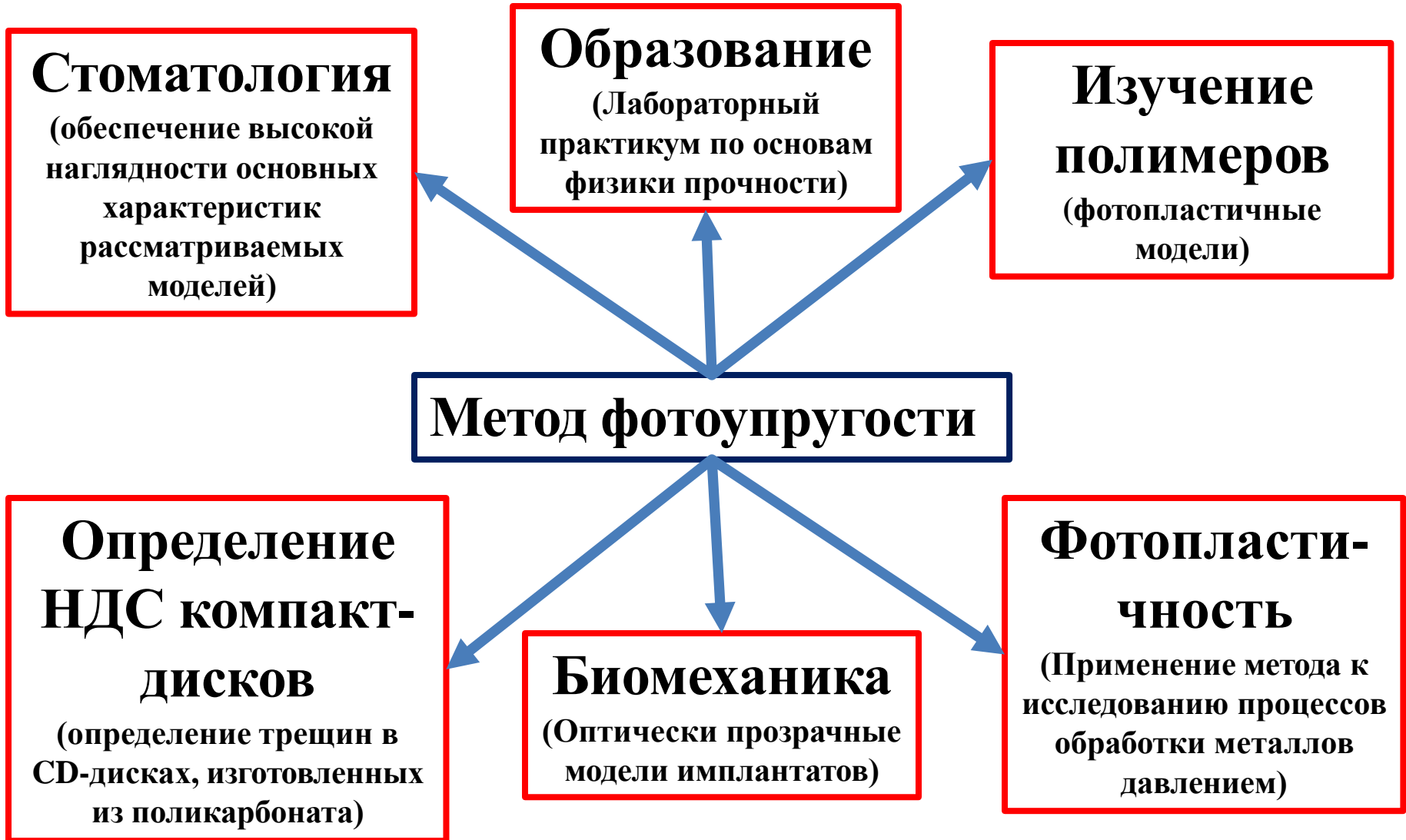
Руководитель: доцент кафедры ТиПМ,

к.т.н., доцент

Шилов М.А.

