

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

Направить на защиту

в Государственную

экзаменационную комиссию № 89/ГЭК

И.о. директора института ИЦТМС

В.В.Филатов

« » 2022 г.

Заведующий кафедрой

Сопротивления материалов

О.В. Мкртычев

« » 2022 г.

институт Цифровых технологий и моделирования в строительстве

кафедра/ структурное подразделение Сопротивления материалов

код и наименование направления подготовки 15.04.03 Прикладная механика

профиль подготовки Механика и компьютерное моделирование в строительстве

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(ДИПЛОМНАЯ РАБОТА)

ТЕМА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ ЛАЗЕРНО-
ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Обучающийся Суворова Валерия Дмитриевна

(ФИО)

(подпись)

пояснительная записка на 70 стр.,

графическая часть на 30 л.

Руководитель ВКР Попов Александр Леонидович

(ФИО)

(подпись)

Консультант

(ФИО)

(подпись)

Консультант

(ФИО)

(подпись)

Москва 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт ИЦТМС _____

Кафедра/структурное подразделение Сопротивления материалов

Направление подготовки /специальность 15.04.03 Прикладная механика

Профиль Механика и компьютерное моделирование в строительстве

Форма обучения Очная

«УТВЕРЖДАЮ»

Заведующий кафедрой/

руководитель структурного подразделения

Сопротивления материалов

О.В. Мкртычев

«___» _____ 2022г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

Обучающемуся: Суворовой Валерии Дмитриевне

Тема ВКР: Совершенствование алгоритмов и программ лазерно-интерферометрического метода измерения остаточных напряжений

Задачи, подлежащие решению: Разработка новой версии программы для получения и анализа компьютерных интерферограмм. Тестирование программы на образцах в процессе их продольного сжатия на испытательном стенде.

Исходные данные: Исполняемый файл существующей программы для получения и анализа компьютерных интерферограмм без исходных кодов. Образцы для механических испытаний с регистрацией НДС с помощью электронной спекл-интерферией.

Примерное содержание пояснительной записки: Описание разработанной программы. Применение программы при испытаниях трехмерного образца на сжатие.

Примерное содержание графического материала: Блок-схема программы, расчетные схемы, примеры компьютерных интерферограмм

Рекомендованная основная литература: 1. Учебник по языку Python. 2. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М., Пономарев И.И. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах.

Дата выдачи задания « 10 » февраля 2022г.

Срок представления работы « 10 » июня 2022г.

График выполнения ВКР:

№	Наименование этапа выполнения ВКР	Срок выполнения	Процент от общего выполнения
1	Изучение литературы		30%
2	Выполнение экспериментов		80%
3	Оформление работы		100%

Руководитель ВКР д.ф.- м. н. проф. А.Л. Попов

(ФИО)

(подпись)

Подпись обучающегося _____ « ____ » _____ 2022г.

АННОТАЦИЯ

В дипломной работе была разработана программа для получения и анализа компьютерных интерферограмм на современном языке Python. Программа протестирована при сжатии образца в форме параллелепипеда при регистрации полей перемещений боковых поверхностей образцов в процессе их продольного сжатия на испытательном стенде. По результатам испытаний получены исходные спеклограммы, при наложении которых зафиксированы интерферограммы поперечных микроперемещений образца. Сопоставление проведено также на расчетной модели образца в МКЭ в программном комплексе ANSYS.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
ГЛАВА 1. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ АНАЛИЗА НДС КОНСТРУКЦИЙ	8
1.1 Назначение разработки.....	8
1.2 Выбор среды разработки и языка программирования	8
1.3 Разработка программного обеспечения.....	10
1.4 Блок-схема реализованной программы	12
1.5 Архитектура программного проекта	14
ГЛАВА 2, ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ТРЕХМЕРНОГО ОБРАЗЦА НА СЖАТИЕ	22
2.1 Электронная спекл-интерферометрия (ESPI)	22
2.2 Основы (ESPI)	22
2.3 Теоретическая модель.....	24
2.4 Экспериментальная установка	26
2.5 Схема электронного-спекл-интерферометра	33
2.6 Получение интерферограмм с помощью разработанного программного комплекса для испытаний трехмерных моделей на экспериментальном стенде.	35
2.7 Расчетная модель МКЭ.....	41
2.8 Сравнение 2D и 3D расчета (случаи с отверстием и без).....	47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	59
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	60

ВВЕДЕНИЕ

Дипломная работа выполнялась в лаборатории механики прочности и разрушения материалов и конструкций Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук – базовой кафедре «Прикладная механика» НИУ МГСУ.

Развитие неразрушающего контроля при изучении конструкций, характеристик материалов и оценки структуры являются фундаментальной задачей во многих областях. Экспериментальные методы измерений должны обладать высокой чувствительностью, не влияя своим присутствием на результаты. Это особенно важно при изучении образцов небольшого размера.

Наиболее перспективными являются оптические методы, которые по своей природе являются бесконтактными. Кроме того, они очень чувствительны и обеспечивают данные измерений в полном поле. С появлением лазера резко повысилась чувствительность оптических методов.

Электронная спекл-интерферометрия (ESPI) — эффективная оптоэлектронная система для неразрушающего контроля. Этот метод позволяет измерять деформацию поверхности рассеивающего объекта одновременно по всей наблюдаемой поверхности. ESPI используется во многих областях, включая изучение и определение характеристик строительных материалов, оценку сохранности произведений искусства и применение в автомобильной промышленности.

Интересной особенностью системы ESPI является возможность непрерывного захвата кадров деформируемого объекта и последовательного вычитания их из эталонного изображения. Возможно использовать эту технику, чтобы наблюдать в реальном времени за развитием интерференционного узора, связанного с деформацией исследуемой поверхности. ESPI выдает результаты в виде изображений (полосатых узоров), отображающих линии уровня микроперемещений. Существует необходимость использовать методы цифровой обработки изображений, чтобы манипулировать и обрабатывать результаты для выполнения количественной оценки [1].

В лаборатории механики прочности и разрушения материалов и конструкций ИПМех РАН для испытания образца используются метод и аппаратура электронной спекл-интерферометрии, имеющие ряд преимуществ перед традиционными методами измерений.

В первой главе дано описание разработки программного обеспечения для получения и анализа компьютерных интерферограмм.

Во второй главе описан метод электронной спекл-интерферометрии, а также применение электронной спекл-интерферометрии. Приведен пример применения программного комплекса при испытании трехмерного образца на сжатие, приведена теоретическая модель сжатия стержня, описана экспериментальная установка и дана расчетная модель метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS.

ГЛАВА 1. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ АНАЛИЗА НДС КОНСТРУКЦИЙ

Назначение разработки

Программа предназначена для получения компьютерной интерферограммы, соответствующей линиям уровня нормальных перемещений возмущённой поверхности исследуемого тела путём поточечного вычитания матриц оцифрованных изображений поверхности тела до и после внесения возмущения (заданной силы, зондирующей лунки и др.). Она имеет также ряд возможностей по улучшению полученных изображений и расчёту напряжений по интерферограмме малых упругих перемещений.

1. Программное обеспечение должно использоваться в установке, предназначенной для регистрации микроперемещений поверхности объекта.
2. Программное обеспечение должно обеспечивать непрерывную передачу видеопотока с видеокамеры на экран ЭВМ.
3. Программное обеспечение должно обеспечить корректное сохранение фотокадров и видеофрагментов по заданному пользователем пути.
4. Программное обеспечение должно обеспечивать корректное вычитание кадров, полученных данным ПО, а также загруженных извне.

Выбор среды разработки и языка программирования

Для реализации данного проекта была выбрана среда Spyder IDE. Spyder написана на языке программирования Python [3-5]. В ранних версиях Spyder IDE называлась Pydee. Она создана и разработана Пьером Рейбо в 2008 году [3]. Spyder (Scientific PYthon Development EnviRonment) — это интерактивная среда разработки для научного программирования на языке Python. Это программное обеспечение с открытым исходным кодом и кроссплатформенное. Его можно установить на Windows с помощью Python(x,y), WinPython или Anaconda, на Mac OS с помощью Anaconda или MacPorts. Spyder также можно интегрировать в широко используемые дистрибутивы Linux (Ubuntu, Debian, Fedora, OpenSuse, Gentoo, ArchLinux).

Spyder обеспечивает редактирование, проверку данных, интерактивное тестирование и отладку. Кроме того, он включает инструменты обеспечения качества кода и самоанализа, специфичные для Python, такие как Pyflakes, Pylint. Эта платформа объединяет такие инструменты, как NumPy, SciPy, которые отвечают за обработку массивов и математические вычисления, а также другое программное обеспечение с открытым исходным кодом.

Spyder является частью spyderlib (обеспечивает простоту научных расчетов), модуля Python, основанного на PyQt4 (пакет для разработки интерфейса приложений), pyflakes, gore, который предоставляет виджеты PyQt4 или PySide, такие как редакторы исходного кода, консоль Python или словарь на основе графического интерфейса, списки/кортежи и редакторы массивов NumPy. Spyder предлагает диалоговое окно управления PYTHONPATH (это переменная окружения, в которой хранятся пути, по которым проходит интерпретатор Python в поисках модулей), похожее на MATLAB (работает со всеми консолями) [3].

Поскольку среда разработки в основном ориентирована на написание и тестирование кода, редактор является ключевым элементом Spyder. Основными функциями редактора являются:

1. синтаксическая раскраска для Python;
2. точки останова и условные точки останова (отладчик: pdb);
3. функции динамического самоанализа кода (на базе `gore` – утилита для улучшения кода Python), включая завершение кода и подсказки по вызову;
4. интегрированный анализ кода;
5. браузер классов и функций;
6. обозреватель схем кода: функции, классы, инструкции `if/else/try/...`;
7. выделение событий;
8. списки дел (TODO, FIXME, XXX);
9. ошибки и предупреждения с анализом кода в реальном времени;
10. возможность запустить весь сценарий или любую его часть из редактора;
11. завершение кода и автоматическая ссылка на документацию через инспектор объектов.

Основные функции консоли:

1. все консоли выполняются в отдельном процессе;
2. открываются интерпретаторы Python или базовые командные окна терминала;
3. многие консоли Python и Ipython работают одновременно;
4. интерпретатор Python;
5. запуск скрипта на Python;
6. удаление пользовательского модуля (заставляет интерпретатор Python полностью перезагружать модули при выполнении скрипта Python);
7. проводник переменных: редакторы на основе графического интерфейса для множества типов данных (числа, строки, списки, массивы, словари и т.д.); импорт / экспорт данных из / во множество типов файлов (текстовые файлы, файлы `!NumPy`, файлы `MATLAB`); несколько экземпляров редактора массивов / списков /, что позволяет сравнивать содержимое переменных; визуализация данных.

Другие функции включают журнал истории, инспектор объектов (предоставляет документацию или исходный код, который может отображаться в виде html-страницы благодаря режиму расширенного текста, работающему на `sphinx`) и Project Explorer (поддержка импорта проекта `Pydev`) [3].

Помимо встроенных функций, возможности Spyder можно расширить с помощью системы плагинов и API. Spyder также можно использовать в качестве библиотеки расширений `PyQt5`, что позволяет использовать его функциональные возможности и встраивать его компоненты, такие как интерактивная консоль, в собственное программное обеспечение.

Язык Python, выбранный для разработки, — это высокоуровневый, интерпретируемый, интерактивный и объектно-ориентированный язык сценариев. Он часто использует английские

ключевые слова, тогда как другие языки используют знаки препинания, и в нем меньше синтаксических конструкций, чем в других языках [5].

Преимущества:

1. Python обрабатывается интерпретатором во время выполнения. Не нужно компилировать программу перед ее выполнением.
2. Python интерактивен — можно напрямую взаимодействовать с интерпретатором, чтобы писать свои программы [4].
3. Python является объектно-ориентированным [4].
4. Простота в освоении — Python имеет несколько ключевых слов, простую структуру и четко определенный синтаксис.
5. Широкая стандартная библиотека [5].
6. Интерактивный режим — позволяет интерактивно тестировать и отлаживать фрагменты кода.
7. Портативный — Python может работать на самых разных аппаратных платформах и имеет одинаковый интерфейс на всех платформах.
8. Расширяемый — возможность добавлять низкоуровневые модули в интерпретатор Python.
9. Базы данных — Python предоставляет интерфейсы для всех основных коммерческих баз данных [5].
10. Программирование с графическим интерфейсом — Python поддерживает приложения с графическим интерфейсом, которые можно создавать и портировать в библиотеки и системы Windows, такие как Windows MFC, Macintosh и систему X Window в Unix [5].
11. Масштабируемость — Python обеспечивает структуру и поддержку больших программ [5].
12. Поддерживает функциональные и структурированные методы программирования, а также ООП (объектно-ориентированное программирование).

Разработка программного обеспечения

В рамках разработки программы были использованы следующие внешние библиотеки.

PySimpleGUI— это пакет для разработки пользовательских интерфейсов. Большинство графических интерфейсов делают одну вещь: собирают информацию от пользователя и возвращают ее. Что ожидается от большинства графических пользовательских интерфейсов, так это нажатая кнопка (например, ОК, отмена, сохранение, да, нет и т. д.) и значения, введенные пользователем. Именно так работает PySimpleGUI (для простых графических интерфейсов). Когда делается вызов для отображения графического интерфейса, ничего не выполняется до тех пор, пока не будет нажата кнопка, закрывающая форму.

Библиотека PySimpleGUI предоставляет интерфейс для графических интерфейсов. Даже для многих сложных графических интерфейсов требуется менее 20 строк кода при использовании PySimpleGUI [6].

OpenCV - библиотека компьютерного зрения с открытым исходным кодом для распознавания или идентификации изображений. На ранней стадии он был написан на C/C++, но теперь используется и

в Python для компьютерного зрения [9]. В настоящее время разработкой OpenCV занимается российская команда, которая выпускает новую версию каждые полгода [8].

В OpenCV CV — это аббревиатура компьютерного зрения, которая помогает компьютерам понимать содержание цифровых изображений, таких как фотографии и видео. Цель компьютерного зрения — понять содержание изображений. CV извлекает описание из картинки, которая может быть и объектом, и текстовым описанием, и трехмерной моделью.

Человеческие глаза предоставляют много информации, основанной на том, что они видят. Машины помогают все видеть, преобразовывать видение в числа и сохранять в памяти. Здесь возникает вопрос, как компьютер преобразует изображения в числа. Ответ заключается в том, что значение пикселя используется для преобразования изображений в числа. Пиксель — это наименьшая единица цифрового изображения или графики, которую можно отобразить и представить на цифровом устройстве отображения. Интенсивность изображения в конкретном месте представлена числами. [8].

Один из двух распространенных способа идентификации изображений - это RGB. RGB (красный, зеленый и синий) относится к системе представления цветов, которые используются на дисплее компьютера. Красный, зеленый и синий цвета можно комбинировать в различных пропорциях, чтобы получить любой цвет в видимом спектре. Уровни R, G и B могут варьироваться от 0 до 100 процентов от полной интенсивности. Каждый уровень представлен диапазоном десятичных чисел от 0 до 255 (256 уровней для каждого цвета), эквивалентным диапазону двоичных чисел от 00000000 до 11111111 или шестнадцатеричных чисел от 00 до FF. Общее количество доступных цветов составляет $256 \times 256 \times 256$ или 16 777 216 возможных цветов.

В языке гипертекстовой разметки (HTML) цвет фона страницы или текстового шрифта определяется значением RGB, выраженным шестью цифрами в шестнадцатеричном формате. Первая и вторая цифры представляют красный уровень; третья и четвертая цифры представляют уровень зеленого; пятая и шестая цифры представляют уровень синего. Чтобы на самом деле отображать цвета для всех возможных значений, компьютерная система отображения должна иметь 24 бита для описания цвета в каждом пикселе. В системах отображения или режимах с меньшим количеством битов для отображения цветов отображается приближение к заданному цвету.

Рассмотрим арифметику изображений - операции сложения и вычитания. Существует два способа выполнения арифметических операций с изображениями: первый способ - использовать `OpenCVcv2.subtract`. Второй способ — использовать базовые операторы сложения и вычитания NumPy.

Арифметика изображений — это просто сложение матриц, но при работе с изображениями нельзя забывать о типе данных.

Рассмотрим для примера сумму двух матриц:

$$\begin{bmatrix} 9 & 3 & 2 \\ 4 & 1 & 4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 9 & 4 \\ 7 & 9 & 4 \end{bmatrix}$$

Ответ представляет собой поэлементную сумму элементов матриц:

$$\begin{bmatrix} 9+0 & 3+9 & 2+4 \\ 4+7 & 1+9 & 4+4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9 & 12 & 6 \\ 11 & 10 & 8 \end{bmatrix}$$

При работе с изображениями существуют числовые ограничения цветового пространства и типа данных. Например, изображения RGB имеют пиксели, попадающие в диапазон $[0, 255]$. Что произойдет, если рассмотрим пиксель с интенсивностью 250 и попытаемся добавить к нему 10? По обычным арифметическим правилам получили бы значение 260. Однако, поскольку представляем изображения RGB как 8-битные целые числа без знака, которые могут принимать значения только в диапазоне $[0, 255]$, 260 не является допустимым значением.

Существуют два способа обработки сложения и вычитания изображений, которые выходят за пределы диапазона $[0, 255]$. Выбор зависит от того, как идут манипуляции пикселями и какими должны быть желаемые результаты.

Первым способом обозначим проверку на гарантию, что ни один пиксель не выходит за пределы диапазона $[0, 255]$, обрезая все пиксели, чтобы иметь минимальное значение 0 и максимальное значение 255.

Вторым способом применяем операцию модуля и «зацикливаем» (что и делает NumPy). Представим обычные настенные часы, где вместо 60 находится 255. Получается, что после достижения 255 следующим числом будет идти 0, а когда отнимаем от меньшего числа большее, то после 0 (против часовой стрелки) будет идти 255.

Между подходами OpenCV и NumPy есть огромная разница: NumPy выполнит арифметические операции по модулю и «зациклится». С другой стороны, OpenCV будет выполнять отсечение и гарантировать, что значения пикселей не выйдут за пределы диапазона $[0, 255]$.

Блок-схема реализованной программы

На рисунке 1 изображена блок-схема программы, которая была разработана на этапе проектирования для наглядной реализации будущего алгоритма ПО.