Иваново 2020

Области применения фотоупругости

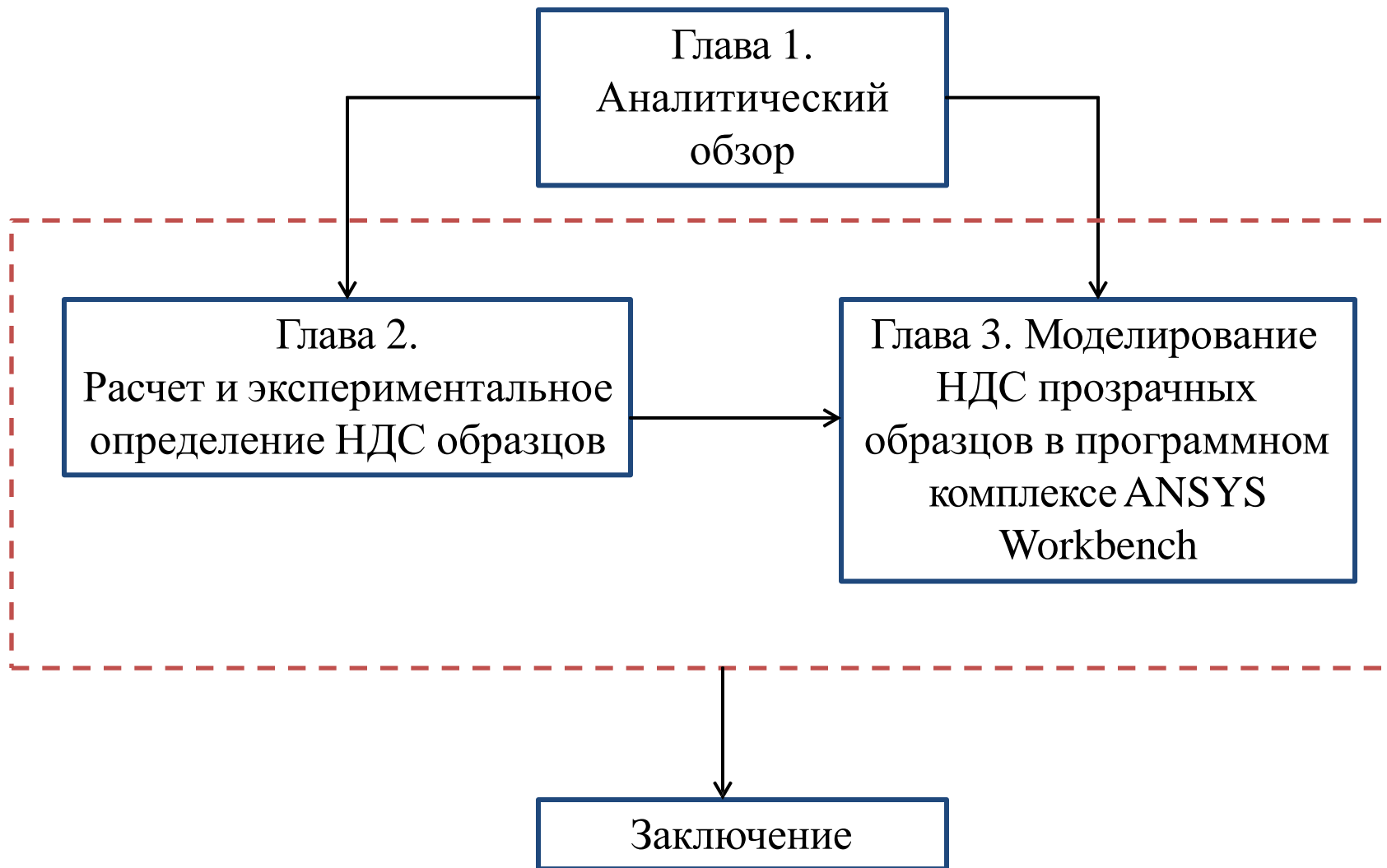


Цель: определить напряженно-деформированное состояние оптически прозрачных образцов методом фотоупругости

Задачи работы:

1. Определение физико-механических характеристик исследуемого материала при одноосном растяжении;
2. Разработка экспериментальной установки для определения характеристик оптически прозрачных тел методом фотоупругости;
3. Экспериментальное определение НДС исследуемых образцов методом фотоупругости;
4. Проведение конечно-элементного моделирования и решение прочностной задачи.

Структура работы



Глава 2. Расчет и экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния образцов

§2.1 Определение физико-механических характеристик материала при одноосном растяжении



Рис. 1 Образцы из оргстекла марки СЭП
ГОСТ 17622-72

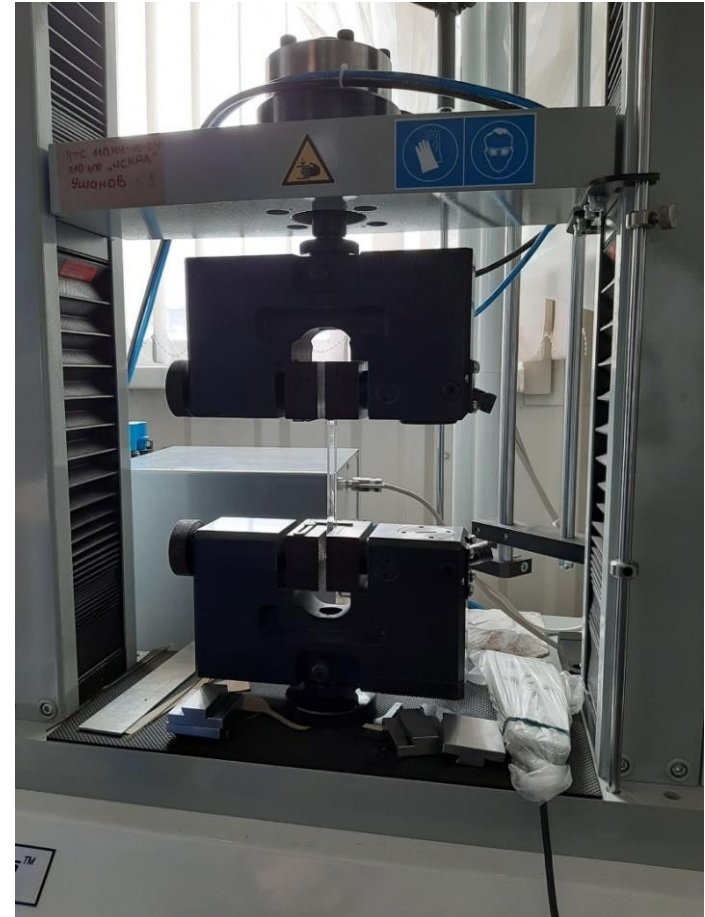
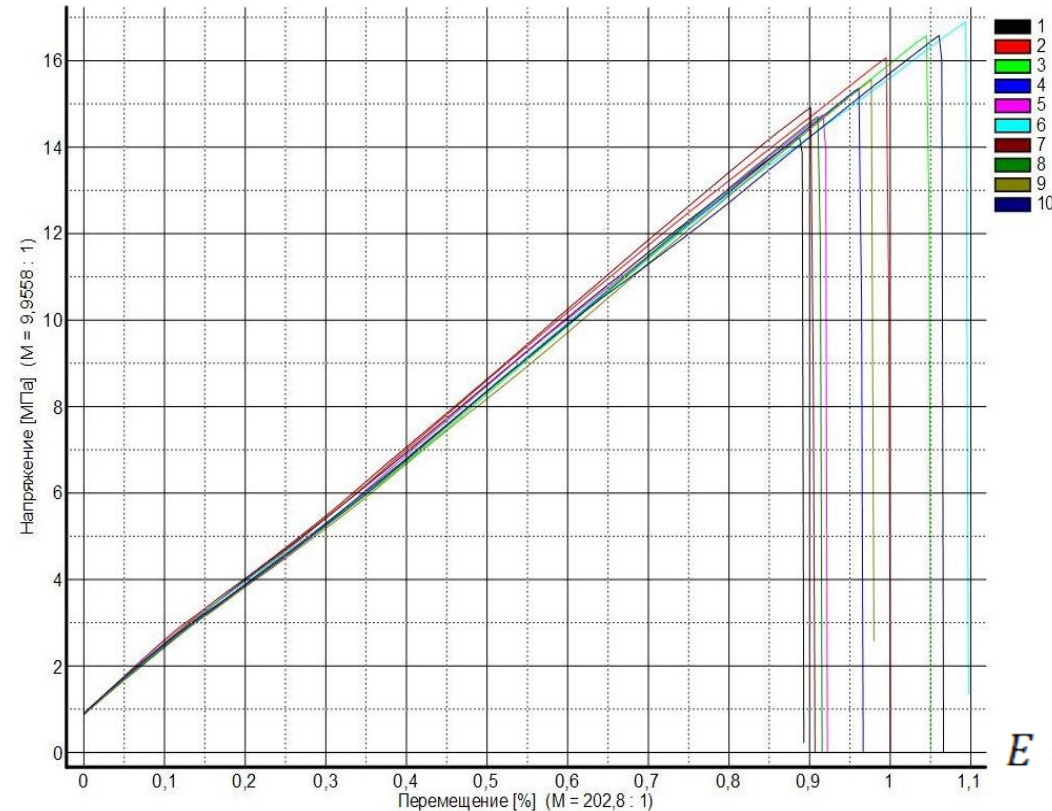


Рис. 2 Разрывная машина УТС-110МН-10-ОУ

Данные испытаний получены в соответствии с методикой, представленной в ГОСТ 11262-2017 Пластмассы, пункты 6, 8.

Глава 2. Расчет и экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния образцов

§2.1 Определение физико-механических характеристик материала при одноосном растяжении



$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{FL}{S|\Delta l|} \quad (1)$$

где F – среднее разрывное усилие между значениями нагрузок, соответствующих относительному удлинению 0.1% и 0.3%; L – исходная расчетная длина образца; S – средняя площадь поперечного сечения; Δl – среднее остаточное удлинение.

$$E = \frac{150 \text{ мм} \cdot 893.46 \text{ Н}}{57.42 \text{ мм}^2 \cdot 0.73105 \text{ мм}} = 3193 \text{ (МПа)}$$

Рис. 3 Диаграммы растяжения оргстекла СЭП
ГОСТ 17622-72

Глава 2. Расчет и экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния образцов

§2.1 Определение физико-механических характеристик материала при одноосном растяжении



Рис. 4 Экспериментальная установка

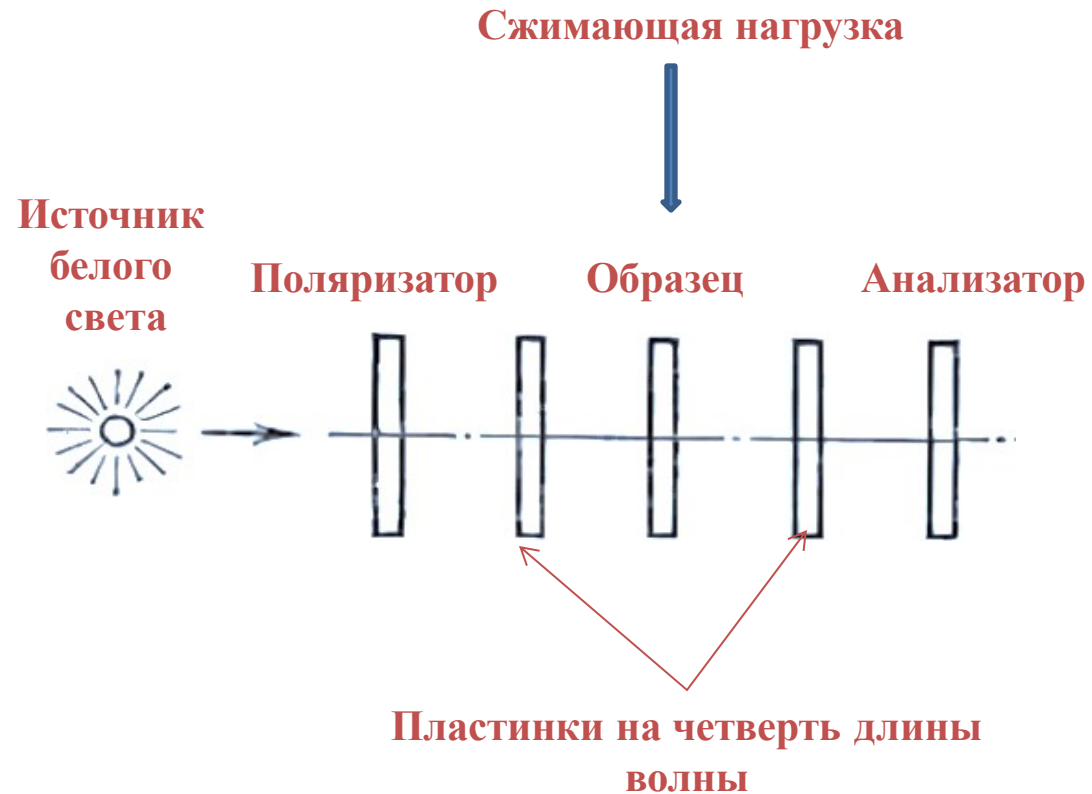


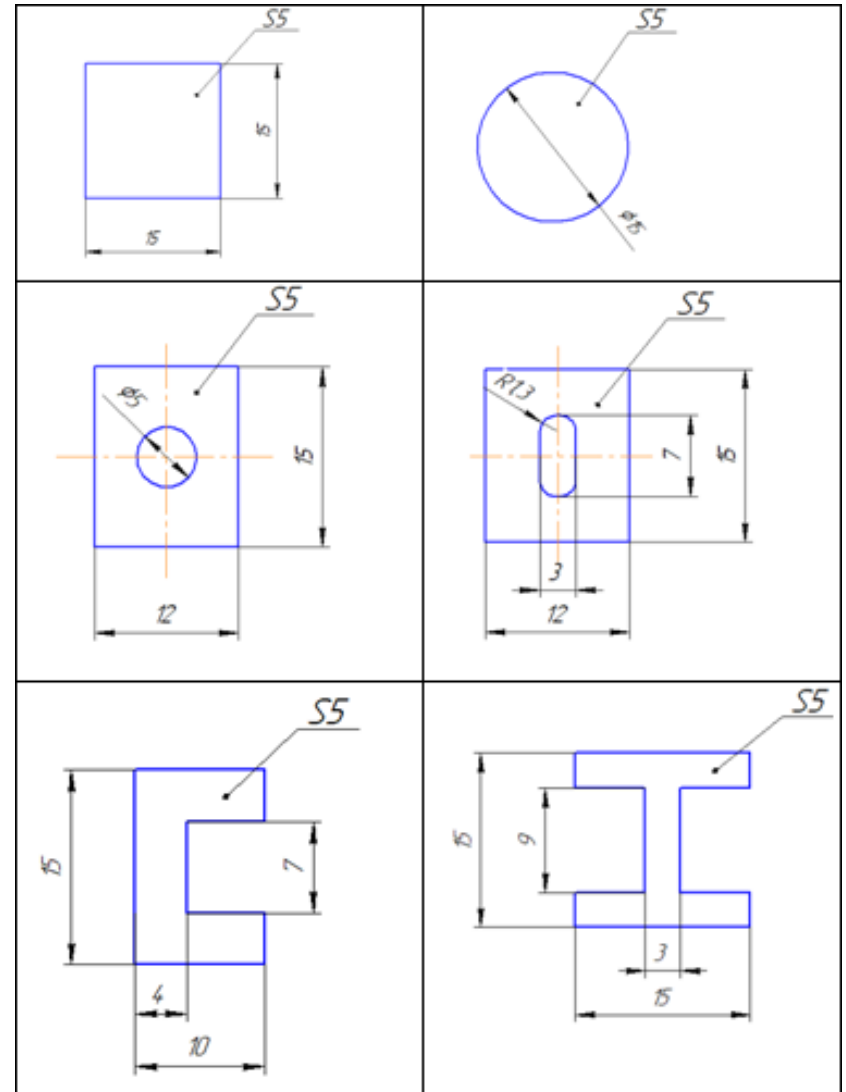
Рис. 5 Схема оптической оси экспериментальной установки

Глава 2. Расчет и экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния образцов