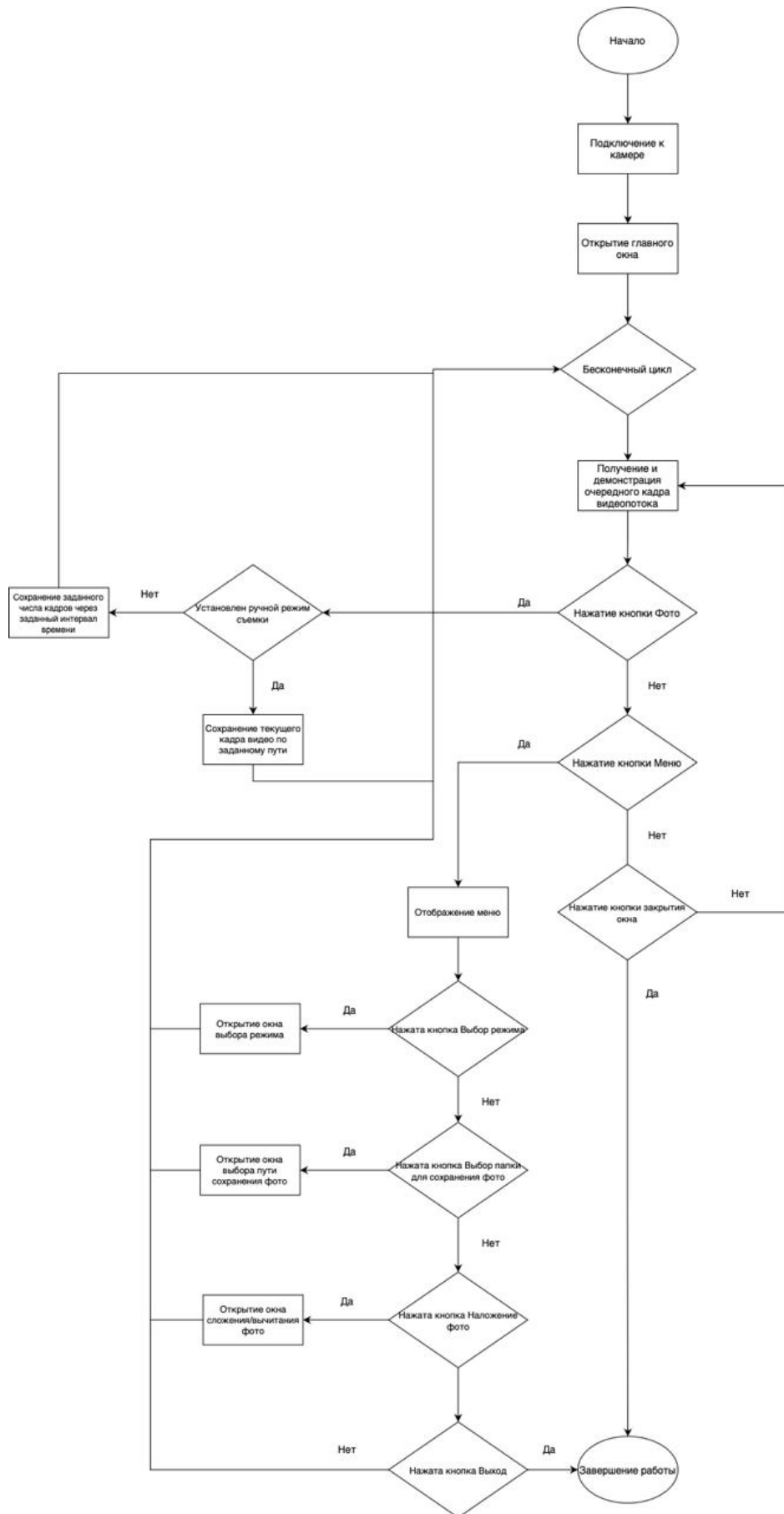


Рисунок 1.1 – Блок-схема программы

Архитектура программного проекта

На рисунке 1.2 представлена исходная спеклограмма в основной экранной форме разработанного в процессе выполнения практики интерфейса программы, состоящего из трех функциональных областей:

1. область 1- экран вывода видео с подключенной камеры
2. область 2 – вывод меню
3. область 3 – информирование о текущем состоянии камеры/кадра

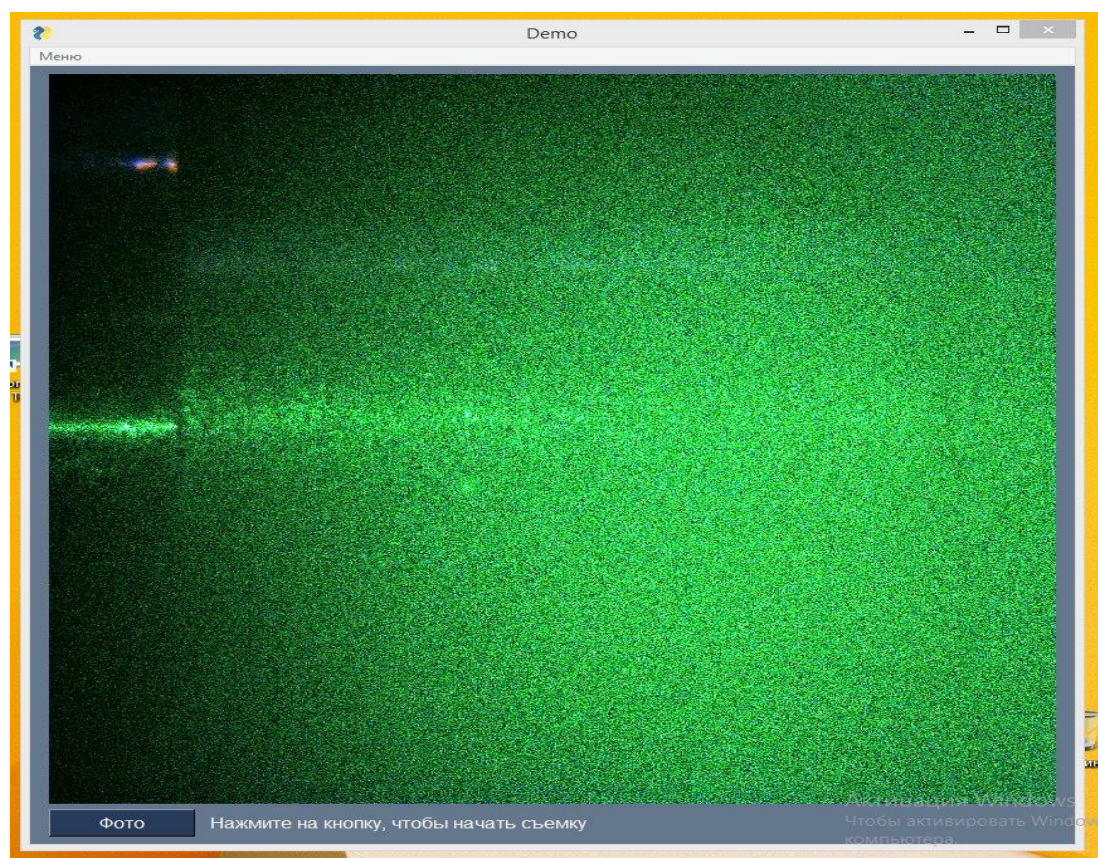


Рисунок 1.2 – Экранная форма главного экрана

На рисунке 1.3 показано выпадающее меню, в котором можно настроить режим съемки, выбрать путь для сохранения кадров, сделать наложение фото или закрыть программу.

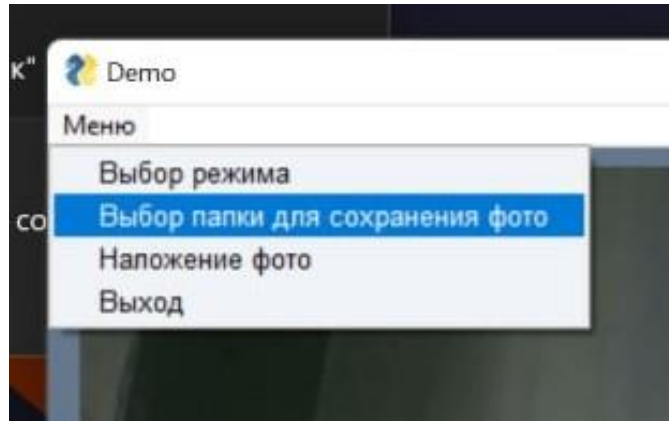


Рисунок 1.3 – Экранная форма прикладного ПО

Для реализации трансляции видео с камеры, видеозахвата была использована библиотека OpenCV.

Класс, отвечающий за видеозахват:

```
vidFile = cv2.VideoCapture(url)

if not vidFile.isOpened():

    raise IOError("Cannot open webcam")

fourcc = cv2.VideoWriter_fourcc(*'XVID')    //размер окна

out = cv2.VideoWriter('output.avi', fourcc, 20.0, (640, 480))
```

При выборе видеосъемки существует два режима: ручной режим и авторежим, как показано на рисунках ниже. После выбора режима необходимо нажать кнопку «сохранить». Ручной режим (рисунок 1.4) предоставляет возможность пользователю самому производить фото видеосъемку; она начинается при нажатии на главном экране (рисунок 1.2) кнопки «фото». Пользователь может выбирать, с каким интервалом и в каком количестве кадров производить съемку.

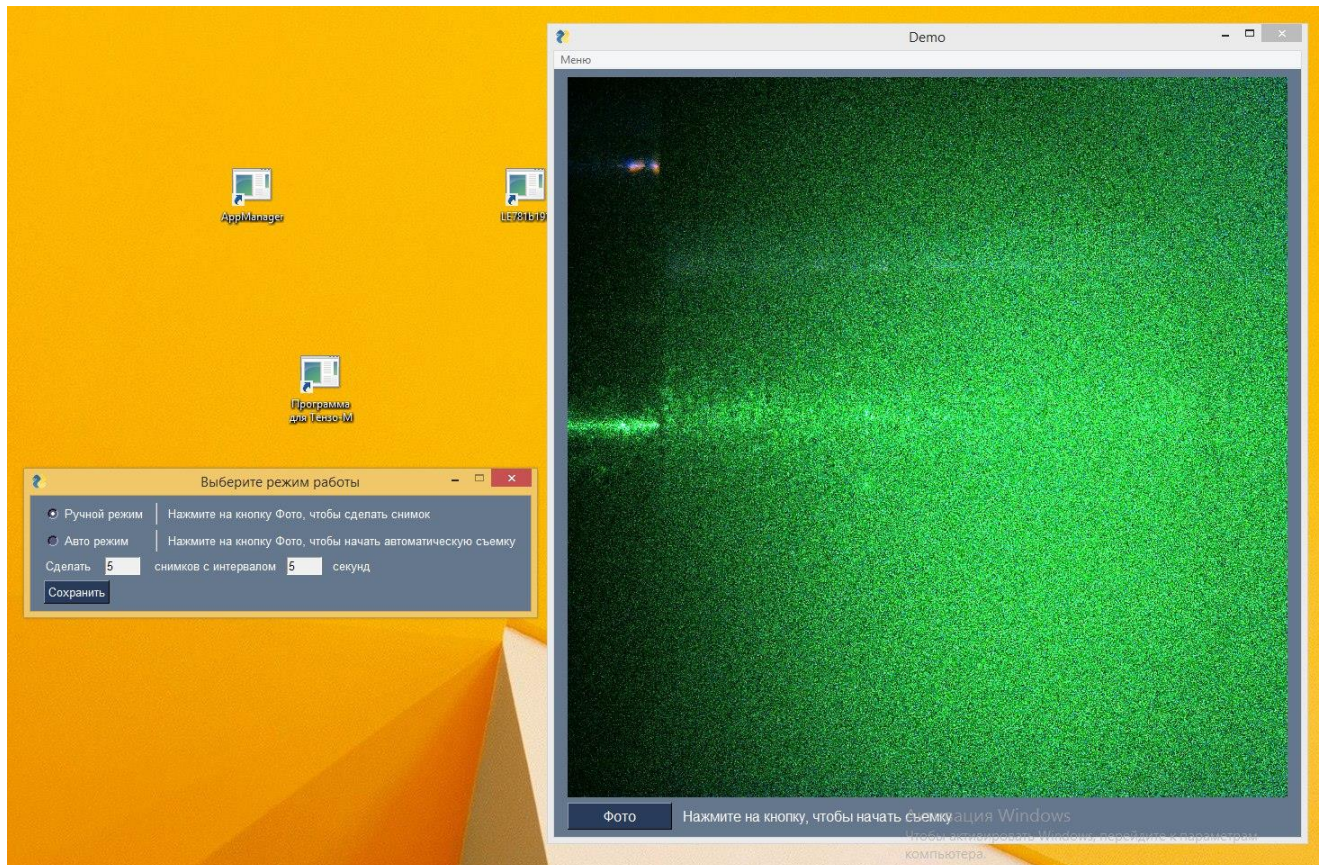


Рисунок 1.4 – Экранная форма выбора режима

При выборе Авторежима не нужно каждый раз нажимать кнопку «фото» на главном экране, задается количество снимков и интервал в меню авторежима. Интервал задается в секундах, пользователь ограничен в выборе интервала только возможностями видеокамеры и ЭВМ.

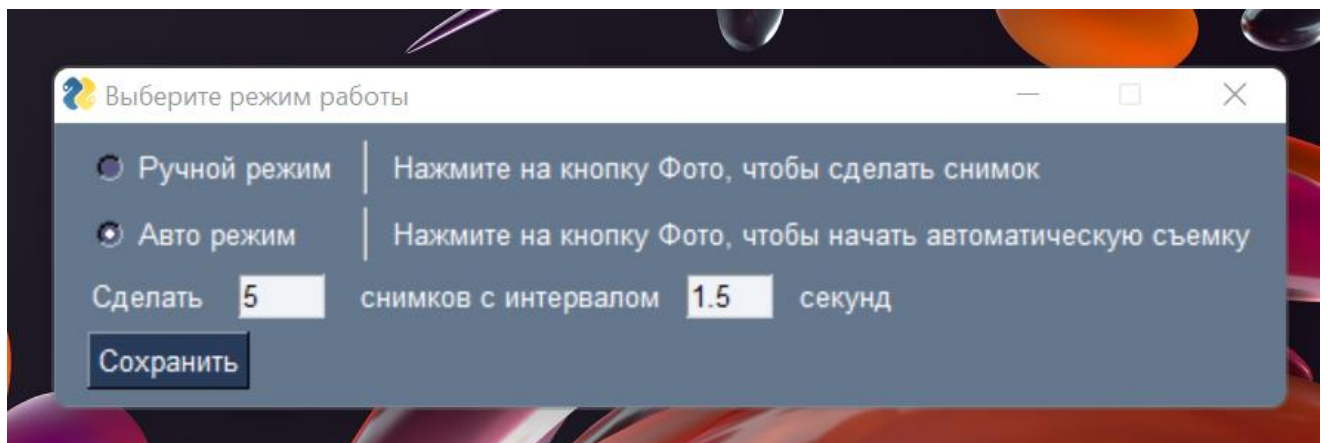


Рисунок 1.5 – Экранная форма выбора Авто режима

После выбора режима необходимо задать путь для сохранения снимков (рисунок 1.6). Для этого пользователь нажимает кнопку «Выбрать папку», выбирает папку для сохранения и нажимает на кнопку «Сохранить».

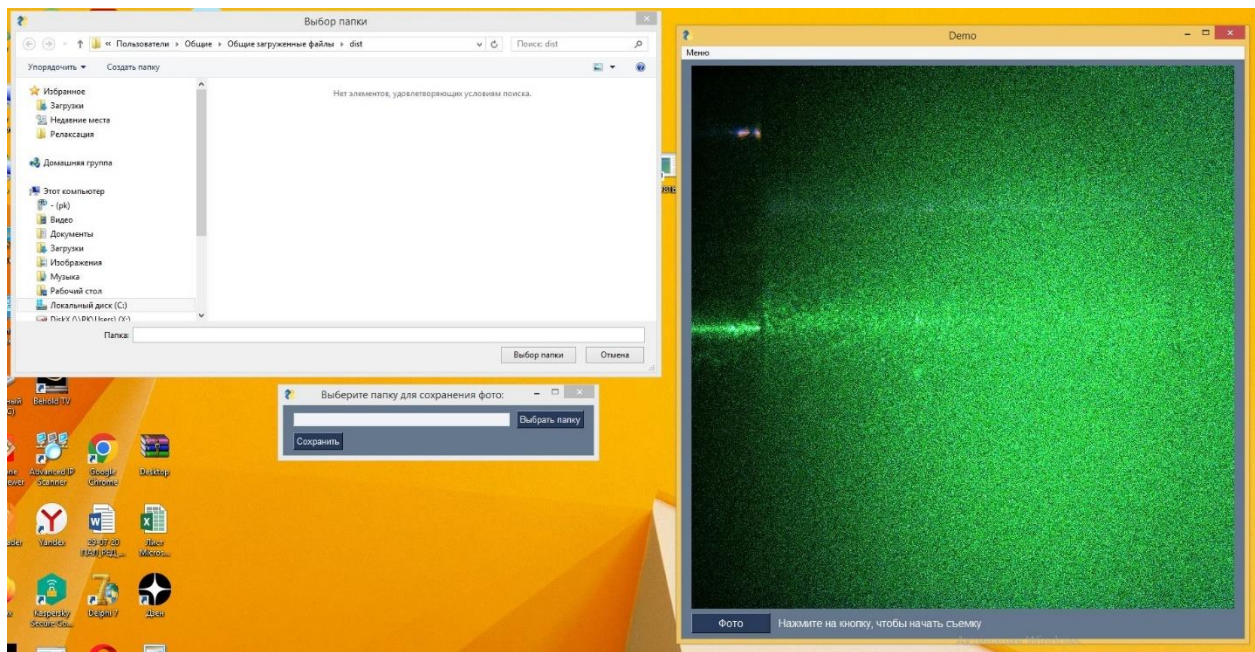


Рисунок 1.6 – Экранная форма выбора пути сохранения информации

После выбора всех настроек можно производить съемку. На рисунке 7 показан результат работы программы; фото сохранено по выбранному пути в формате .jpg а видео в формате .avi.

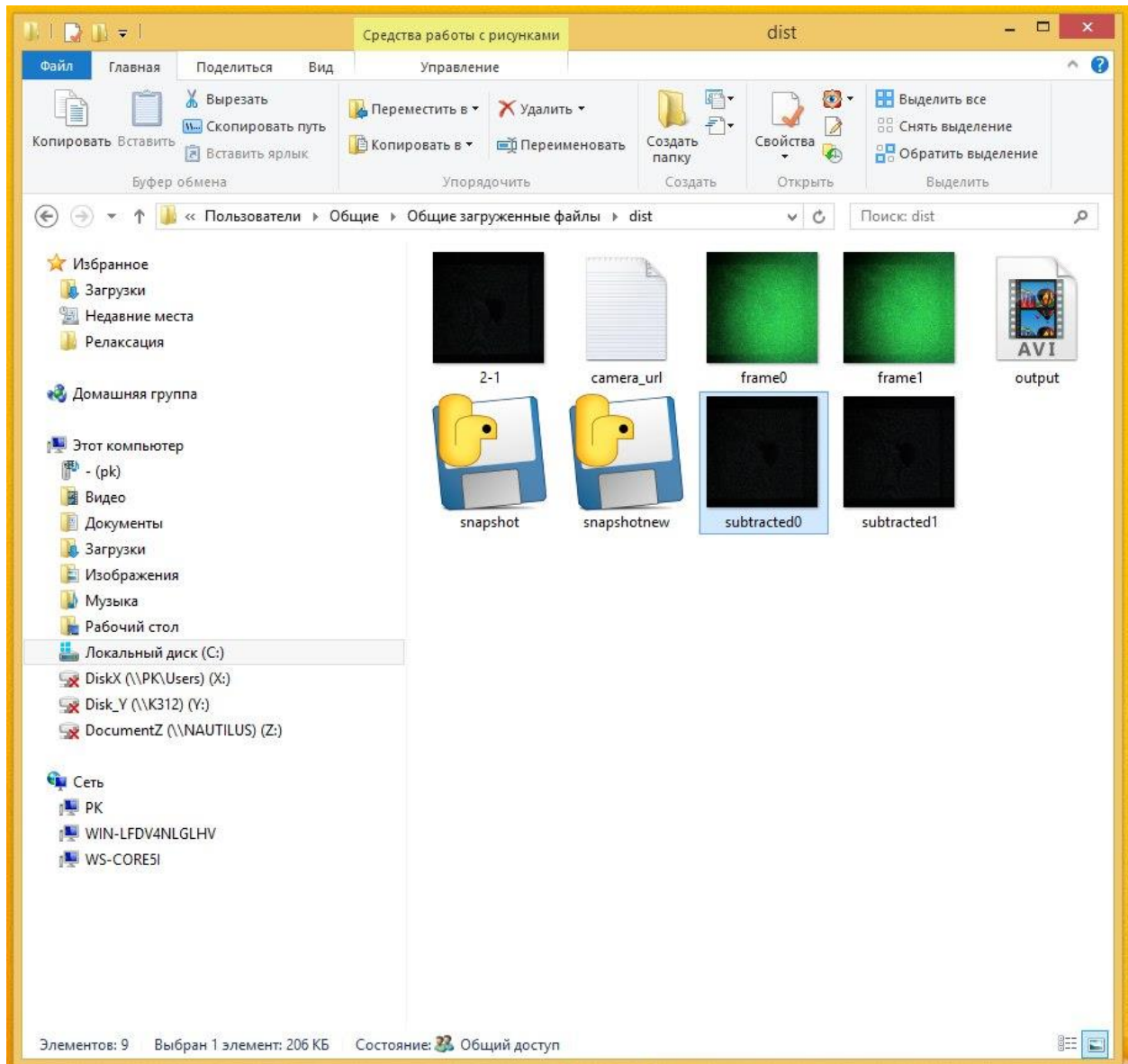


Рисунок 1.7 – Файлы, сохранённые в выбранной папке

На рисунке 1.8 продемонстрирована экранная форма для вычитания и сложения изображений. Для выполнения данной функции необходимо в меню выбрать «Наложение фото», в открывшемся окне выбрать изображение нажав на кнопку «Выбрать фото», далее нажать на кнопку «Вычитание», результат в формате .jpg появится в выбранной ранее папке.