§2.1 Определение физико-механических характеристик материала при одноосном растяжении

Геометрические характеристики образцов:

1. Квадратная призма;
2. Диск;
3. Прямоугольный параллелепипед с круглым отверстием;
4. Прямоугольный параллелепипед с овальным отверстием;
5. Швеллер;
6. Двутравр.



Глава 2. Расчет и экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния образцов

§2.1 Определение физико-механических характеристик материала при одноосном растяжении

Постановка задачи:

На примере схемы диска проведем постановку задачи. Схема представляет собой жестко закрепленный плоский диск диаметром 15 мм и толщиной 5 мм. На пластину из оргстекла оказывает одноосное сжимающее воздействие сила P . В процессе проведения эксперимента образец последовательно нагружался сосредоточенной нагрузкой, изменяющейся от 0 до 1000 Н с шагом 50 Н.

Тип механического состояния: плоское напряженное состояние, статическая постановка. Необходимо провести экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния диска.

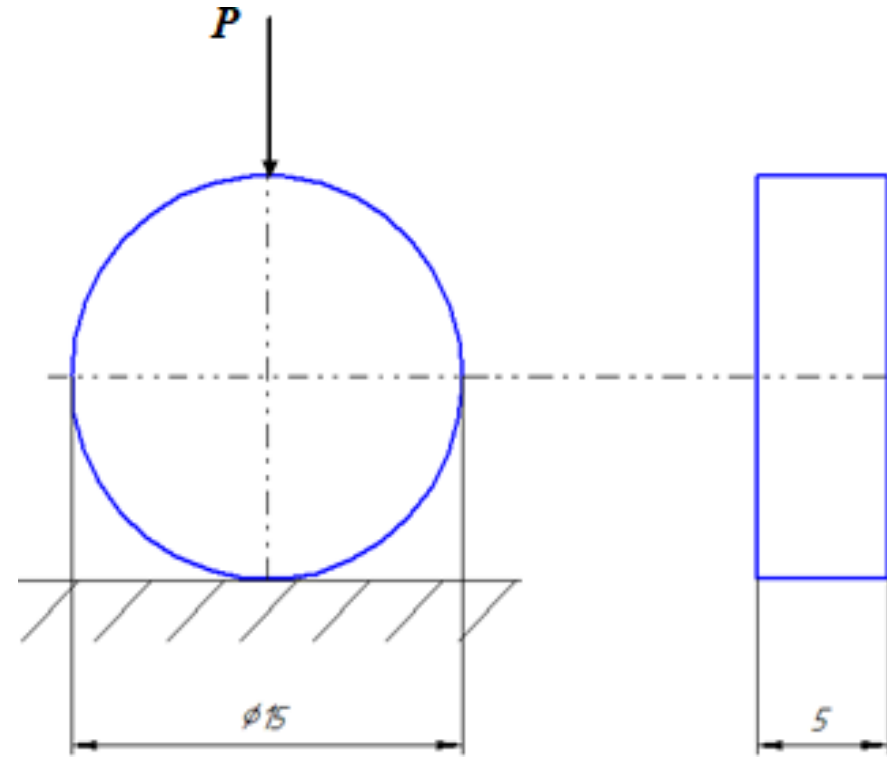


Рис. 6 Схема исследуемой модели

Глава 2. Расчет и экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния образцов