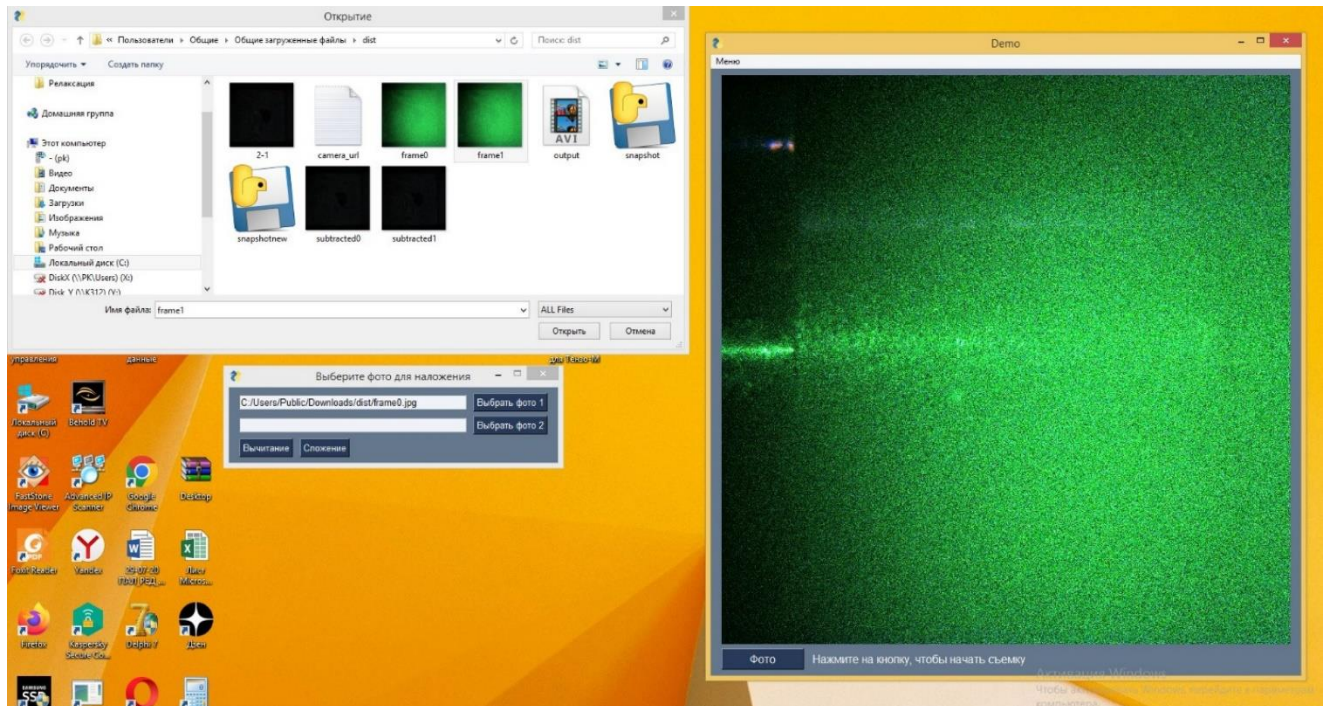


Рисунок 1.8 – Экранная форма для вычитания и сложения изображений.

На рисунке 1.9 представлен результат вычитания изображений. Получена интерферограмма, программа работает исправно.

За вычитание изображений отвечает функция `open_photo_window()`:

```
def open_photo_window():

    layout = [

        [sg.Input(enable_events=True, key='-IN-'), sg.FileBrowse('Выбрать фото 1')],

        [sg.Input(enable_events=True, key='-IN-'), sg.FileBrowse('Выбрать фото 2')],

        [sg.Button('Вычитание'), sg.Button('Сложение')]] //пользовательский интерфейс

    window = sg.Window("Выберите фото для наложения", layout, modal=True)

    counter1 = 0

    counter2 = 0

    while True:

        event, values = window.read()

        if event == "Exit" or event == sg.WIN_CLOSED:
```

```
break
```

```
elif event == 'Вычитание':
```

```
    img1 = cv2.imread(values['Выбрать фото 1'])
```

```
    img2 = cv2.imread(values['Выбрать фото 2'])
```

```
    subtracted = cv2.subtract(img1,img2)
```

```
    cv2.imshow("subtracted",subtracted) //вывод результата
```

```
    name = 'subtracted' + str(counter1) + '.jpg'
```

```
    cv2.imwrite(name, subtracted) //сохранение результата
```

```
    counter1 += 1
```

```
    cv2.waitKey(0)
```

```
    cv2.destroyAllWindows()
```

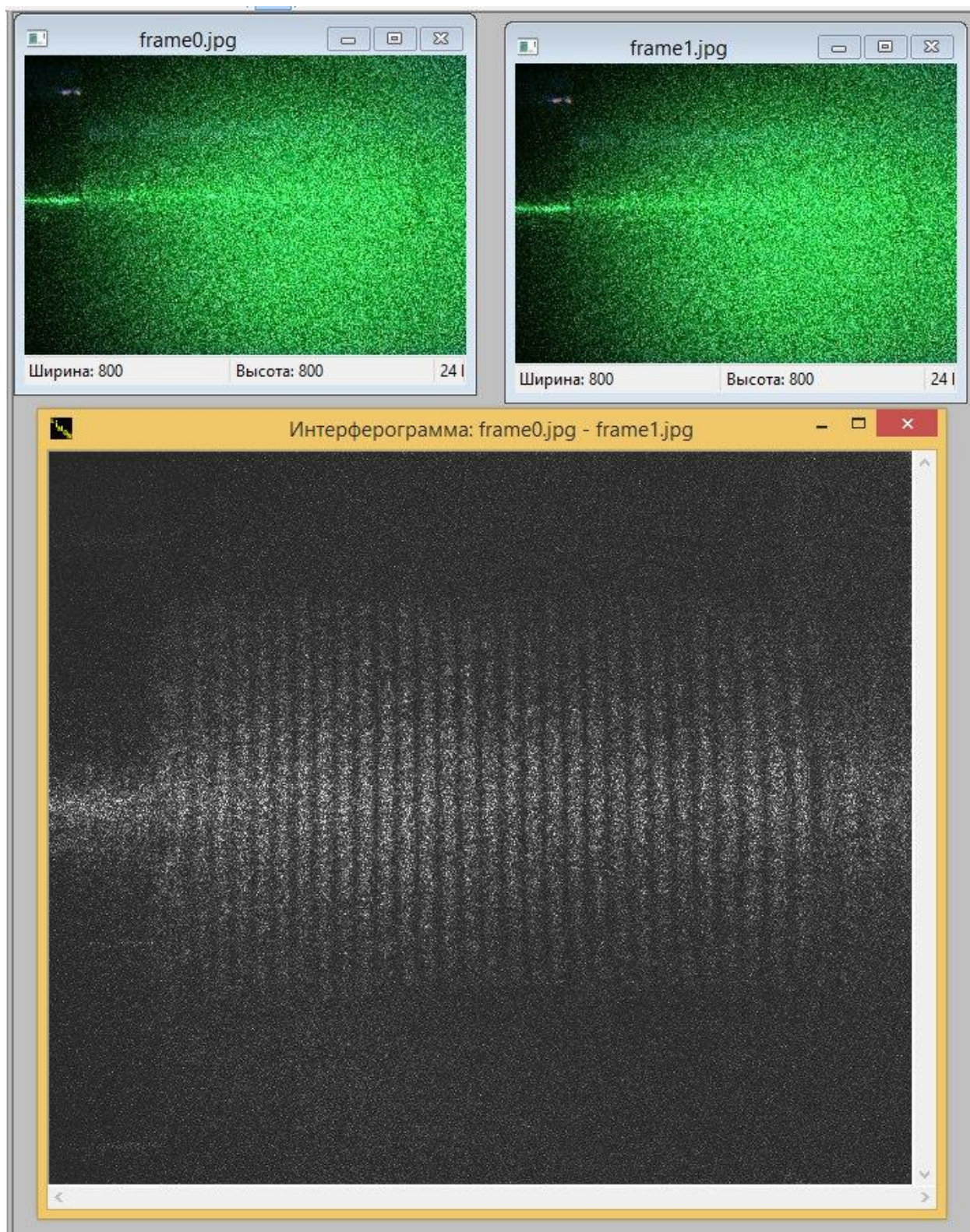



Рисунок 1.9 – Результат работы программы.

В результате работы программы получена спекл-интерферограмма в виде системы чередующихся светлых и темных полос, отражающая поле микроперемещений боковой поверхности сжимаемого параллелепипеда. Подробности испытаний изложены в главе 2.

ГЛАВА 2. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ТРЕХМЕРНОГО ОБРАЗЦА НА СЖАТИЕ

Электронная спекл-интерферометрия (ESPI)

Распространенная проблема в экспериментальной механике заключается в том, что при исследовании образца, например, на испытательной машине на растяжение, образец часто одновременно подвергается воздействию движений твердого тела при возникновении небольших деформаций. Об этих двух движениях, движении твердого тела и деформации, часто говорят как о полях смещения. Искомое поле деформации часто находится в диапазоне микрометров, в то время как движения твердого тела часто имеют размер миллиметра или сантиметра. Поэтому разрешение поля деформации часто является проблемой, поскольку оно заглушается большим движением объекта. Поле смещения можно измерить с помощью таких методов, как корреляция спеклов, но результаты могут быть недостаточно точными для определения поля деформации. Однако интерферометрические методы могут измерять поле деформации, хотя движение твердого тела приводит к исчезновению полос.

Электронная спекл-интерферометрия (ESPI) — это оптический метод, который позволяет проводить интерферометрические измерения поверхностных смещений практически на любой поверхности и материале [10].

Бесконтактное и полномасштабное измерение позволяет рассчитать трехмерное распределение смещения и деформации/напряжения испытываемого объекта в ответ на механическую или тепловую нагрузку. ESPI успешно применяется во многих областях, включая автомобилестроение, аэрокосмическую промышленность, электронику и исследования материалов для изучения свойств материалов, механики разрушения, испытаний на усталость, неразрушающего контроля и динамического поведения различных компонентов.

Освещение шероховатой поверхности когерентным лазерным светом и последующая визуализация с помощью ПЗС-камеры создают статистические интерференционные картины, называемые спеклами.

Как и отпечатки пальцев, эти пятнышки присущи исследуемой поверхности. Наложение эталонного света, полученного от того же лазерного источника, на эти спеклы приводит к получению интерферограммы.

При нагружении испытываемого объекта, например механическим способом, и деформации поверхности спекл-интерферограмма также изменяется. Сравнение интерферограммы поверхности до и после нагружения приведет к появлению полосы, которая показывает смещение поверхности во время нагружения в виде контурных линий деформации.

Деформация внутри объекта из-за механической или тепловой нагрузки рассчитывается из трехмерного поля смещения. Поэтому для неплоских объектов также измеряется контур. При известных параметрах материала (модуль Юнга, коэффициент Пуассона) соответствующие компоненты напряжения в области линейной упругости рассчитываются из компонентов деформации.

Современный метод диагностики стадий деформации должен быть неразрушающим, быстрым и полноформатным методом. Наиболее подходящая для этого электронная спекл-интерферометрия используется в режиме вычитания для формирования интерференционной картины, представляющей дифференциальное смещение. Темные полосы в узоре полос показывают линии уровня дифференциального поля смещения. Интерферометр непрерывно формирует такие полосы.

Изменение картины полос по мере развития деформации интерпретируется на основе упругой теории деформации и разрушения. Основанная на фундаментальном принципе физики, эта теория описывает все стадии деформации и разрушения на одной и той же теоретической основе. Здесь нет необходимости использовать феноменологию или эмпирическую формулировку явления. Переход от одной стадии к другой, например, от упругой к пластической или от пластической к трещиноватой, данной деформации диагностируется на основании особенностей картин интерференционных полос и теоретико-полевой интерпретации признаков. Переход от упругой к пластической стадии характеризуется генерацией сдвиговой неустойчивости, которая запускает инициирование крупномасштабной волны вращения [19]. Переход от стадии пластичности к стадии разрушения характеризуется неподвижностью волны вращения, вызывающей образование несплошностей материала.

Основы (ESPI)

Спеклы — это светлые и темные пятна, которые появляются на изображении диффузно рассеивающей поверхности при освещении лазерным светом. Это явление возникает из-за того, что волны лазерного излучения, рассеянные различными элементами поверхности, накладываются друг на друга со случайным фазовым соотношением в пространстве [11].

Спеклы первоначально рассматривались как дополнительный, нежелательный побочный эффект лазерного излучения, и значительные усилия были направлены на поиск методов уменьшения этого шума. Затем научное сообщество обратило свое внимание на использование спекл-эффекта. Это привело к развитию новой ветви оптических методов, называемой спекл-метрологией, которая теперь прочно утвердилась в неразрушающем контроле и контроле.

Рассмотрим ESPI как форму голографии изображения (которая представляет собой просто записанную голограмму объекта, а не самого объекта) с линейным опорным лучом. ПЗС-камера заменяет фотопластину в качестве записывающего носителя, а электронная обработка выполняет ее реконструкцию.

Существует два типа принципиально разных спекл-структур:

1. Фотографические спекл-структуры содержат информацию только об амплитуде световой волны. Картины получают при освещении диффузно рассеивающей поверхности объекта когерентным светом и регистрации полученного рассеянного волнового фронта на фотоэмульсии.
2. Голографические спекл-структуры содержат информацию как об амплитуде, так и о фазе волны. Картины получают при регистрации фронта рассеянной волны, исходящей от диффузной поверхности, одновременно с эталонным волновым фронтом на фотоэмульсии.

Основным принципом ESPI является запись голографической последовательности спекл-структур на фотодатчик телекамеры. Это основное преимущество, отличающее ESPI от голографии. Шаг записи идентичен шагу голографии изображения. Однако, поскольку ПЗС-матрица имеет более низкое разрешение, чем голографические пленки, ПЗС-матрица должна разрешать детали голографической спекл-структуры (например, спеклы) [12].

Изображение с ПЗС-камеры преобразуется в соответствующий видеосигнал. Этот видеосигнал обрабатывается электронным способом через промежуточный носитель записи (обычно устройство захвата кадров), так что вариации текстуры спекл-структуры преобразуются в вариации яркости. Спекл-интерферограмма генерируется арифметически путем вычитания двух оцифрованных спекл-структур.

На практике распределение интенсивности в плоскости детектора сохраняется с объектом в его эталонном состоянии. Затем объект деформируется и сохраняется второй кадр. Затем два кадра вычитаются, и на мониторе отображаются интерактивные полосы корреляции (Рисунок 2.1).

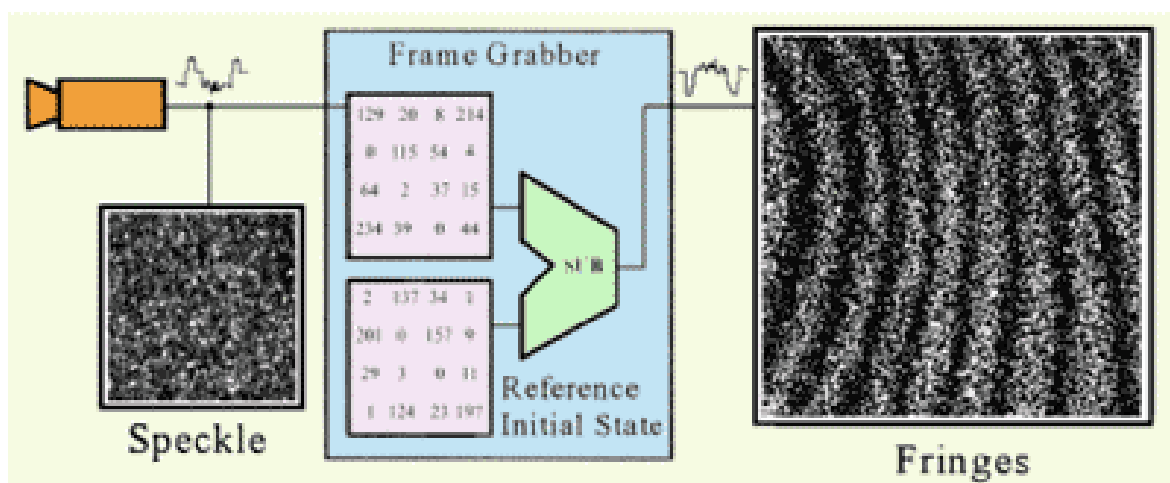


Рисунок 2.1 – Схема измерения ESPI, показывающая, как можно использовать монитор для отображения вычитаемых и корреляционных полос.

Полученные полосы внешне похожи на обычные голографические полосы, но с более низким качеством изображения из-за гораздо более явного спекл-шума. По этой причине полосы ESPI обычно обрабатываются цифровым способом для удаления шума и повышения контрастности.

Теоретическая модель

В качестве теоретической модели экспериментального образца рассмотрим малые деформации цилиндрического бруса из изотропного упругого материала, сжимаемого вдоль оси X с помощью заданной системы массовых или по-верхностных сил (Рисунок 2.2) [13].

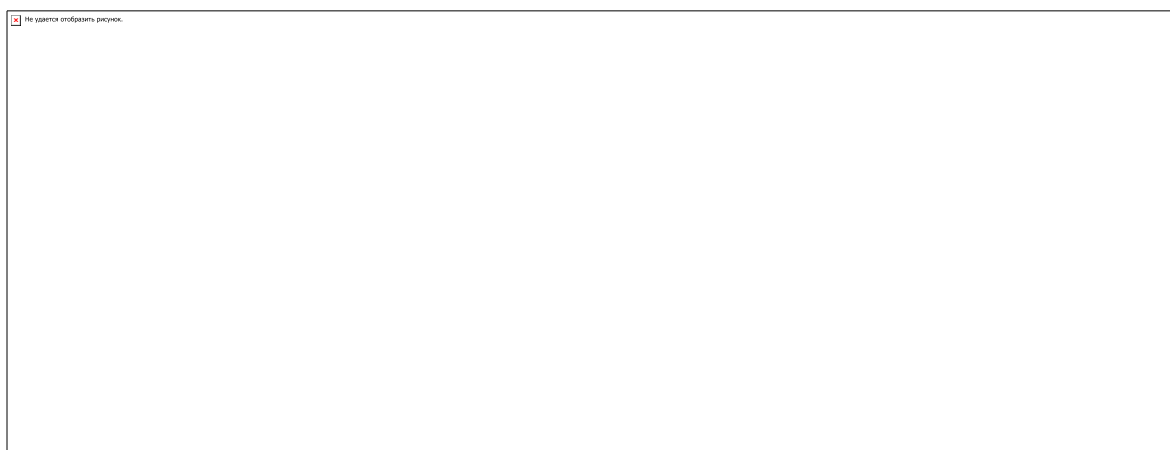


Рисунок 2.2 – Простое сжатие бруса

Считается, что боковые грани бруса C, C1, D и D1 свободны от нагрузок: на гранях C и C1 $\sigma_{21}=\sigma_{22}=\sigma_{23}=0$, на гранях D и D1 $\sigma_{31}=\sigma_{32}=\sigma_{33}=0$, где σ_{jk} ($j, k=1,2,3$) – компоненты напряжений, действующих на этих гранях.

В случае, когда брус находится в равновесии, равнодействующие внешних поверхностных сил на торцах А и В равны по величине. Обозначим величину этих равнодействующих через F . Рассмотрим следующий случай распределения поверхностных сил по торцам А и В: на грани А $p_n = \sigma_{11}(A)$, $\sigma_{12} = \sigma_{13} = 0$, на грани В $p_n = -\sigma_{11}(A)$, $\sigma_{12} = \sigma_{13} = 0$.

$$\sigma_{11}(B) = \sigma_{11}(A) = \frac{F}{S} = \text{const}, \quad (1)$$

где S - площадь поперечного сечения бруса.

Уравнение импульса в рассматриваемом случае сводятся к трем уравнениям равновесия, которым должны удовлетворять шесть компонент тензора напряжений внутри бруса:

$$\nabla_j \sigma^{ij} = 0 \quad (2)$$

При таком сочетании граничных условий уравнениям равновесия внутри бруса удовлетворяют значения:

$$\sigma_{11} = \frac{F}{S}, \quad (3)$$

$$\sigma_{12} = \sigma_{13} = \sigma_{22} = \sigma_{23} = \sigma_{33} = 0.$$

Воспользуемся законом Гука, подставив в него выписанные напряжения, и получим:

$$\varepsilon_{11} = \frac{F}{ES}, \quad \varepsilon_{22} = -\frac{\nu F}{ES}, \quad \varepsilon_{33} = -\frac{\nu F}{ES}, \quad \varepsilon_{12} = \varepsilon_{13} = \varepsilon_{23} = 0,$$

где ν – коэффициент Пуассона.

(4)

Брус сжимается силами, приложенными на его торцах А и В и направленными по оси x , но, как видно из формул, частицы бруса испытывают перемещения также и вдоль осей y и z :

$$U_1 = \frac{F}{ES}x, \quad U_2 = -\frac{\nu F}{ES}y, \quad U_3 = -\frac{\nu F}{ES}z. \quad (5)$$

Величина компоненты смещения U_1 вдоль оси x пропорциональна x , максимальна в сечении В и не зависит от y и z . Величины компонент смещения U_2 и U_3 по осям y и z пропорциональны y и z и не зависят от x , z и x , y соответственно. Как ясно из формул для компонент тензора деформаций, деформации вдоль оси x и осей y и z имеют разные знаки. Если $F > 0$, то ε_{11} положительно, т.е. брус испытывается сжатие вдоль оси x , а ε_{22} и ε_{33} отрицательны, т.е. брус испытывает сжатие в направлении осей y и z . Отношение компонент тензора деформаций [13]

$$\left| \frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} \right| = \left| \frac{\varepsilon_{33}}{\varepsilon_{11}} \right| \quad (6)$$

Равняется ν – значению коэффициента Пуассона.

Так как значения коэффициента Пуассона обычно лежат в пределах от 0 до 0,5, то отсюда можно сделать вывод, что перемещения в поперечных направлениях меньше, чем в продольном на величину коэффициента Пуассона.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка представлена на фотографии (рисунок 2.3). Она состоит из:

1. – образца,
2. – одночастотного лазера с узкой спектральной линией MSL-III-532,
3. – сетевой видеокамеры AV10115-DN,
4. – тензорезисторного датчика силы C2,
5. – датчика перемещений,
6. – лекальных тисков с точностью прилегания 5 мкм.

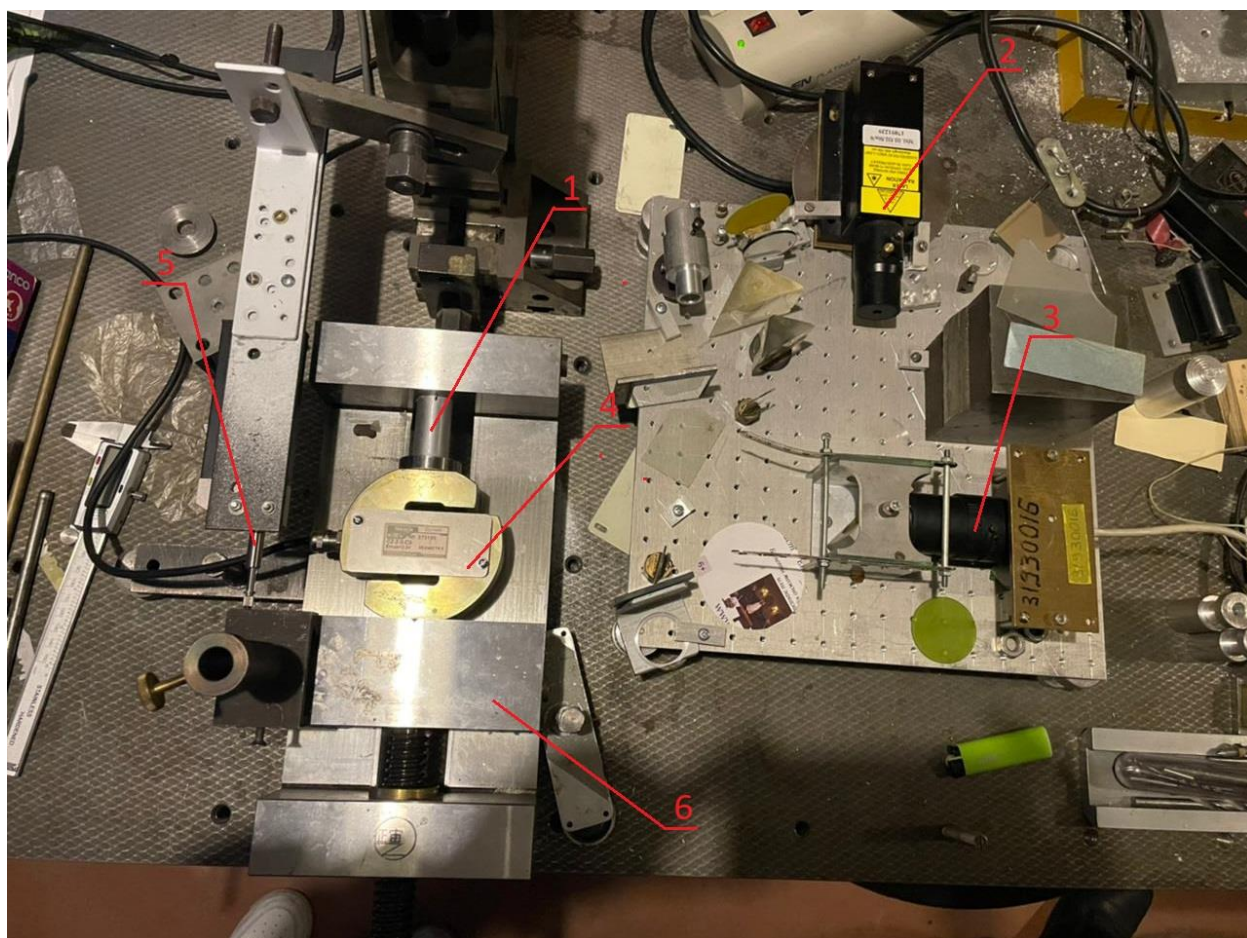


Рисунок 2.3 – Экспериментальная установка: 1 - образец, 2 – одночастотный лазер с узкой спектральной линией MSL-III-532, 3 – камера AV10115-DN, 4 – тензорезисторный датчик C2, 5 – датчик передвижений, 6 – лекальные тиски с точностью прилегания 5 мк .

На рисунке 2.4 отдельно представлен лазер MSL-III-532.

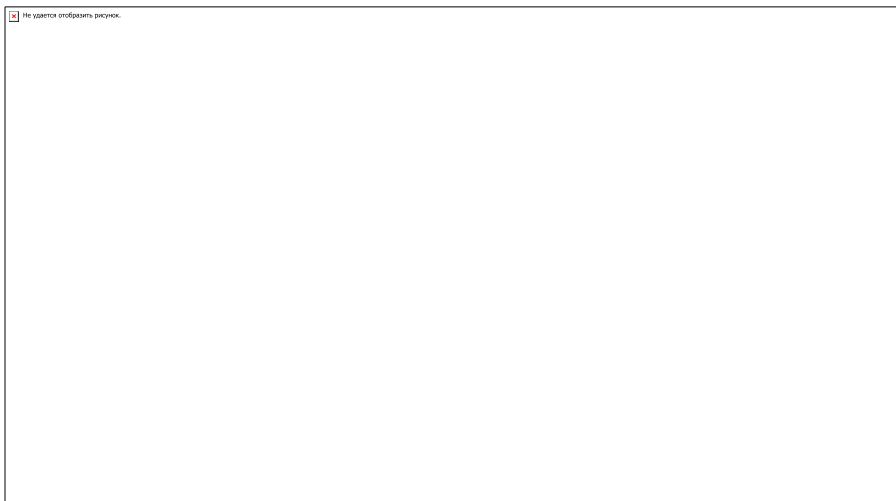


Рисунок 2.4 – MSL-III-532/1~50mW, зеленый одночастотный продольный лазер с длиной волны 532 нм [15].

Одночастотный лазер с узкой спектральной линией MSL-III-532. Твердотельный одномодовый зеленый лазер с продольной модой на длине волны 532 нм отличается сверхкомпактностью, длительным сроком службы, низкой стоимостью и простотой в эксплуатации, которые используются в секвенировании ДНК, проточной цитометрии, сортировке клеток, оптических приборах, спектральном анализе, интерференции, измерении, голография, бриллюэновское рассеяние, физический эксперимент и т. д. [15]

Характеристики лазера

- Длина волны излучения, нм 532 ± 2
- Рабочий режим Непрерывный (CW)
- Выходная оптическая мощность, мВт 20
- Нестабильность мощности (RMS, %) < 1
- Спектральная ширина линии, нм < 0.00001
- Амплитудные шумы (1 Гц – 20 МГц, RMS, %) < 0.5
- Длина когерентности, м > 50
- Расходимость пучка, мрад < 1.2
- Апертурный диаметр пучка, мм < 1.5
- Время выхода на режим, мин < 10
- Диапазон рабочих температур, °C $+15 \sim +35$
- Напряжение питания, В $90 \sim 265$
- Срок наработки на отказ, ч 10000
- Габаритные размеры излучателя, мм 140.5x73x46.2
- Габаритные размеры блока питания, мм 171x130x62.2

На рисунке 2.5 также отдельно представлена сетевая видеокамера AV10115-DN.

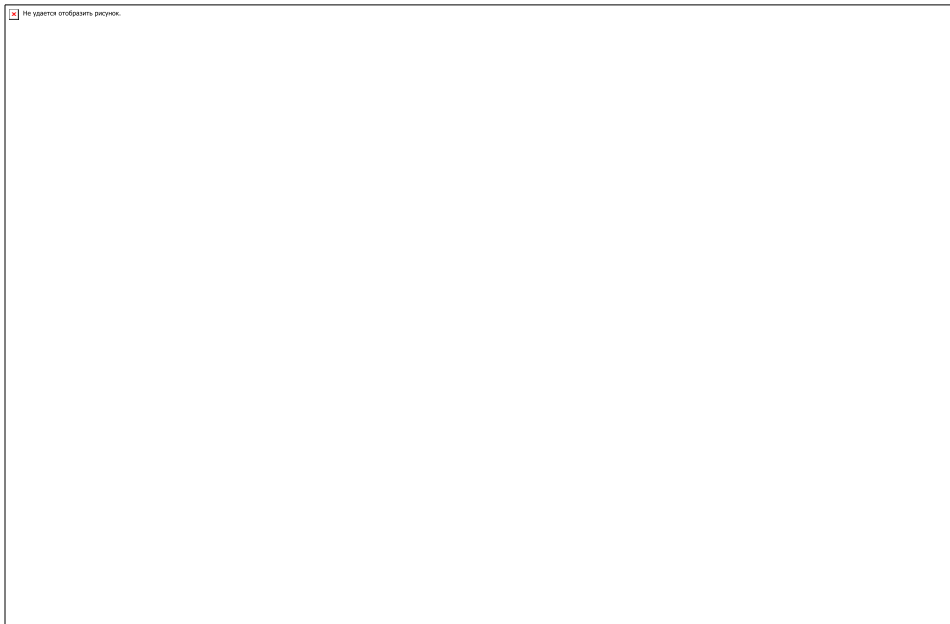


Рисунок 2.5 – Камера AV10115-DN [14].

Камера AV10115-DN позволяет передавать в режиме реального времени цифровое видео с высоким разрешением и большим количеством кадров, поддерживает формат HDTV. Разрешение изображения этой камеры превосходит разрешение изображения лучших аналоговых камер наблюдения в 33 раза (3648 X 2752) [14].

Данная модель камеры может работать с двумя видеоформатами: MJPEG и H.264. Также появилась функция Privacy Mask, позволяющая на снимаемой сцене выделять зоны, которые не видны при "живом" видео и в архиве.

Binning Mode - для улучшения работы камеры и уменьшения "шума" в условиях низкой освещенности применяется функция Binning Mode, действие которой заключается в объединении пикселей матрицы в группы по 4 пиксела для считывания. В результате получаются «укрупненные» пиксели, разрешение при этом уменьшается, и соотношение «сигнал-шум» улучшается за счет того, что шум в четырех объединяемых пикселах усредняется, а полезный сигнал — суммируется. Применение режима Binning Mode дает улучшение соотношения «сигнал-шум» в число раз, пропорциональное количеству объединяемых пикселей. Таким образом, при недостаточном освещении из 10-мегапиксельной камеры с частотой кадров порядка 7 в секунду получается 2,5-мегапиксельная камера, но с частотой кадров более 30 в секунду, чувствительностью 0.21 Lux@F 1.4 и с 4-кратным улучшением соотношения «сигнал-шум». Данную функцию можно активировать, в ПО AV100 [14].

Использование кодека H.264 позволяет уменьшить передаваемый поток до 15 раз по сравнению с форматом MJPEG (в зависимости от сцены), что позволяет использовать больше камер на объекте или увеличить время хранения архива без дополнительного наращивания серверных мощностей. При работе с кодеком H.264, реализованным аппаратно в камере, появилась возможность использовать получать до 8 независимых видеопотоков с камеры с различными разрешением, видеоформатом, количеством кадров.

AV10115-DN поддерживает питание как по сетевому кабелю Power-over-Ethernet (POE), так и от внешнего источника питания. Камера имеет полноценную прогрессивную развертку.

Параметры изображения

1. Матрица: 10-мегапиксельная CMOS
2. Размеры матрицы, в точках: 3648(H) X 2752(V)
3. Оптический формат: 1/2.3"
4. Шаг пикселей в матрице: 1.67 μm
5. Чувствительность: 0.02 Lux@F 1.4 в ночном режиме
6. Мозаичный RGB Bayer фильтр
7. Динамический диапазон: 57.2 Db
8. Максимальное отношение сигнал-шум: 40 Db
9. Кадров в сек. до: 7 fps @ 3648x2752
10. При низкой освещенности количество кадров уменьшается автоматически
11. Тип развертки: прогрессивная

Формат видеокомпрессии

1. Формат видео - H.264 (MPEG4, Part 10)
2. Формат Видео - Motion JPEG
3. 21 градация качества

Передача данных

1. Скорость передачи данных, до: 70Mbps
2. Протоколы передачи: TFTP, HTTP, RTSP, RTP/TCP, RTP/UDP
3. Сетевой интерфейс Ethernet: 100Base-T
4. Возможность установки фиксированной скорости передачи данных (h.264) от 100 кб до 10 Мбит

На рисунке 2.6 показан S-образный тензодатчик растяжения/сжатия С2 Тензом.

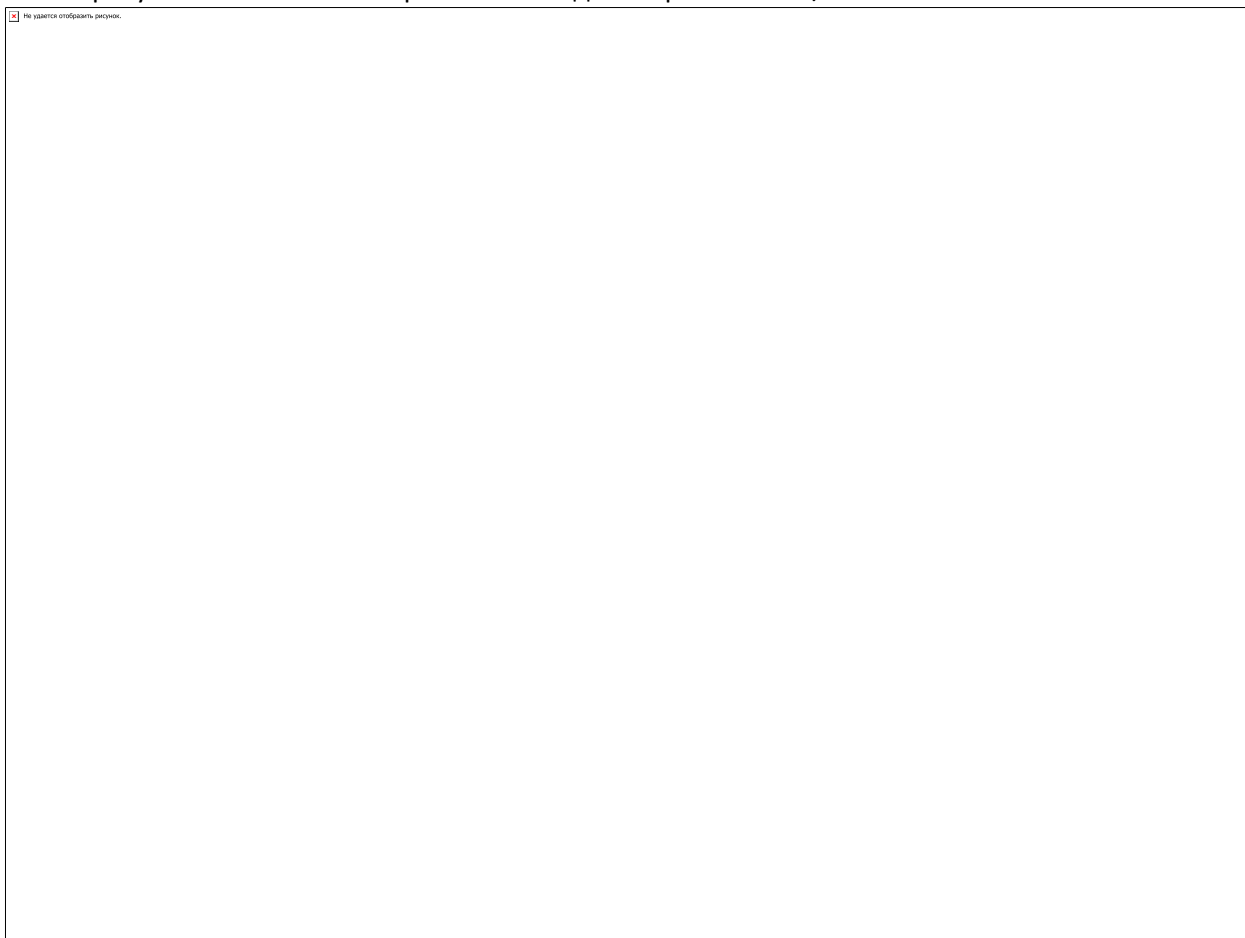


Рисунок 2.6 – S-образный тензодатчик растяжения/сжатия С2 Тензом [16].

Параметры датчика:

- | | | | |
|----|------------------------------------|-------------|----------------------------|
| 1. | Наибольший предел измерения (НПИ) | (т) | 0.5, 1, 2, 3, 5, 7, 10, 20 |
| 2. | Чувствительность | от 1 кг | |
| 3. | Класс точности по ГОСТ 8.631-2013 | С1, С3 | |
| 4. | Число поверочных интервалов | 1000 / 3000 | |
| 5. | Рабочий коэффициент передачи (РКП) | (мВ/В) | 2 ± 0,005; |
| | | 1. | 1 ± 0,0025 (10 т); |
| | | 2. | 1,5 ± 0,0040 (20 т)/ |
| | | 3. | ± 0,002; |
| | | 4. | 1 ± 0,0010 (10 т); |

			5.	$1,5 \pm 0,0015$ (20 т)
6.	Начальный коэффициент передачи (НКП)	% от РКП	$< 3 / < 3$	
7.	Комбинированная погрешность	% от РКП	$\leq \pm 0,040 / \leq \pm 0,020$	
8.	Ползучесть (30 мин.)	% от РКП	$\leq \pm 0,049 / \leq \pm 0,025$	
9.	Изменение НКП от температуры	% от РКП/°C	$\leq \pm 0,0028 / \leq \pm 0,0014$	
10.	Изменение РКП от температуры	% от РКП/°C	$\leq \pm 0,0022 / \leq \pm 0,0011$	
11.	Наибольшее напряжение питания постоянного тока	(В)	12	
12.	Сопротивление входное	(Ом)	380 ± 15	
13.	Сопротивление выходное	(Ом)	350 ± 1	
14.	Сопротивление изоляции	(Гом)	≥ 5	
15.	Диапазон термокомпенсации	(°C)	-10... +40	
16.	Рабочий диапазон температур	(°C)	-20... +40	
17.	Диапазон температур хранения	(°C)	-30... +50	
18.	Степень защиты по ГОСТ 14254		IP65	
19.	Допустимая перегрузка в течение не более 1 часа	% от НПИ	25	
20.	Разрушающая нагрузка	% от НПИ	300	
21.	Материал датчика	Легированная сталь		

На рисунке 2.7 показан Датчик линейных перемещений ЛИР-14.