§2.2. Обработка результатов эксперимента

2.2.1 Результаты эксперимента для плоского диска



Ненагруженное состояние



Сжимающая нагрузка: 200 Н

Рис. 7 Поляризационно-оптические картины образцов диска при ненагруженном состоянии и нагрузке 200 Н

Глава 2. Расчет и экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния образцов

§2.2. Обработка результатов эксперимента

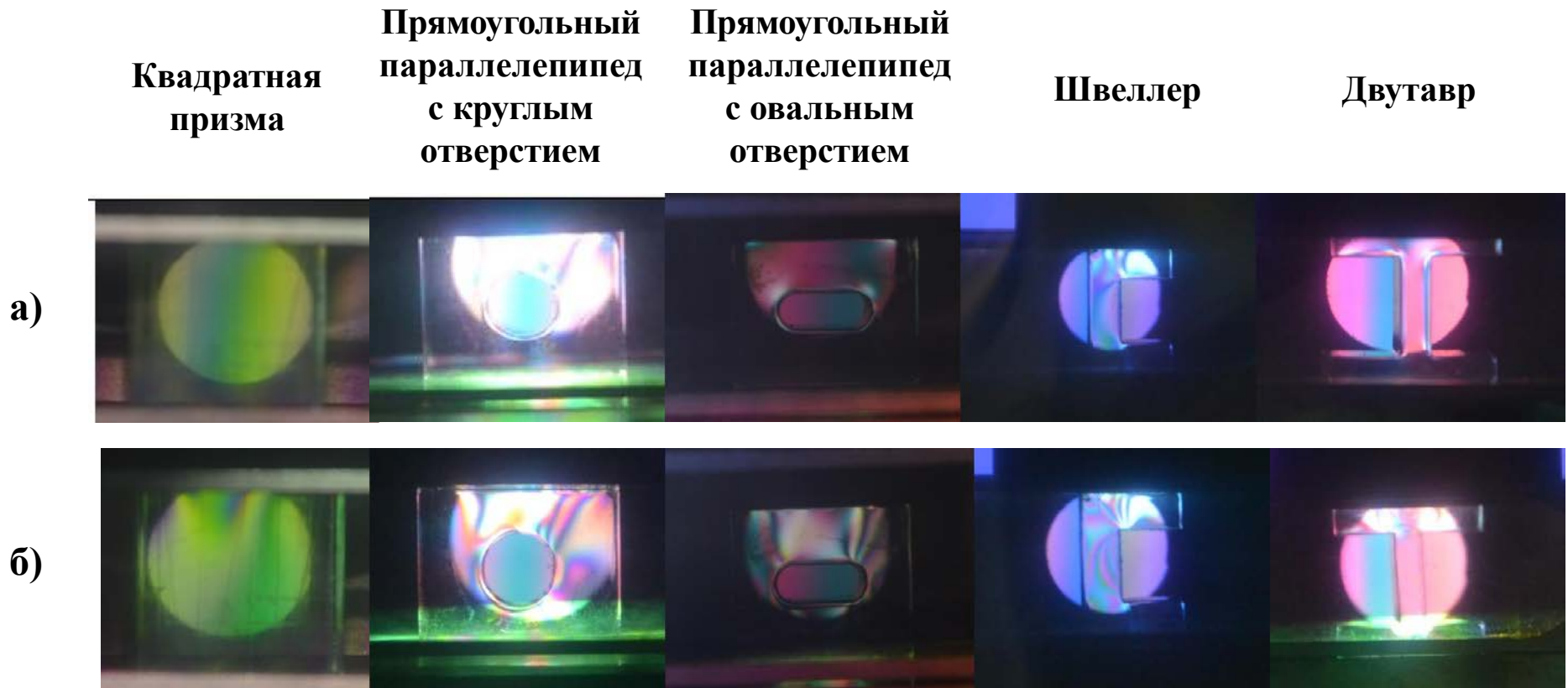


Рис. 8 Поляризационно-оптические картины остальных исследуемых образцов в ненагруженном состоянии (ряд а) и нагрузке 200 Н (ряд б)

Глава 2. Расчет и экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния образцов

§2.2. Обработка результатов эксперимента

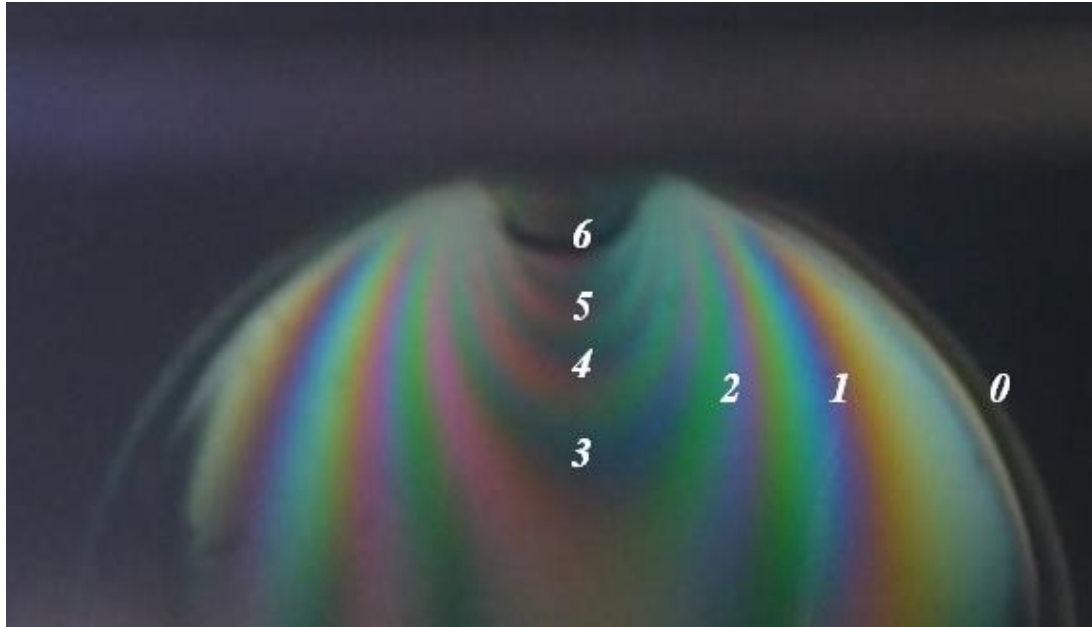


Рис. 9 Картина изохром при одноосном сжатии модели диска из органического стекла (нормальная нагрузка 200 Н)