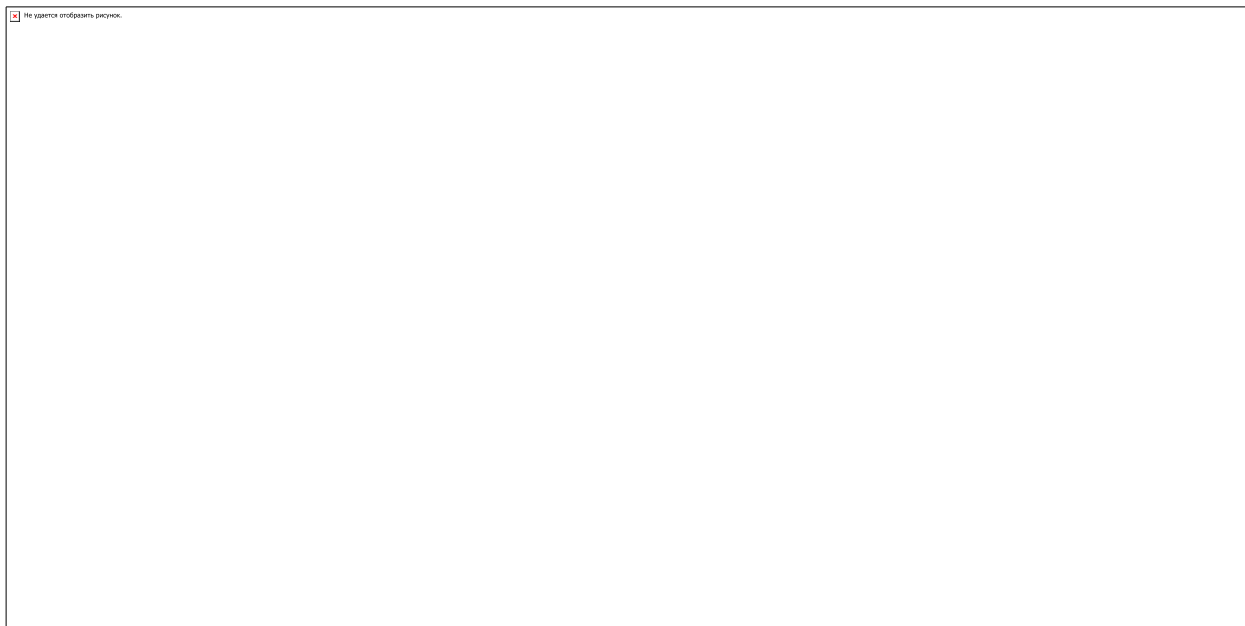


Рисунок 2.7 – Датчик линейных перемещений ЛИР-14 [17].

Оптоэлектронный датчик перемещений с измерительным штоком. Конструктивно представляет собой подпружиненную линейную направляющую со стеклянной растровой шкалой, с которой жестко связан шток с корундовым наконечником. Применяется как правило в составе стендового и испытательного оборудования для измерения или контроля размеров и отклонений от заданной геометрической формы детали, а также взаимного расположения поверхностей [17].

Параметры датчика:

1. Носитель - Стеклянная растровая шкала с одной референтной меткой
2. Ход штока - 10 мм (С защитной манжетой) 20 мм
3. Референтные метки (*) - Отсутствуют ; Одна по середине длины измерения ; Свое положение РМ
4. Масса (без кабеля) - ~0,2 кг
5. Максимальное ускорение - 30 м/с²
6. Максимальная скорость перемещения - 60 м/мин
7. Измерительное усилие - $\leq 1,2$ Н
8. Интервал рабочих температур - +5...+50°C
9. Степень защиты от внешних воздействий - IP50 ; IP65 с манжетой
10. Вибрационное ускорение (от 55 до 2000 Гц) - ≤ 50 м/с²

11. Дискретность - 0,1 мкм
12. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности - 2-ой класс ($\pm 0,5$ мкм) ,3-ий класс (± 1 мкм)
13. Напряжение питания - +5 В

Схема электронного-спекл-интерферометра

Разрабатываемая программа в рамках данного диплома – это прибор для оперативного исследования напряженно-деформированных состояний упругих тел и конструкций. В нём реализованы идеи и методы, основанные на голографической интерферометрии, разработанные ранее для анализа остаточных напряжений. С помощью этого прибора обеспечивается визуальная регистрации полей малых упругих перемещений поверхности упругого тела, а также развития процесса деформации по наблюдаемой системе интерференционных полос и ее изменениям. Это позволяет решать задачи диагностики остаточных напряжений, другие научные и прикладные задачи: о местах приложения и величинах нагрузок, действующих на упругое тело по интерференционной картине перемещений, о напряжениях в тонких плёнках и связях их механических характеристик с напряжениями, о распределённых и локальных неоднородностях структуры тела, микротрещинах и внутренних расслоениях, об отслоениях покрытий и деформационных предпосылок их возникновения и так далее.

Измерительная система проектируется и изготавливается из доступных комплектующих: малогабаритной технической видеокамеры с объективом, лазера с блоком питания и видеоадаптера с функцией аналого-цифрового преобразования, нетребовательного к типу ЭВМ. При этом в отличие от тензометрирования, где измерения выполняются для отдельных точек, данная аппаратура регистрирует интерферометрические линии уровня перемещений значительных областей поверхности тела в окрестности возмущающего воздействия (места приложения силы, либо зондирующей лунки), что позволяет визуально определять главные направления тензоров деформаций и напряжений и делать качественные выводы о распределении напряжений ещё до подсчёта числовых значений соответствующих величин. Подобные возможности обеспечивают, в принципе, также и методы фотоупругости, но, в отличие от них, - лазерно-интерферометрический метод, реализованный в данной системе, - более точный, бесконтактный и несравненно менее трудоёмкий в расчёте на одно измерение.

На рисунке 2.8 представлена оптическая схема, используемого интерферометра (модернизированная схема интерферометра Майкельсона).

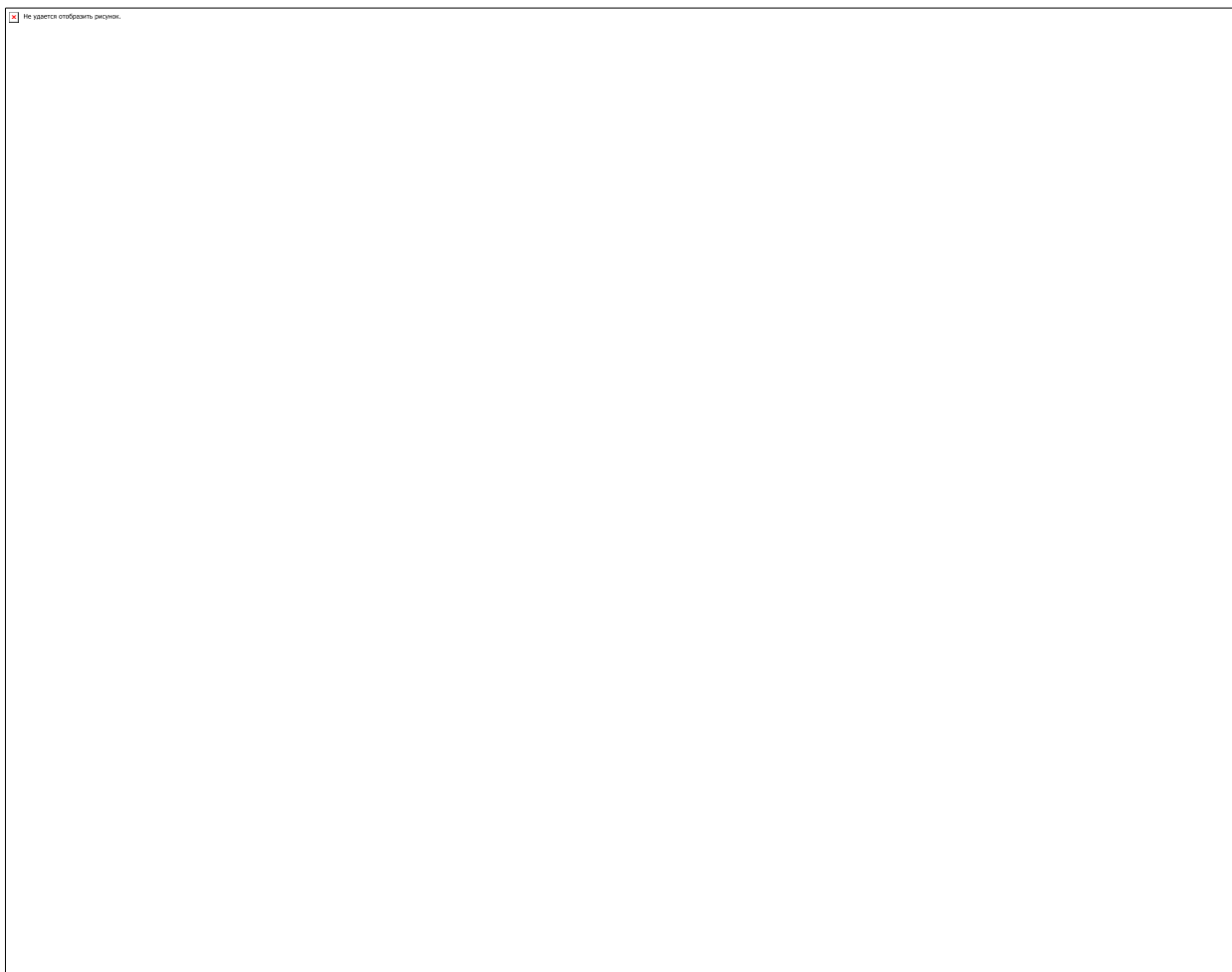


Рисунок 2.8 – Схема электронного-спекл-интерферометра: 1 – лазер, 2 – коллиматор, 3 – полупрозрачное делительное зеркало, 4 – неподвижное зеркало, 5 – видеокамера, 6 – поверхность объекта наблюдения

Луч лазера 1, проходя через стеклянную матовую пластину 2, равномерно освещает полупрозрачное зеркало 3, расположенное под углом 45 градусов к падающему лучу. Это зеркало делит падающий световой поток на проходящий (опорный луч) и отраженный (предметный луч), направляемый на поверхность объекта наблюдения 6. Опорный луч, отразившись от неподвижного зеркала 4, снова попадает на делительное зеркало 3, а затем – в видеокамеру 5. Предметный луч, отразившись от поверхности 6 и пройдя через делительное зеркало 3, также попадает в видеокамеру. Интерференция предметного и опорного лучей создаёт спекл-картину, которая регистрируется видеокамерой, передаётся в ЭВМ и запоминается как опорный кадр.

Происходящие после записи опорного кадра микроперемещения поверхности объекта наблюдения отображаются на непрерывно транслируемой в ЭВМ спекл-картине и могут быть сравнены с исходным состоянием, зафиксированным в опорном кадре. В результате покадрового вычитания матрицы исходной спекл-картины из матрицы текущего состояния в режиме реального времени образуется динамическая разностная спекл-интерферограмма; места поверхности объекта наблюдения, нормальные перемещения которых отсутствовали, либо были близки целому числу полуволн лазера выглядят на ней как тёмные полосы; напротив, места поверхности, перемещения

которых близки полуцелому числу полуволн лазера, выглядят как светлые полосы, перемещающиеся с течением времени.

Получение интерферограмм с помощью разработанного программного комплекса для испытаний трехмерных моделей на экспериментальном стенде.

Рассмотрим случай сжатия упругого цилиндра с длиной – 40 мм и диаметром – 20 мм. Правый край цилиндра – это неподвижная сторона, левый край – сторона, которая находится под давлением поршня. Теоретическая модель сжатия такого образца подобна описанной в параграфе 2.3 для параллелепипеда.

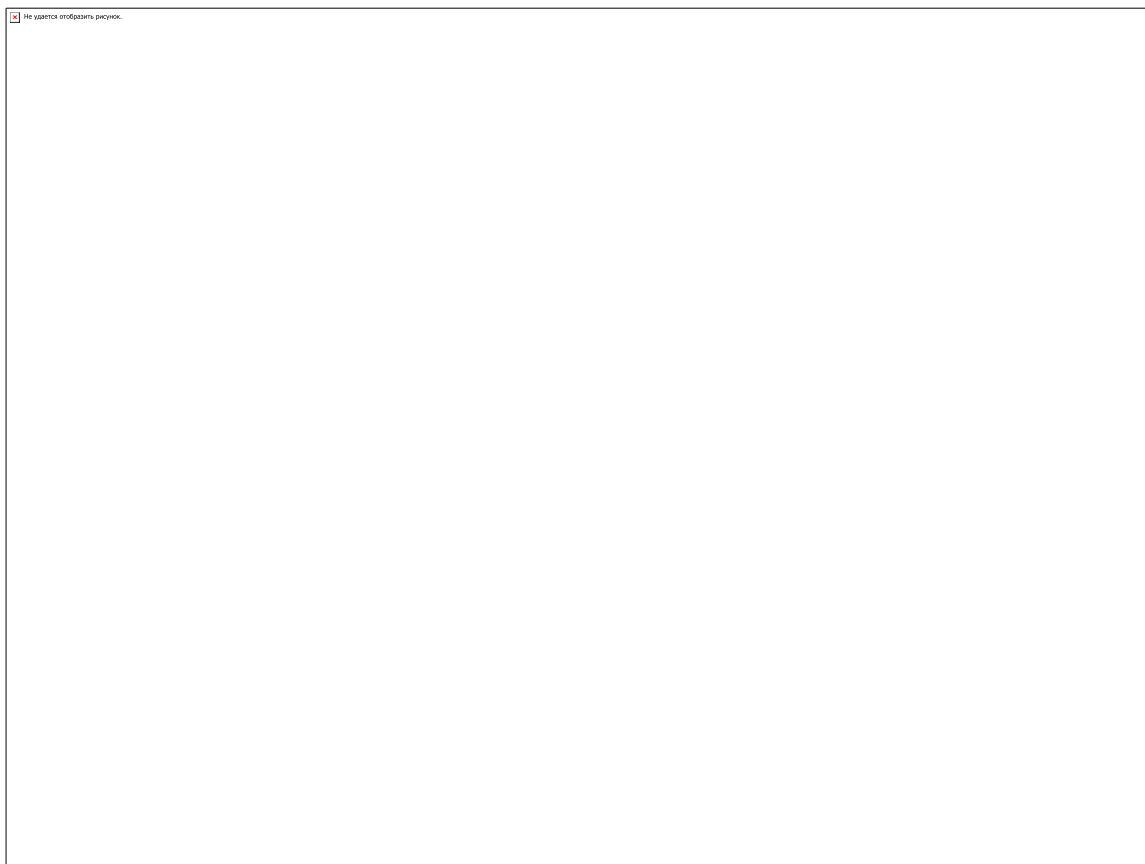


Рисунок 2.9 – Образец, цилиндр.

При получении первого снимка frame0 датчик перемещения показывал 2044,8 мкм, далее после ослабления тисков показания изменились – 2032,6 мкм, таким образом продольное смещение подвижной грани образца относительно неподвижной составило 12.2 мкм. В этом положении был произведен второй снимок frame1 боковой поверхности образца. После вычитания изображений (frame0 - frame1) была получена интерферограмма, показанная ниже на рисунке 2.10.

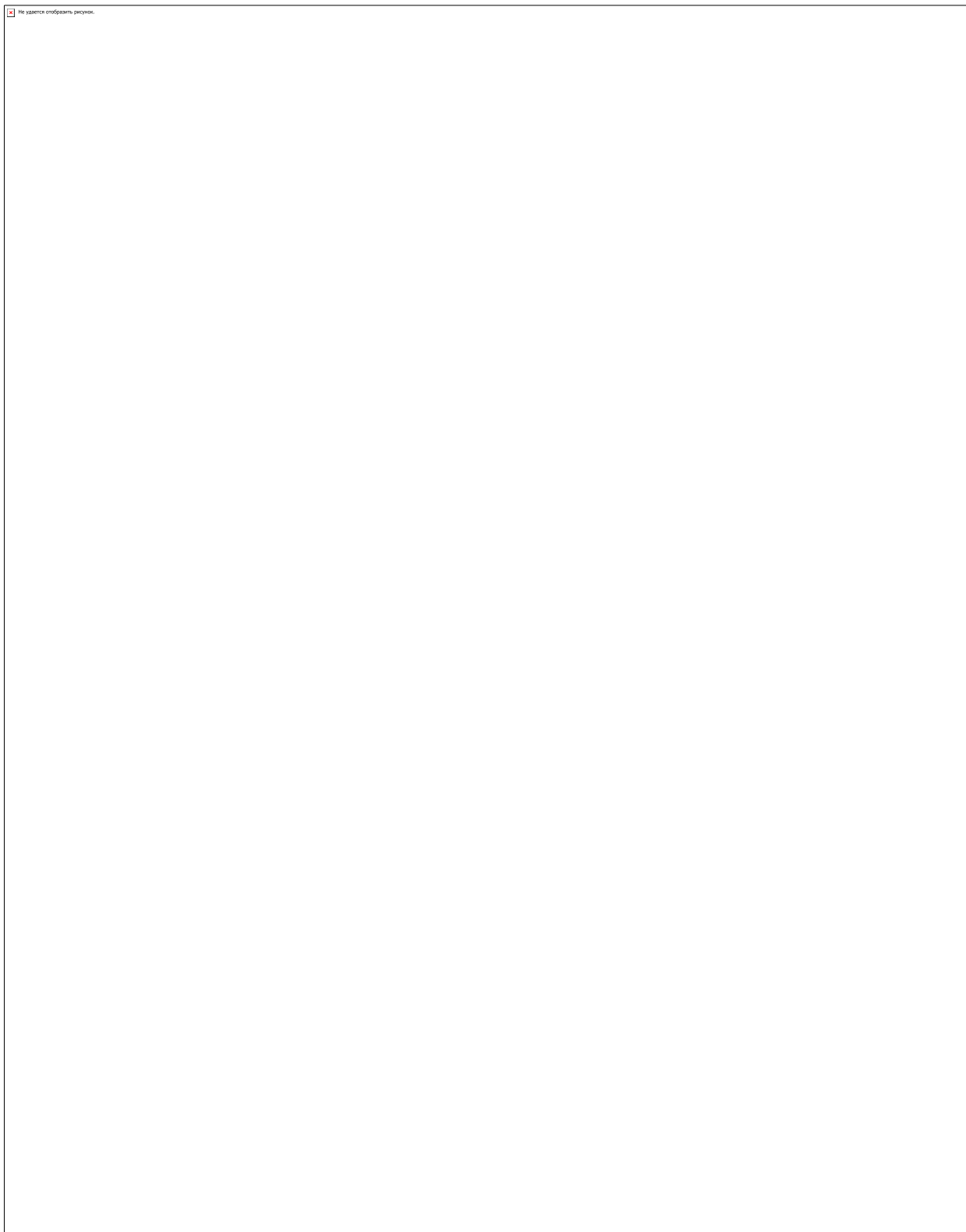


Рисунок 2.10 – Интерферограмма упругого цилиндра

По данной интерферограмме можно вычислить на сколько сместился левый край цилиндра. Т.к. полоса на интерферограмме соответствует перемещению боковой поверхности образца в

радиальном направлении на половину длины волны лазера (0.266 мкм), а на интерферограмме 32 темные полосы, можно сделать расчет $32 \cdot 0,266 = 8,5$ мкм, на данную величину сместился край цилиндра. Смещение соответствует действительности, т.к. общее перемещение 8,5 мкм не должно быть больше заданного 12,2 мкм. По всей видимости, кроме смещения соответствующего эффекту Пуассона, здесь зафиксирован также некоторый сдвиг подвижной грани образца относительно неподвижной.

Другой пример соответствует сжатию параллелепипедом со сквозным отверстием. В этом случае на интерферограмме была отчетливо зарегистрирована «розетка» интерфероционных полос. Такая интерферограмма отображает решение задачи Кирша в трехмерной постановке [28].



Рисунок 2.11 – Образец, параллелепипедом со сквозным отверстием.

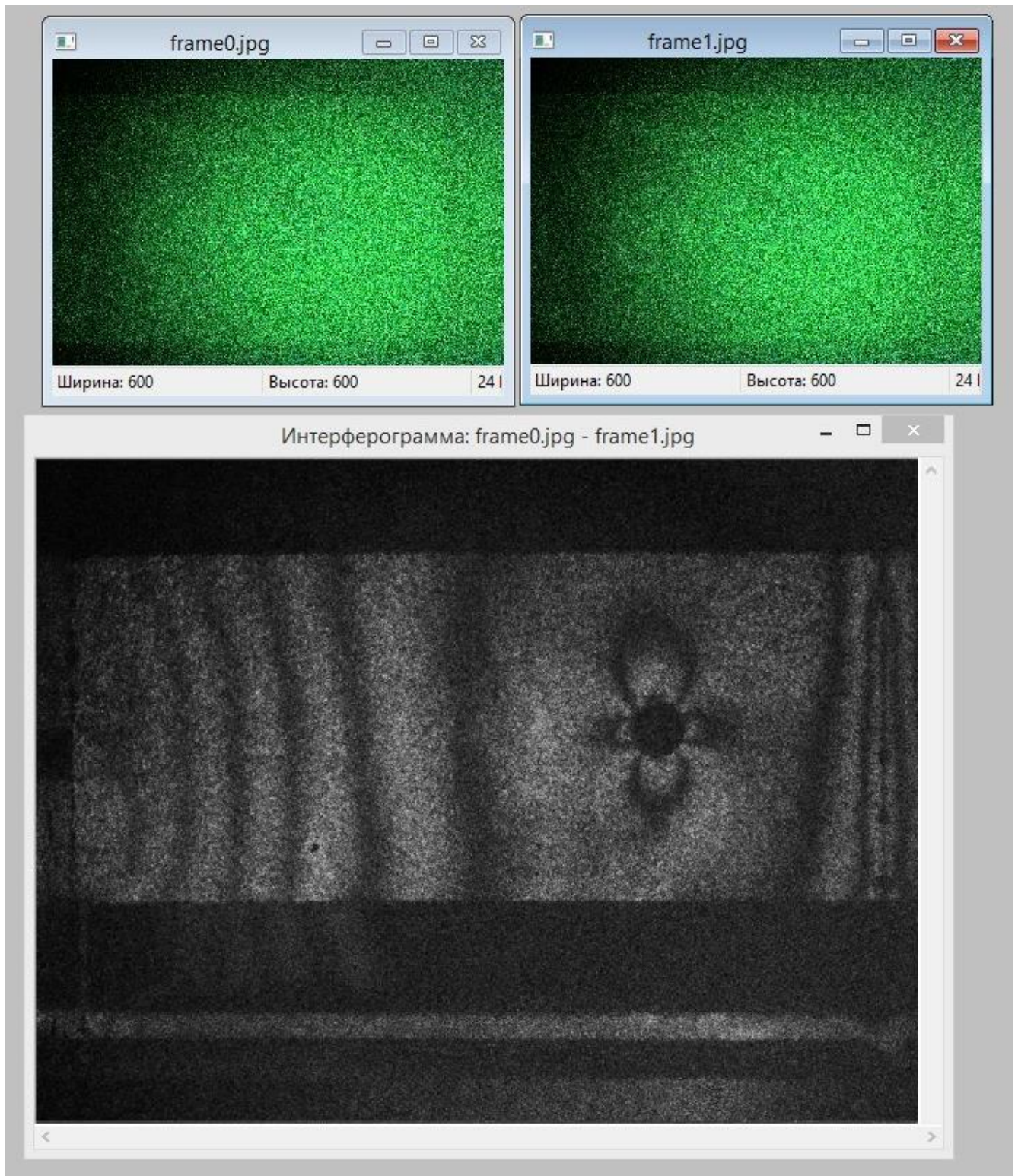


Рисунок 2.12 - интерферограмма, соответствующая решению задаче Кирша.

Программа позволяет наблюдать пошагово за развитием процесса. На рисунках представлена ситуация со сжатием гипсового параллелепипеда со сквозным отверстием на боковой стороне. Первоначально интерферограмма подобна той, которая представлена на рисунке 2.12 выше, при дальнейшем нагружении эта интерферограмма трансформируется в изображение на рисунке 2.14 а затем на рисунке 2.16. В результате гипсовый параллелепипед оказывается лопнувшим прямо по оси,

которая проходит по оси отверстия. Таким образом, рисунок 2.13 показывает начало образования трещины, а рисунок 2.15 ее развитие. Это выражается в постепенном отходе интерференционных полос от отверстия.

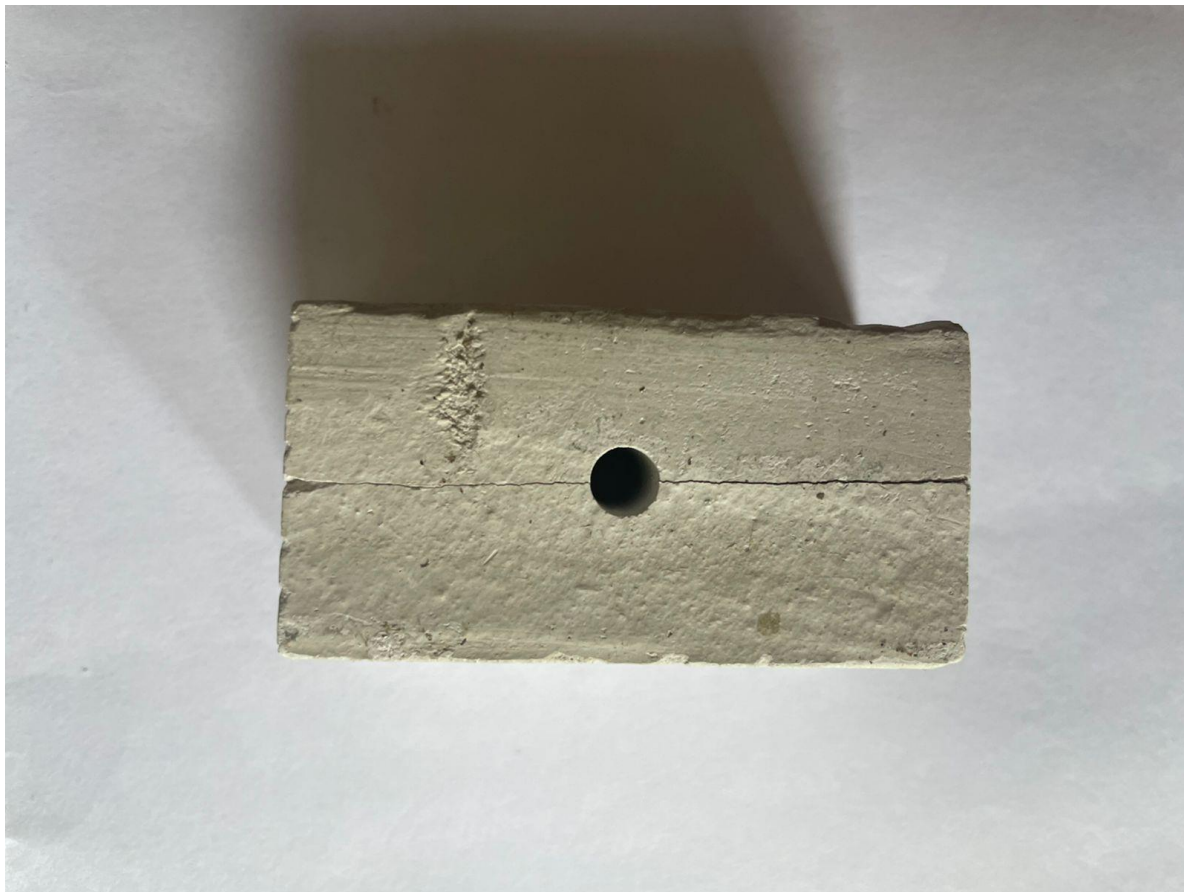


Рисунок 2.13 – Образец, гипсовый параллелепипед со сквозным отверстием.

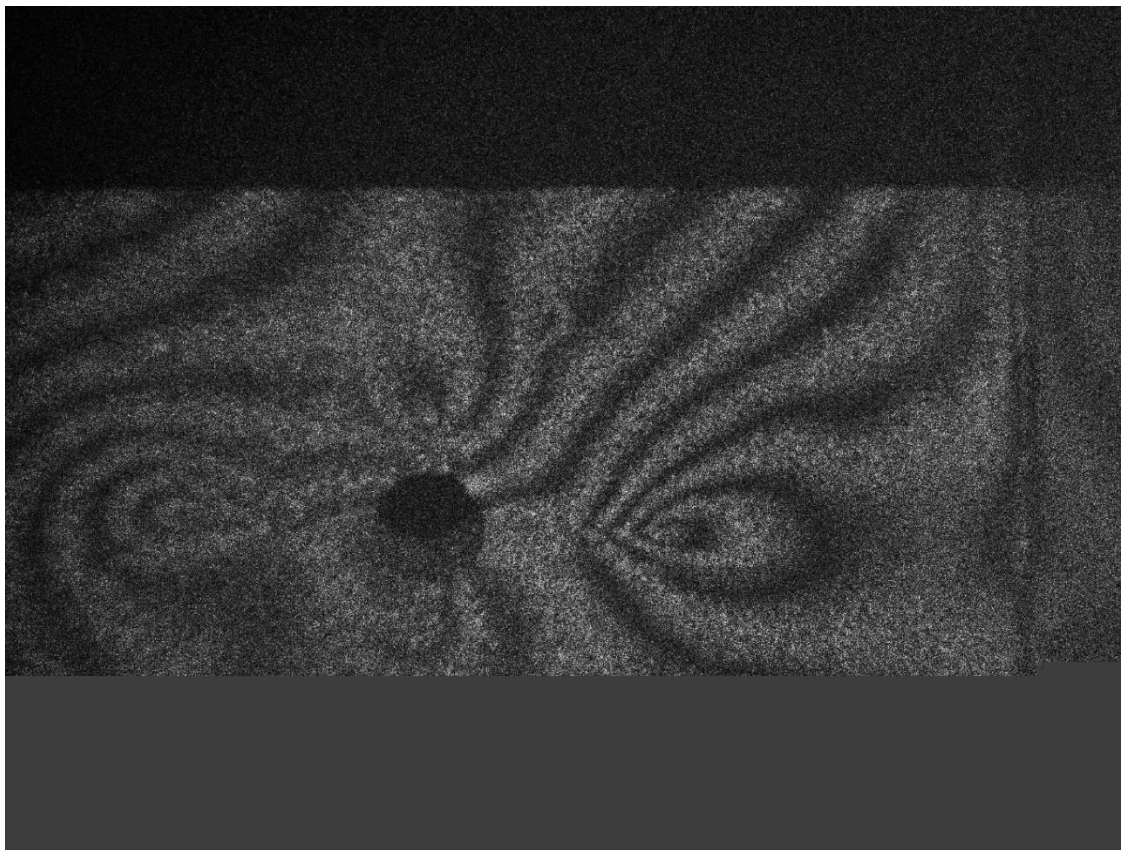


Рисунок 2.14 – Интерферограмма гипсовый параллелепипед со сквозным отверстием.

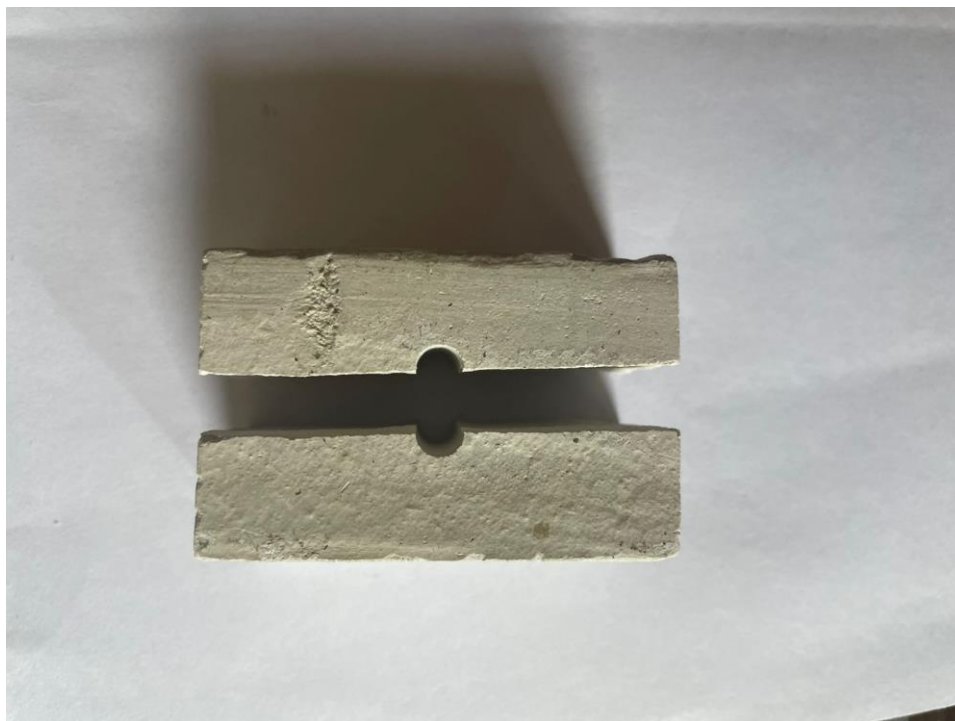


Рисунок 2.15 – Образец, параллелепипедом со сквозным отверстием с трещиной.

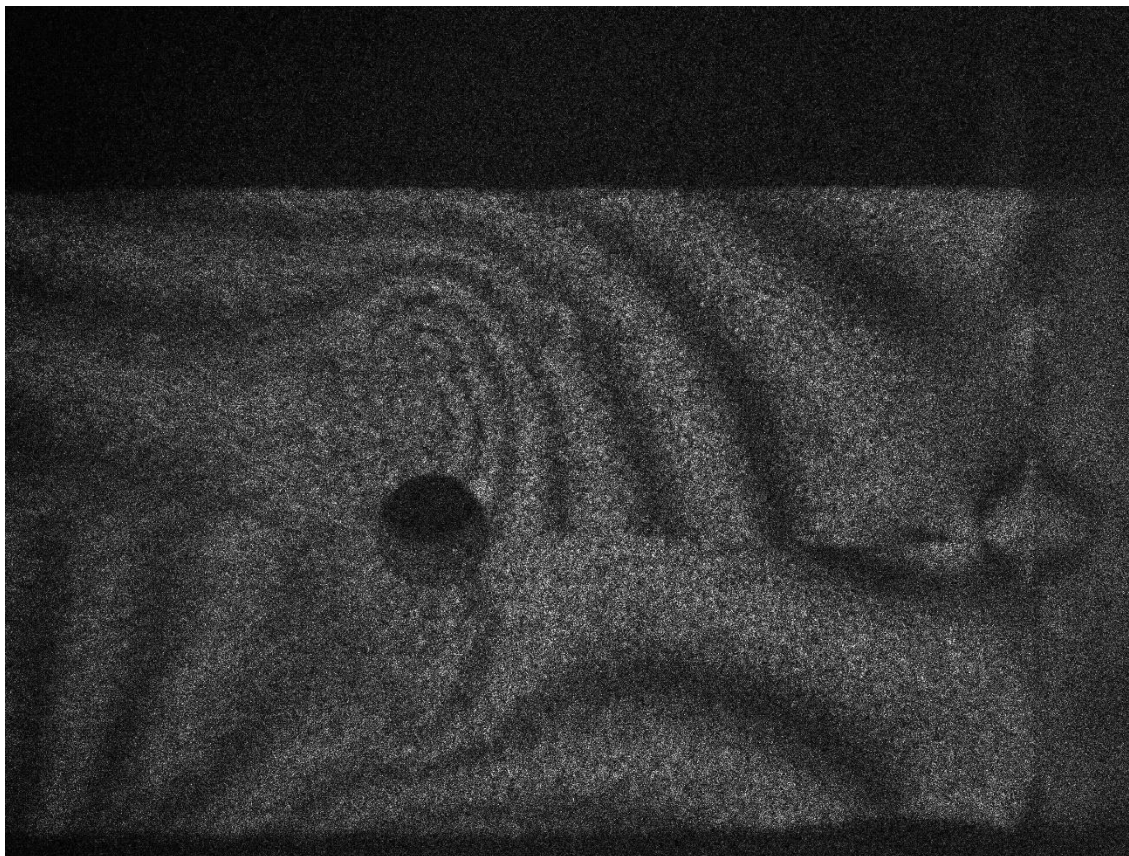


Рисунок 2.16 – Образец, параллелепипедом со сквозным отверстием.

Тем самым, по интерферограммам, полученным с помощью разработанной программы, можно идентифицировать трещину на ранней стадии ее развития и остановить дальнейшее нагружение.

Расчетная модель МКЭ

На Рисунке 21 изображен параллелепипед, красная грань имитирует твердую заделку, зеленая грань – давление со стороны поршня.

Свойства материала параллелепипеда: $E = 3,25 \text{ ГПа}$; $\nu = 0,27$.

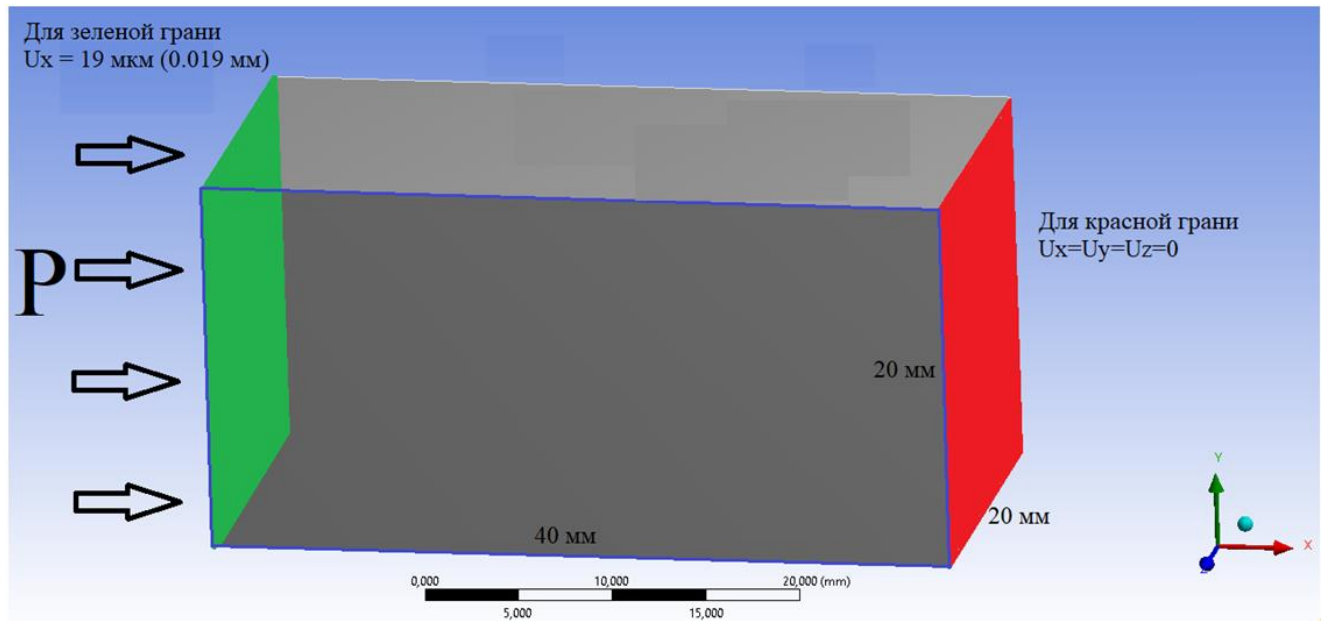


Рисунок 2.17 – параллелепипед, симуляция в ANSYS

После решения, для боковой грани (выделена синим контуром на Рисунке 2.17) были получены линии уровня перемещений U_z (Рисунок 2.18). Шаг линий уровня 0,266 мкм.

C: Copy of Static Structural
 Directional Deformation 5
 Type: Directional Deformation(Z Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System
 Maximum Over Time
 05.04.2022 20:42

0,0013173 Max
 0,0010513
 0,0007853
 0,0005193
 0,0002533
 0 Min



0,000 5,000 10,000 15,000 20,000 (mm)

Рисунок 2.18 – Линии уровня

На Рисунке 2.19 параллелепипед со сквозным отверстием (диаметр отверстия $d_{отв} = 5$ мм).

Центр отверстия отстоит от красной грани на расстоянии 16 мм.

Свойства материала параллелепипеда: $E = 3,25$ ГПа; $\nu = 0,27$.