Цена полосы:

$$\sigma^{1,0} = \frac{8P}{\pi Dn} \quad (2)$$

Величина главного напряжения:

$$\sigma_1 = \frac{n\sigma^{1,0}}{t} \quad (3)$$

где n – порядок полосы;
 D – диаметр диска;
 P – сжимающая нагрузка;
 t – толщина образца.

| Номер полосы | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|------|------|------|------|-------|-------|
| Величина главного напряжения σ_1 , МПа | 2,26 | 4,53 | 6,79 | 9,06 | 11,32 | 13,58 |

Глава 2. Расчет и экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния образцов

§2.2. Обработка результатов эксперимента

2. Аналитический расчет напряжений для плоского диска

Напряжения могут быть выражены через функцию Эри $u(x,y)$:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \quad (4)$$

Окончательно математические условия, которым должно удовлетворять точное решение плоской задачи для напряжений, выражаются так:

1) Уравнения равновесия

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

2) Уравнения совместности деформаций

$$\frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 u}{\partial y^4} = 0 \quad (6)$$

3) Граничные условия

$$\begin{cases} P_{xn} = \sigma_x \cos(\bar{n}, x) + \tau_{xy} \cos(\bar{n}, y) \\ P_{yn} = \tau_{xy} \cos(\bar{n}, x) + \sigma_y \cos(\bar{n}, y) \end{cases} \quad (7)$$

Глава 2. Расчет и экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния образцов

§2.2. Обработка результатов эксперимента

2.2.2 Аналитический расчет напряжений для плоского диска

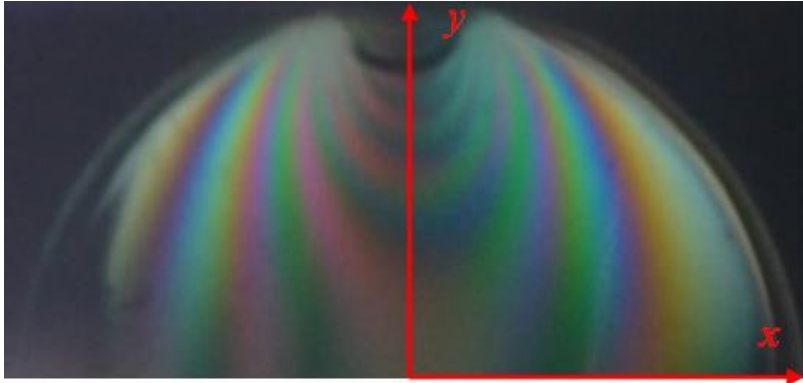


Рис. 10 Расположение осей координат диска

Главные напряжения:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x + \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (9)$$

Эквивалентные напряжения:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}}^{IV} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \sigma_x = -\frac{2P}{\pi t} \left[\frac{(R-y)x^2}{r_1^*} + \frac{(R+y)x^2}{r_2^*} - \frac{1}{2R} \right] \\ \sigma_y = -\frac{2P}{\pi t} \left[\frac{(R-y)^3}{r_1^*} + \frac{(R+y)^3}{r_2^*} - \frac{1}{2R} \right] \\ \tau_{xy} = \frac{2P}{\pi t} \left[\frac{(R-y)^2 x}{r_1^*} - \frac{(R+y)^2 x}{r_2^*} \right] \\ r_1^* = x^2 + (R-y)^2 \quad r_2^* = x^2 + (R+y)^2 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \sigma_x = -0.74 \text{ (МПа)} \\ \sigma_y = 1.44 \text{ (МПа)} \\ \tau_{xy} = -6.87 \text{ (МПа)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_1 = 7.22 \text{ (МПа)} \\ \sigma_2 = -6.53 \text{ (МПа)} \end{cases}$$

$$\sigma_{\text{ЭКВ}}^{IV} = 11.92 \text{ (МПа)}$$

Глава 3. Моделирование НДС прозрачных образцов в программном комплексе ANSYS Workbench

§3.1 Постановка задачи

Engineering Data - выбор и установка физико-механических свойств материала

Geometry - определение геометрии области исследования

Model-Mesh - установка параметров КЭ сетки и ее генерация

Model-Static Structural - выбор граничный условий, действующих на модель

Model-Solution - получение необходимых результатов моделирования

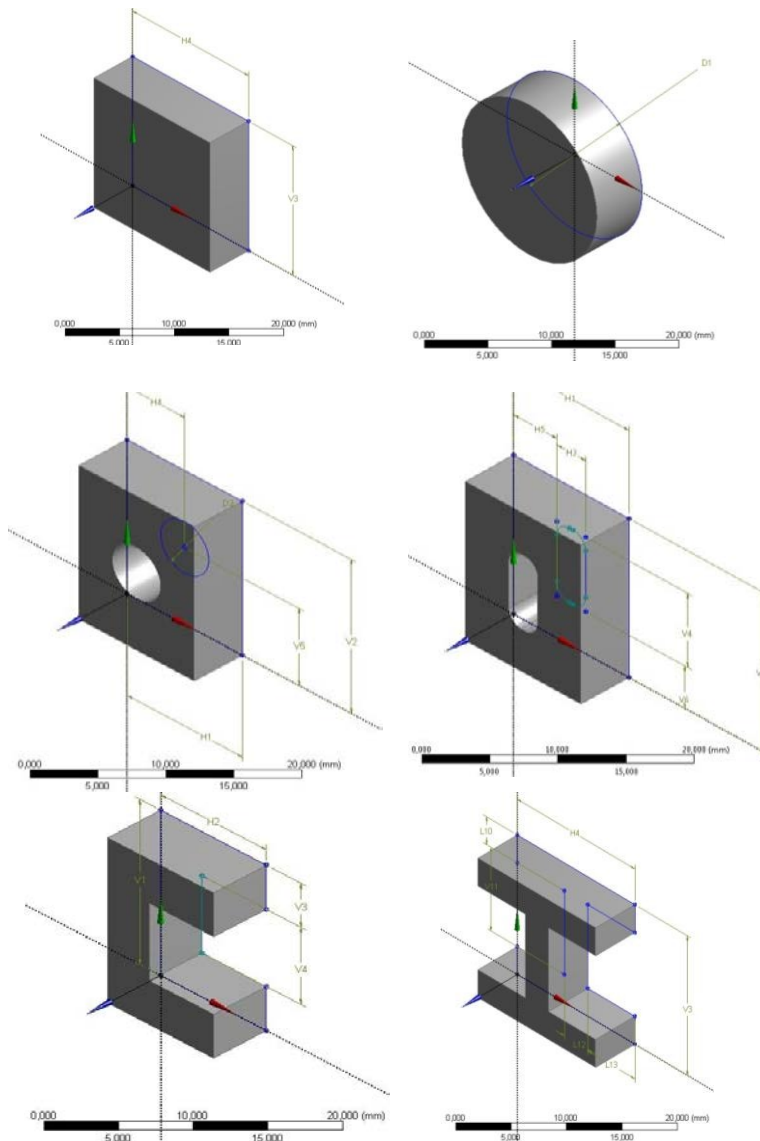


Рис. 11 Геометрия образцов

Глава 3. Моделирование НДС прозрачных образцов в программном комплексе ANSYS Workbench

§3.2 Создание конечно-элементной модели



Граничные условия:

A: $u_1 = u_2 = u_3 = ur_1 = ur_2 = ur_3 = 0$ – отсутствие линейных и угловых перемещений по нижней плоскости модели;

B: Нормальная одноосная сжимающая нагрузка, действующая на верхнюю плоскость модели и равная 330 Н .

Рис. 12 Наложение граничных условий на швеллер

Глава 3. Моделирование НДС прозрачных образцов в программном комплексе ANSYS Workbench

§3.3 Результаты моделирования

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (11)$$

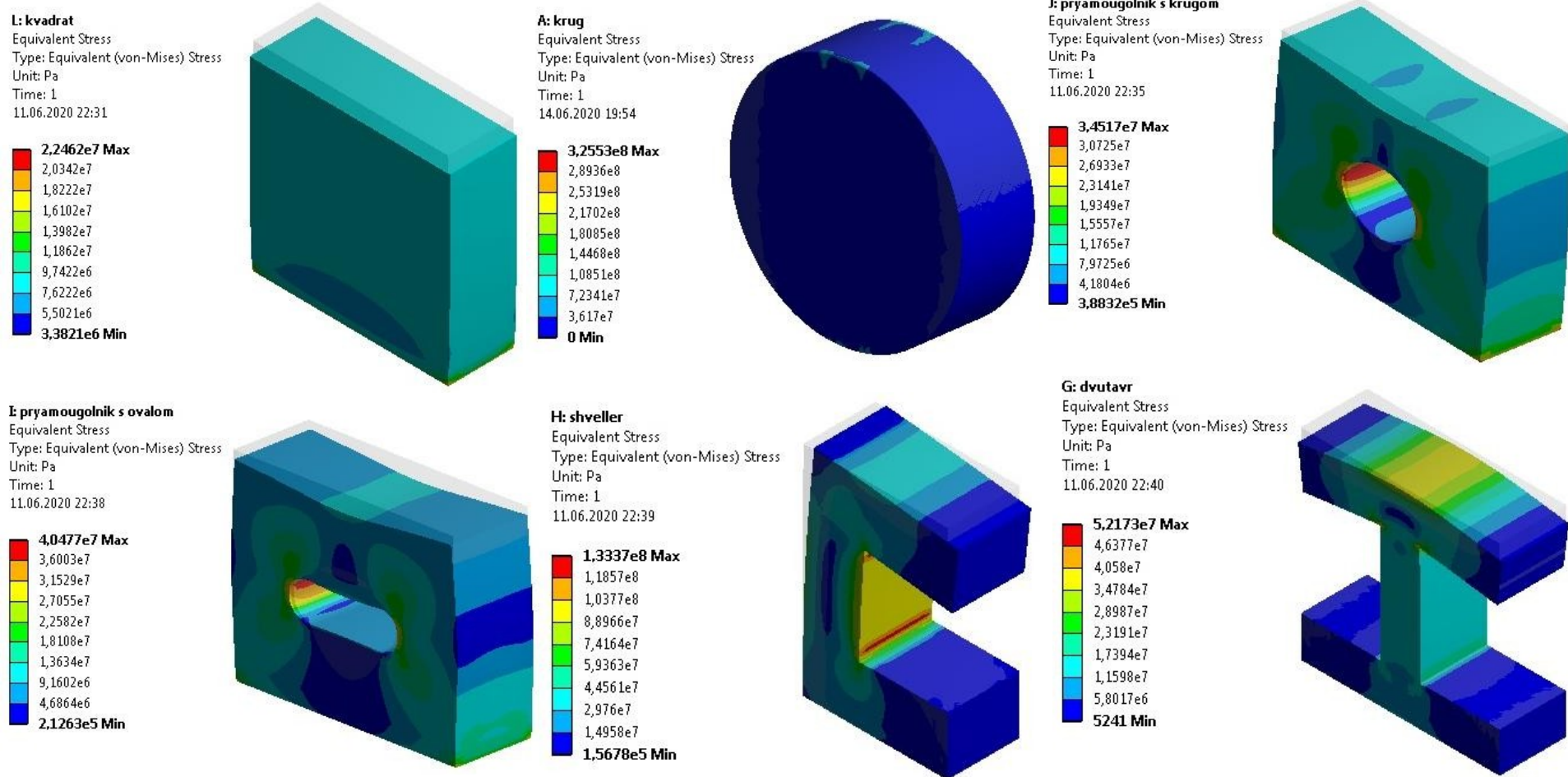


Рис. 13 Результаты КЭ моделирования

Глава 3. Моделирование НДС прозрачных образцов в программном комплексе ANSYS Workbench