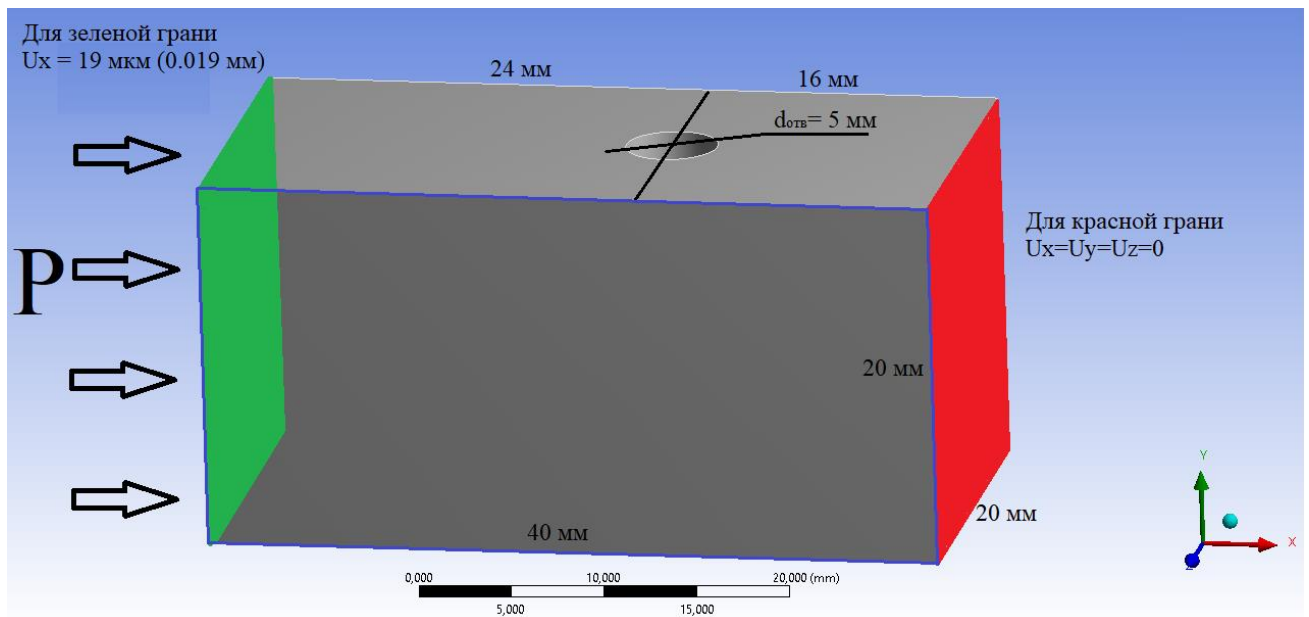


Рисунок 2.19 - параллелепипед со сквозным отверстием

После решения, для боковой грани (выделена синим контуром на Рисунке 2.19) были получены линии уровня перемещений U_z (Рисунок 2.20). Шаг линий уровня 0,266 мкм.

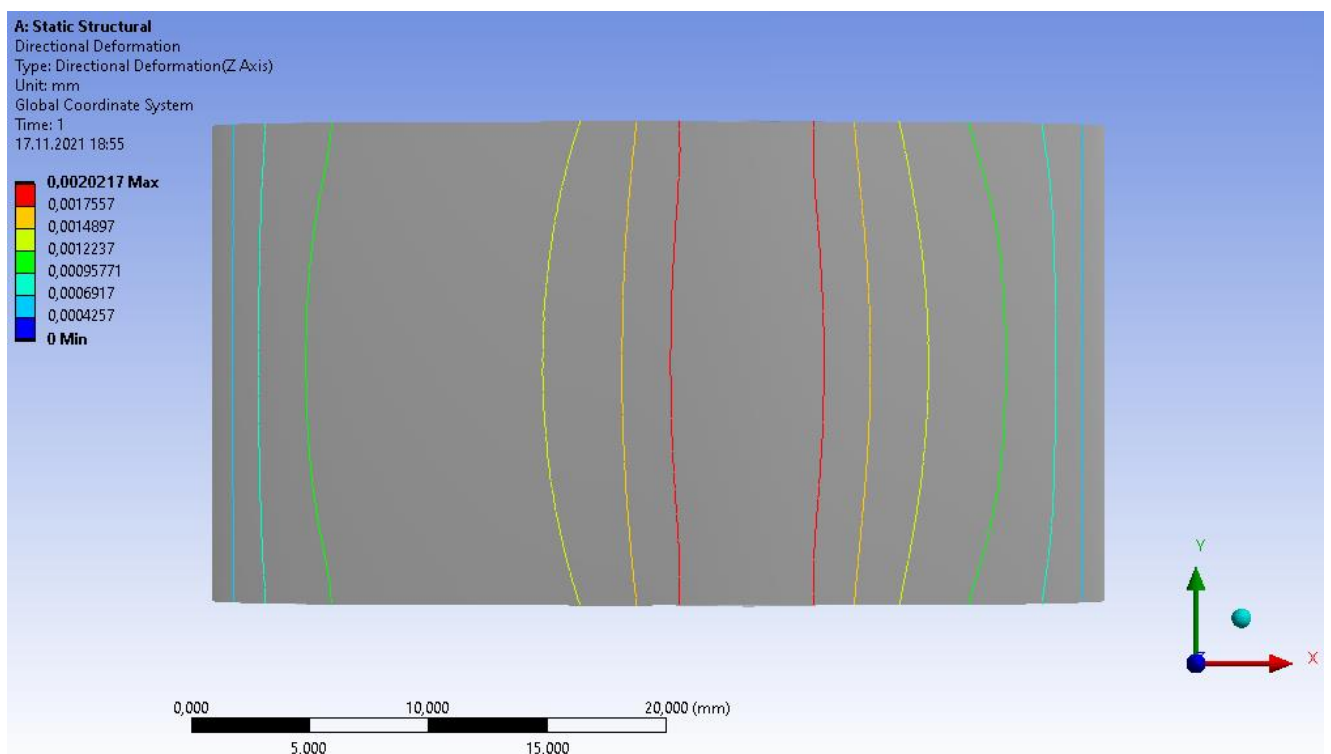


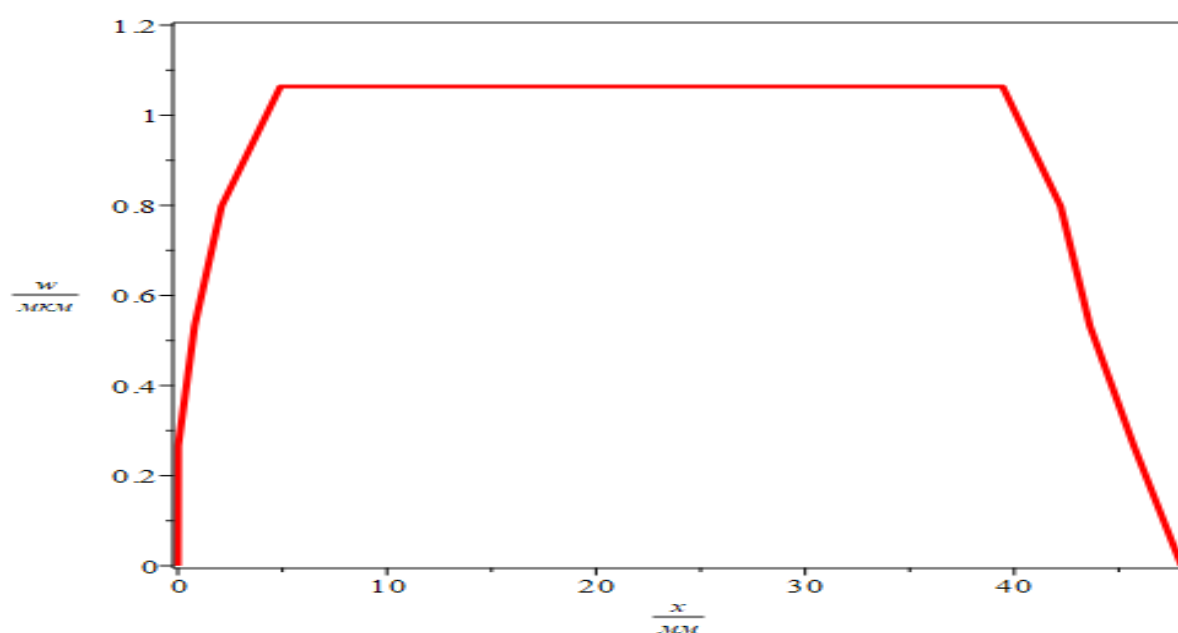
Рисунок 2.20 - линии уровня перемещений U_z

Графики нормальных и тангенциальных перемещений ненагруженной стороны прямоугольника при продольном перемещении нагруженной стороны на 11,5 мкм. Модуль упругости образца 2,72 ГПа,

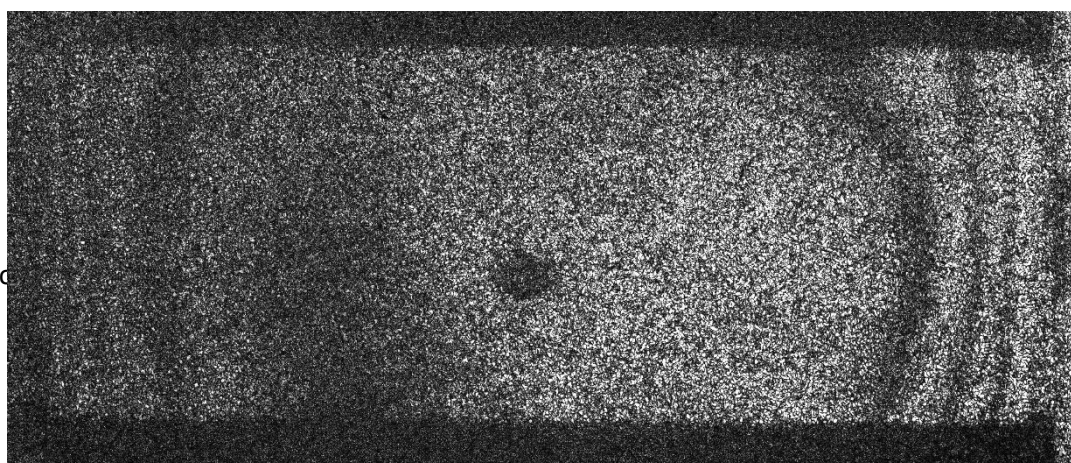
коэффициент Пуассона 0.43. Размеры образца: длина ненагруженной стороны 48 мм, длина нагруженной стороны 18 мм.

Таблица 1 — Измеренные значения поперечных смещений ненагруженной стороны

$w/\text{мкм}$	0	0.27	0.53	0.8	1.07	1.07	0.8	0.53	0.27	0
$x/\text{мм}$	0	0.02	0.8	2.09	4.91	39.44	42.22	43.62	45.72	48



Рисун



нашем

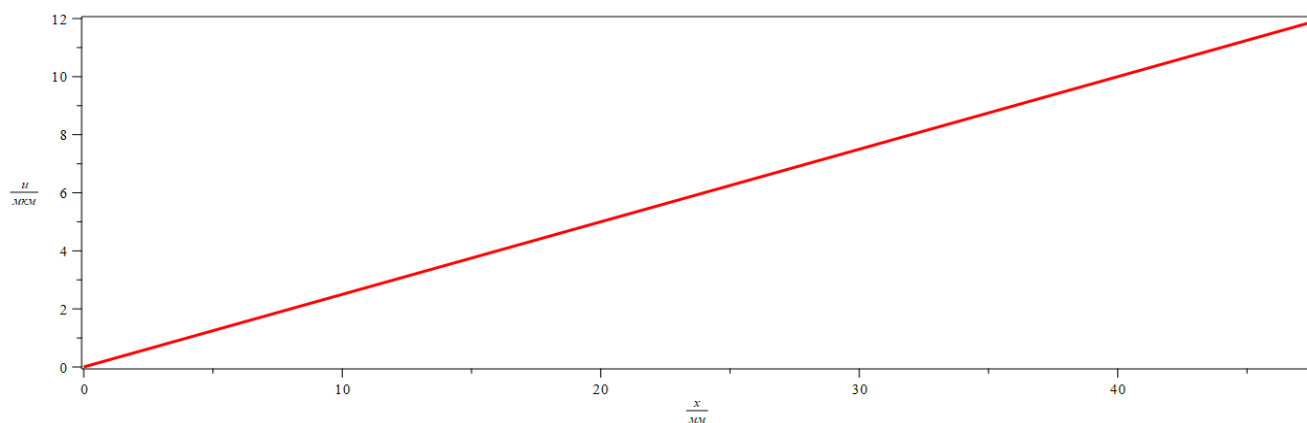


Рисунок 2.22 - График нормальных перемещений ненагруженной грани параллелепипеда с отверстием

Размеры 48*32*18 мм.

Отверстие: диаметр 8 мм в грани 48*32 мм. Центр отверстия - на расстоянии 16 мм от одной из торцевых граней.

Наблюдаемая боковая грань 48*18 мм.

Продольное смещение при сжатии 13 мкм.

X=0 – неподвижная грань.

Таблица 2 — Измеренные значения поперечных смещений ненагруженной стороны

x, мм	0	1.17	3.55	6.3	9.35	12.44	16.93	45.02	47.75
w, мкм	0	0.23	0.43	0.62	0.80	0.98	1.12	0.34	0

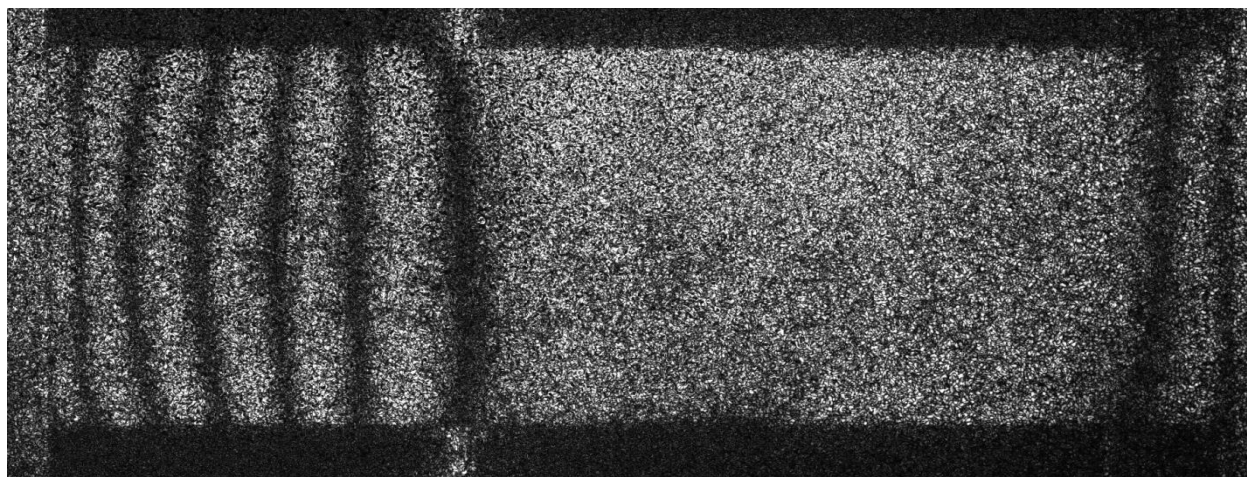
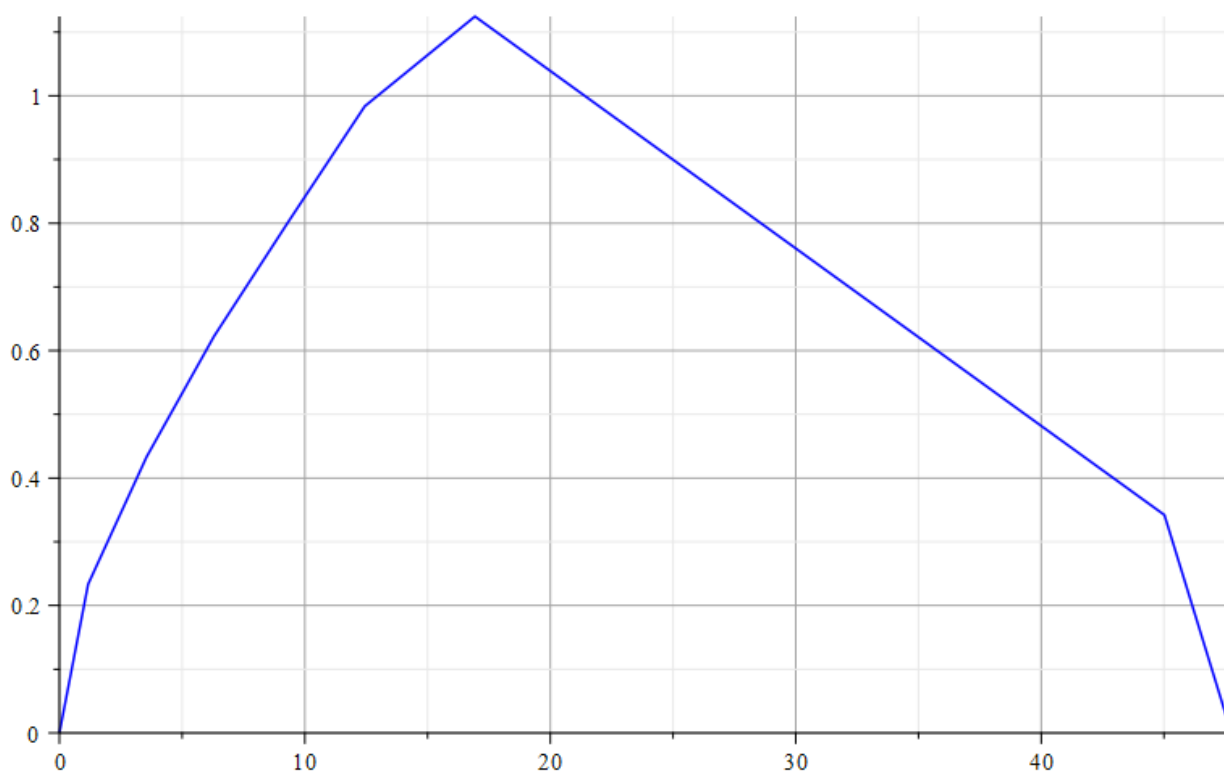


Рисунок 2.23 - График тангенциальных перемещений ненагруженной грани параллелепипеда с отверстием с интерферограммой

Таблица 3 — Измеренные значения поперечных смещений ненагруженной стороны

x, мм	0	5.29	10.4	13.4	16.6	19.5	20.7	25.9	31.1	35.1	41.5	46.6	48
-------	---	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	----

u, мкм 0 1.84 3.51 4.43 5.14 5.86 6.21 7.7 9.16 10.3 11.6 12.8 13

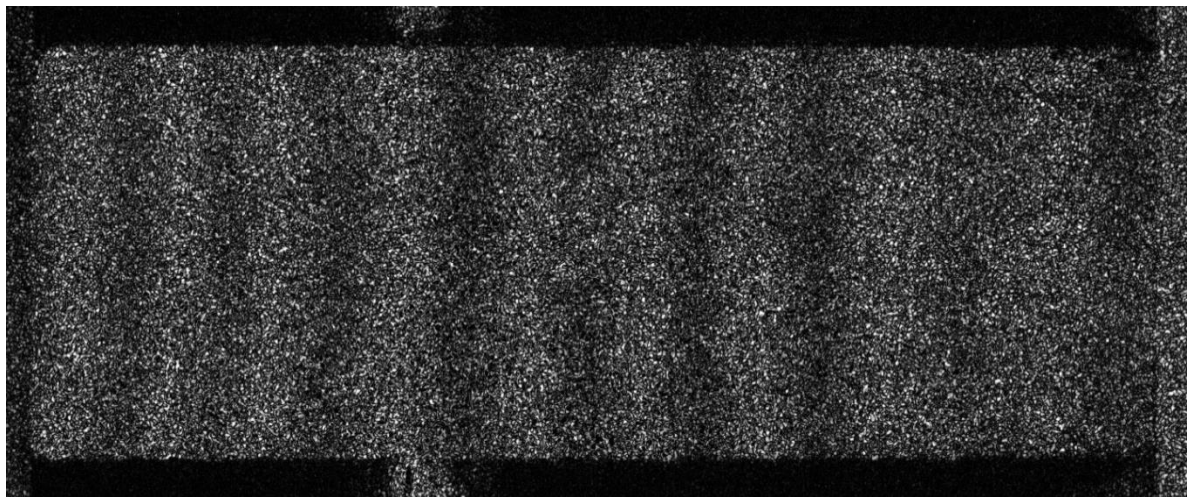
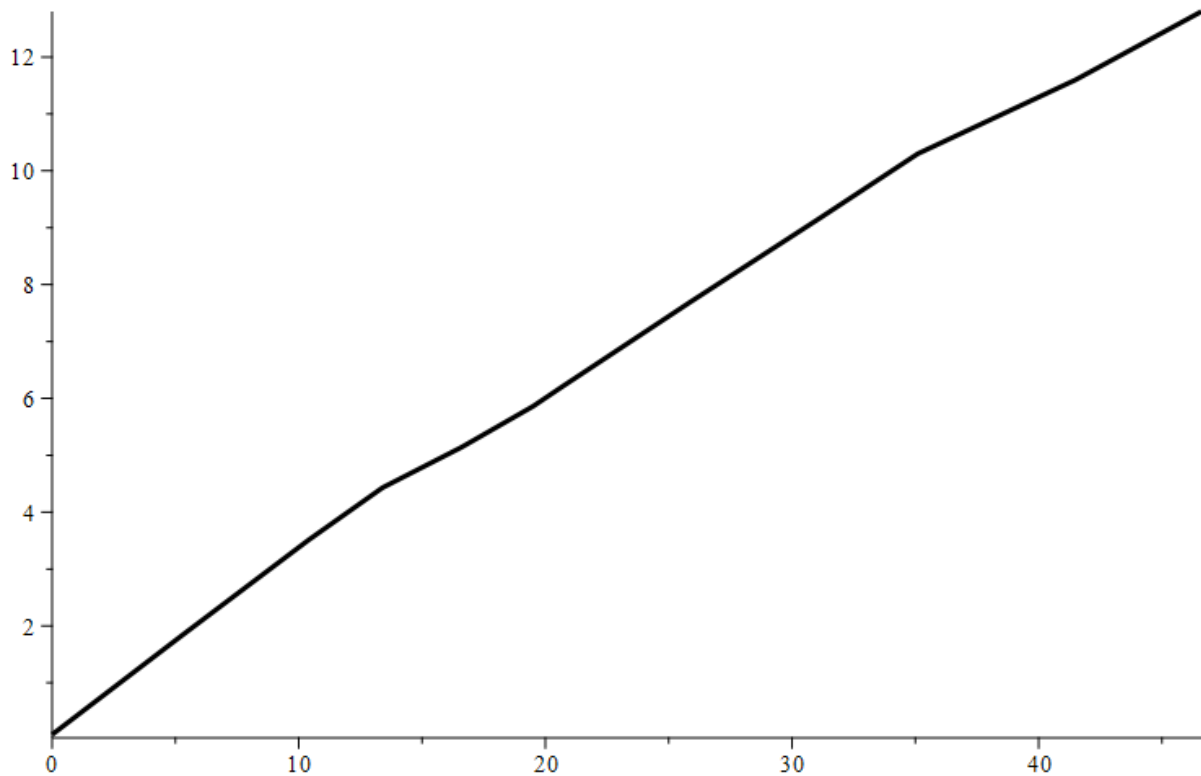