§3.3 Результаты моделирования

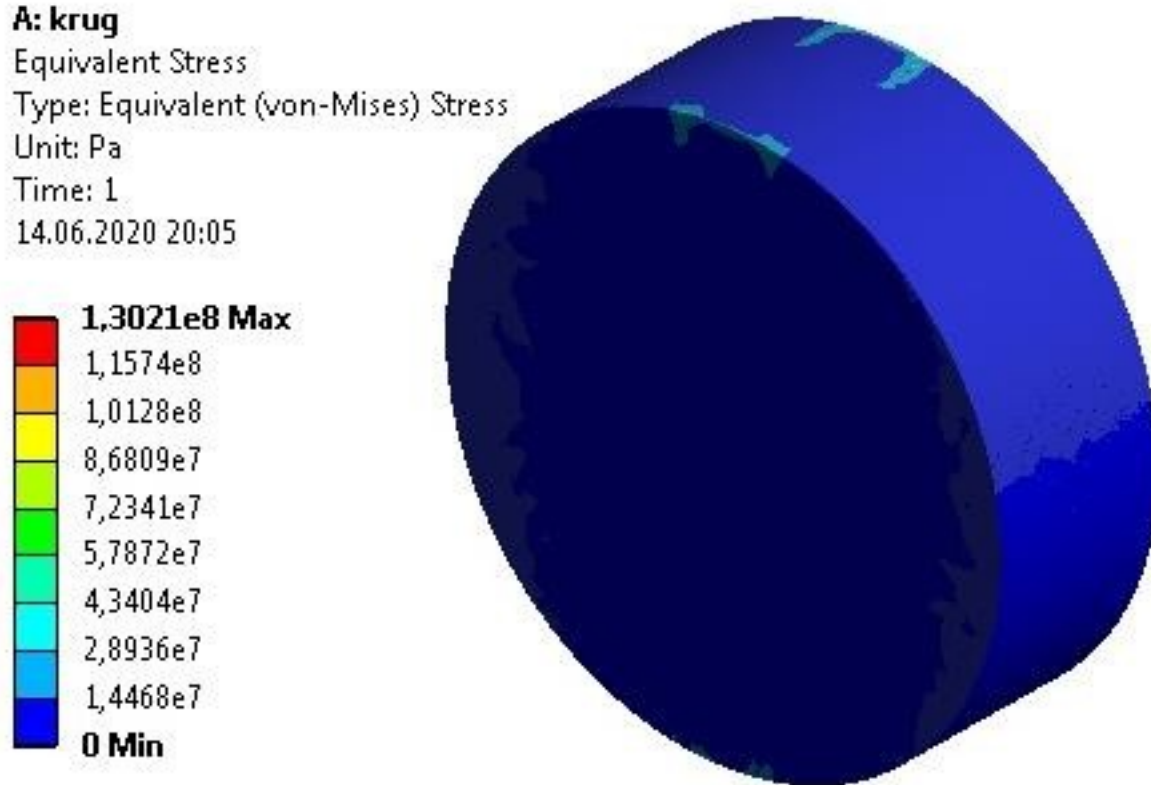


Рис. 14 Результаты КЭ моделирования сжатого по диаметру диска нагрузкой 200 Н

По шкале вывода значений максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу равны : $\sigma_{\text{ЭКВ}} = 14.46$ МПа. Напряжения внутри диска и по его контуру равны 0.

Глава 3. Моделирование НДС прозрачных образцов в программном комплексе ANSYS Workbench

§3.4. Сравнительный анализ аналитического, экспериментального расчета и результатов моделирования

| Экспериментальный расчет | Аналитический расчет | Результаты КЭ моделирования |
|--|---|--|
| <p>Максимальные напряжения на главных площадках:</p> $\begin{cases} \sigma_1 = 13.58 \text{ МПа} \\ \sigma_2 = 0 \text{ МПа} \end{cases}$ <p>Эквивалентные напряжения по Мизесу:</p> $\sigma_{\text{ЭКВ}} = 13.58 \text{ МПа}$ | <p>Максимальные напряжения на главных площадках:</p> $\begin{cases} \sigma_1 = 7.22 \text{ МПа} \\ \sigma_2 = -6.52 \text{ МПа} \end{cases}$ <p>Эквивалентные напряжения по Мизесу:</p> $\sigma_{\text{ЭКВ}} = 11.92 \text{ МПа}$ | <p>Эквивалентные напряжения по Мизесу:</p> $\sigma_{\text{ЭКВ}} = 14.46 \text{ МПа}$ |

Заключение

В работе проводилось определение напряженно-деформированного состояния оптически прозрачных образцов методом фотоупругости. Для достижения этой цели были выполнены следующие задачи:

1. Определены физико-механические характеристики оргстекла при одноосном растяжении;
2. Произведена разработка экспериментальной установки для определения характеристик оптически прозрачных тел методом фотоупругости;
3. Экспериментально определены напряжения, возникающие в диске. Для всех образцов получены поляризованно-оптические картины;
4. Проведено конечно-элементное моделирование и была решена прочностная задача исследуемых образцов.

По результатам работы можно сделать вывод, что исследуемые объекты можно использовать для изготовления реальных деталей в разных областях производства.

**Выражаем благодарность за помощь в
определении физико-механических
характеристик исследуемого материала
ООО «Тестсистемы».**