Рисунок 2.24- График тангенциальных перемещений ненагруженной грани параллелепипеда с интерферограммой

Сравнение 2D и 3D расчета (случаи с отверстием и без)

Случай с отверстием

Ориентируясь на расчетную схему ниже (Рисунок 2.24), построим графики нормального перемещения ненагруженного края полосы/параллелепипеда (2D/3D постановка задачи). В 3D расчете

нормальное перемещение находилось для средней части полосы (на Рисунке 2.25 показана горизонтальной линией).

$$U_y = -13 \text{ мкм}, E = 2,72 \text{ ГПа}, \nu = 0,43, L = 48 \text{ мм}, r_0 = 4 \text{ мм}, 2h = 32 \text{ мм}.$$

Построить график перемещений U_x при $x = h$

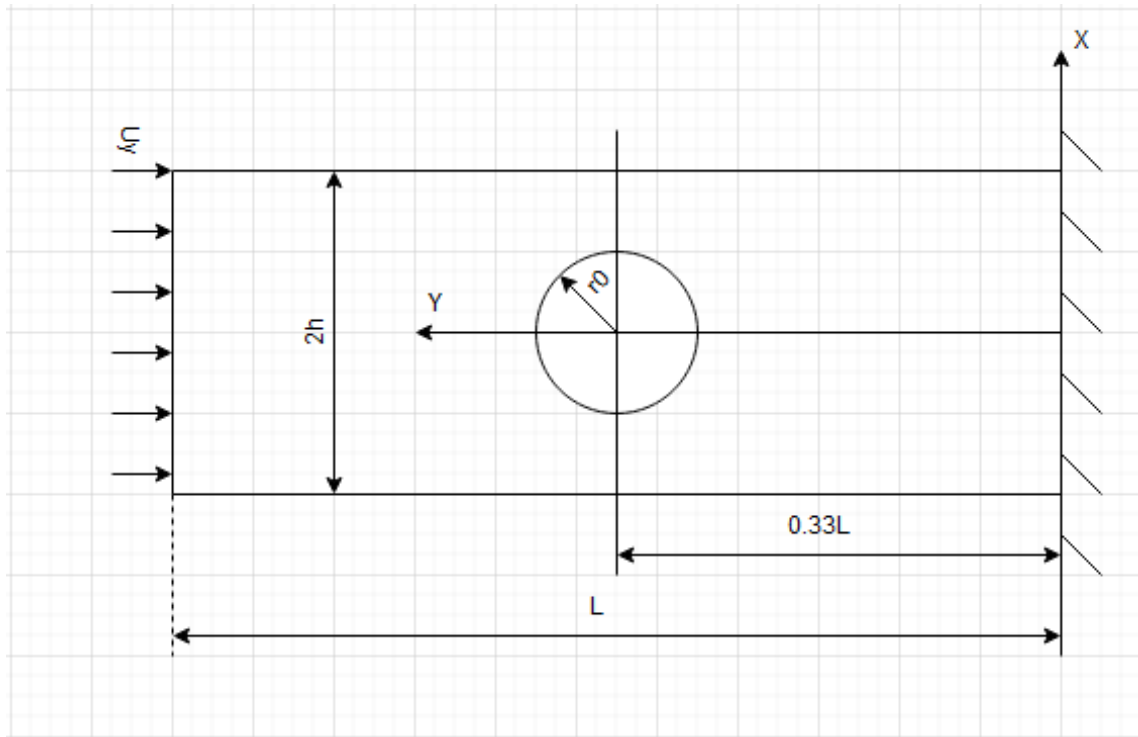


Рисунок 2.25 - Расчетная схема

Линия, на которой определялось
нормальное перемещение для 3D расчета

48 мм

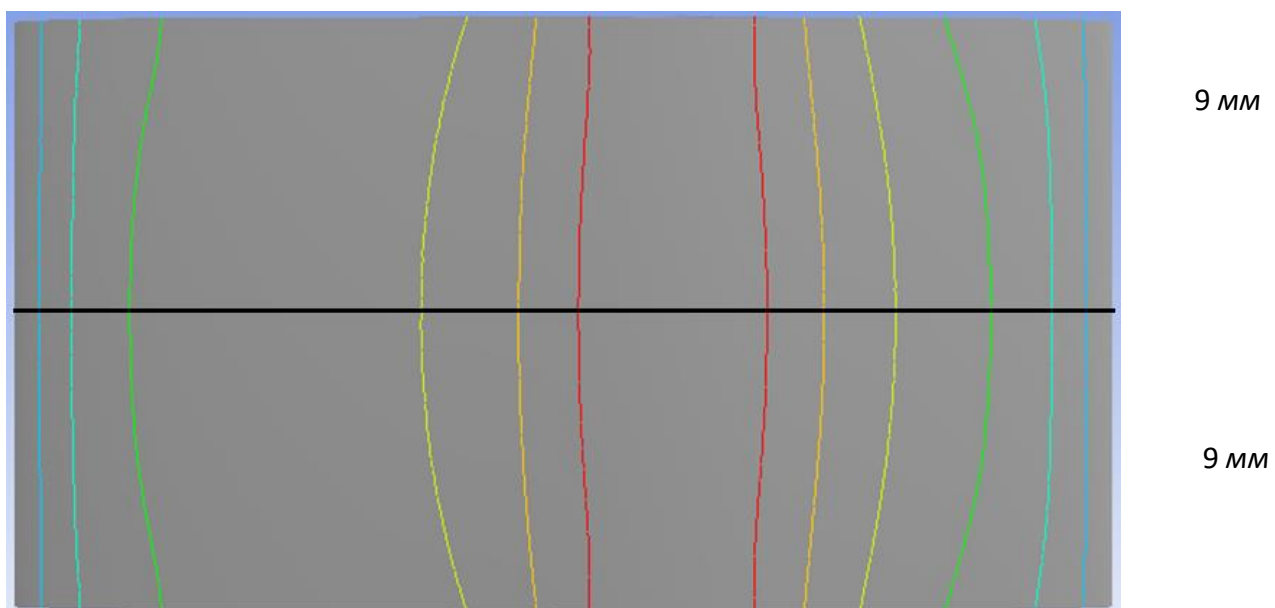
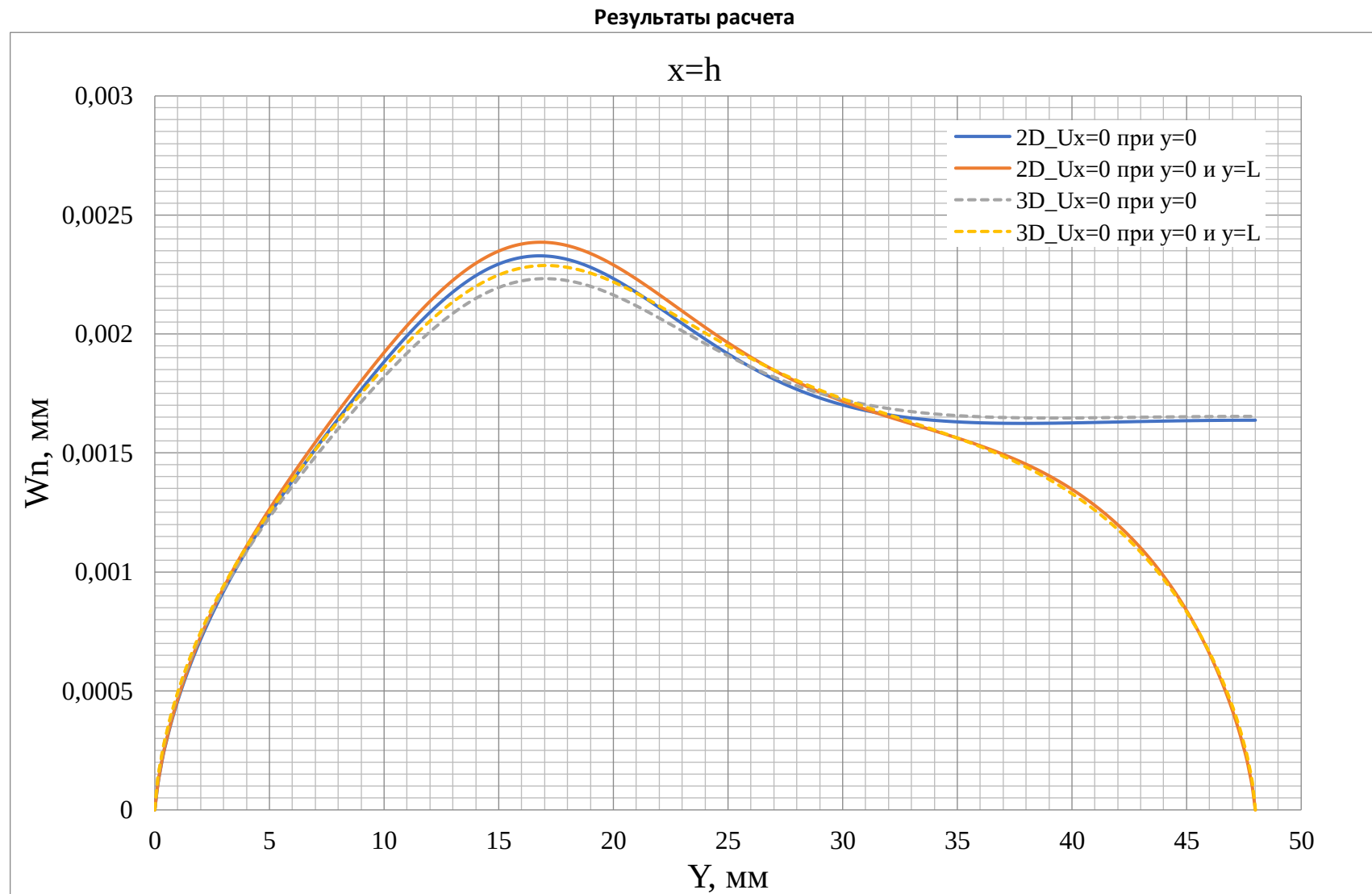
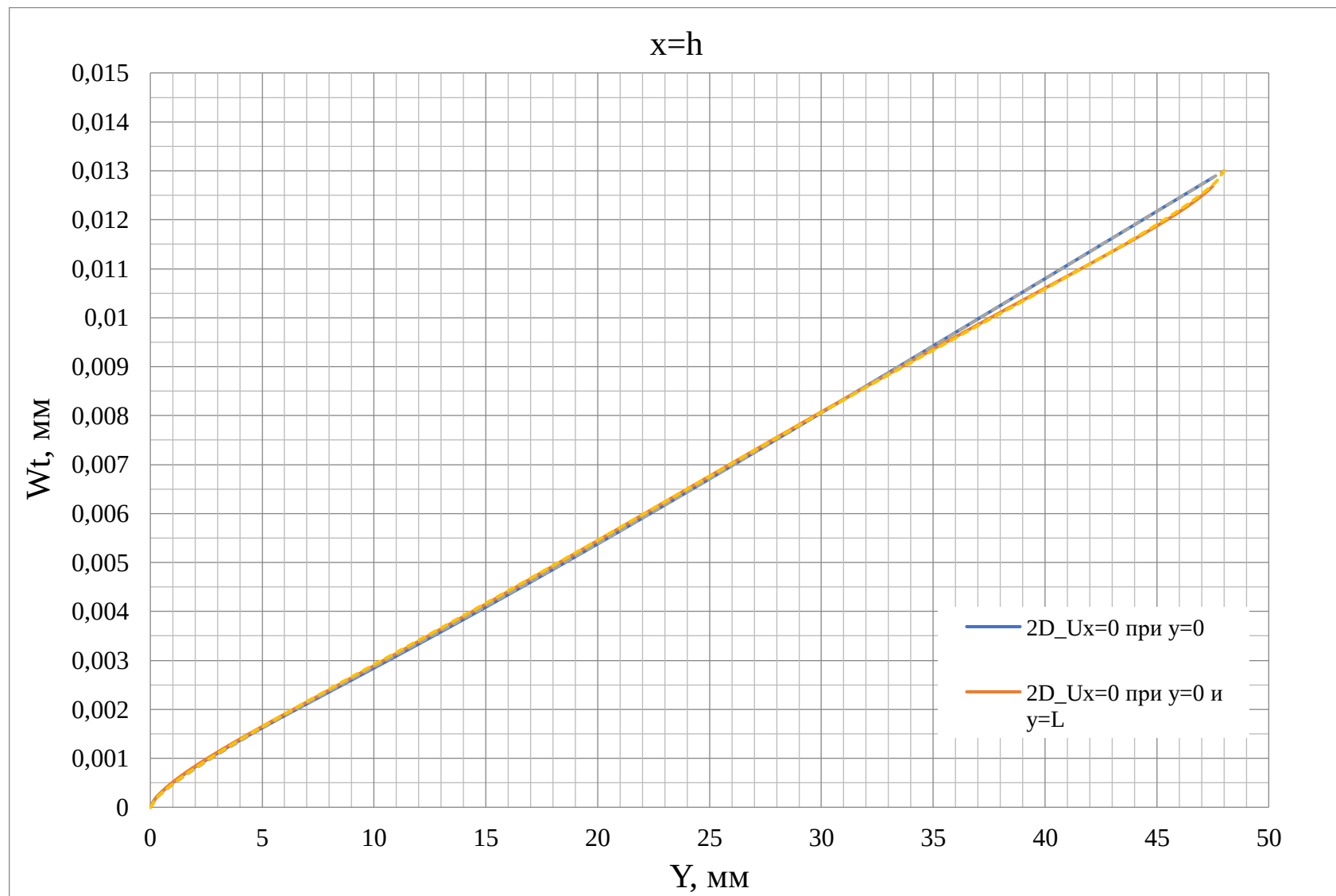


Рисунок 2.25 – График нормального перемещения ненаружного края

Рисунок 2.26 – График нормального перемещения, W_n

Рисунок 2.27 – График касательного перемещения, W_t

Линии уровня для 3D расчета

F: 3D_Ux=0_y=0

Directional Deformation 2

Type: Directional Deformation(X Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

Time: 1

13.04.2022 21:59

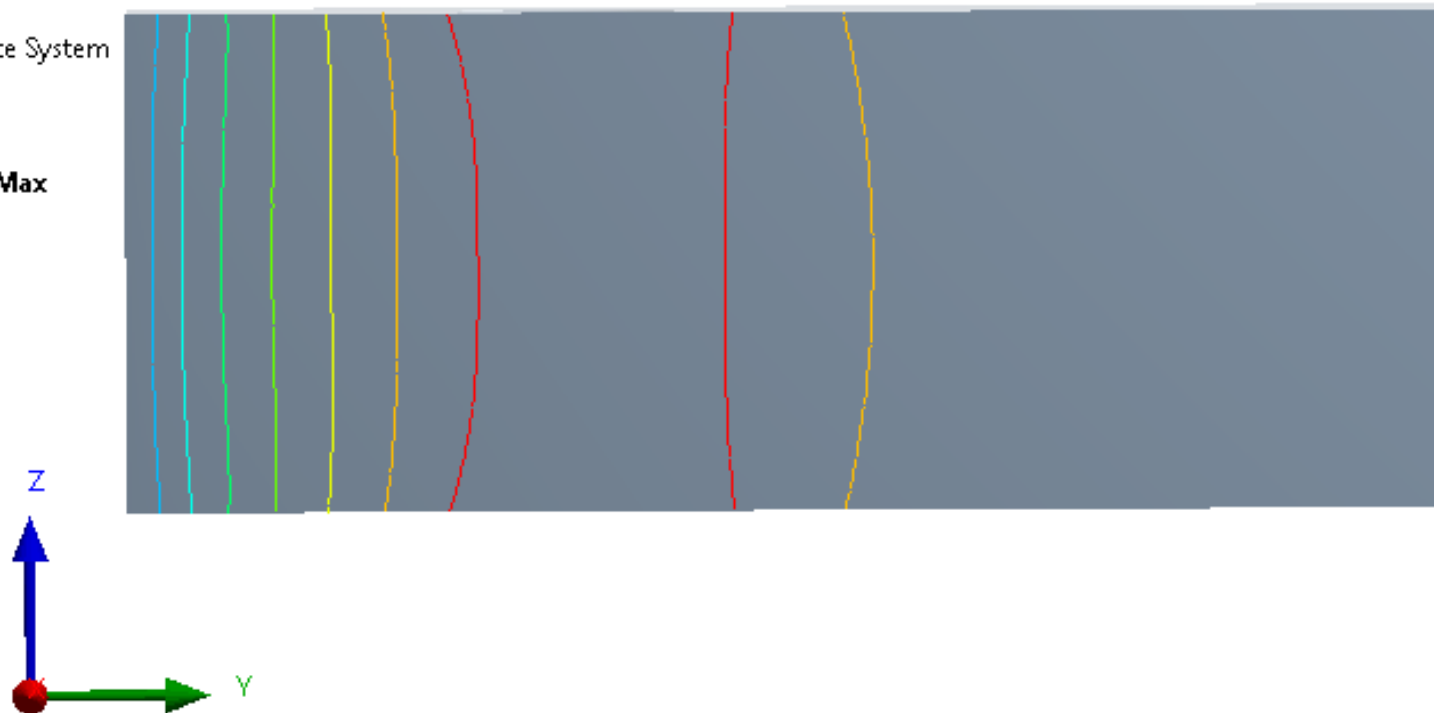
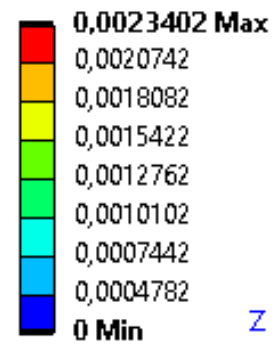


Рисунок 2.28 – Линии уровня нормального перемещения, W_n (шаг 0,266 мкм)

H: Copy of 3D_Ux=0_y=0_y=L

Directional Deformation 2

Type: Directional Deformation(X Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

Time: 1

13.04.2022 22:05

0,0024023 Max

0,0021363

0,0018703

0,0016043

0,0013383

0,0010723

0,00080631

0,0005403

0,0002743

0 Min

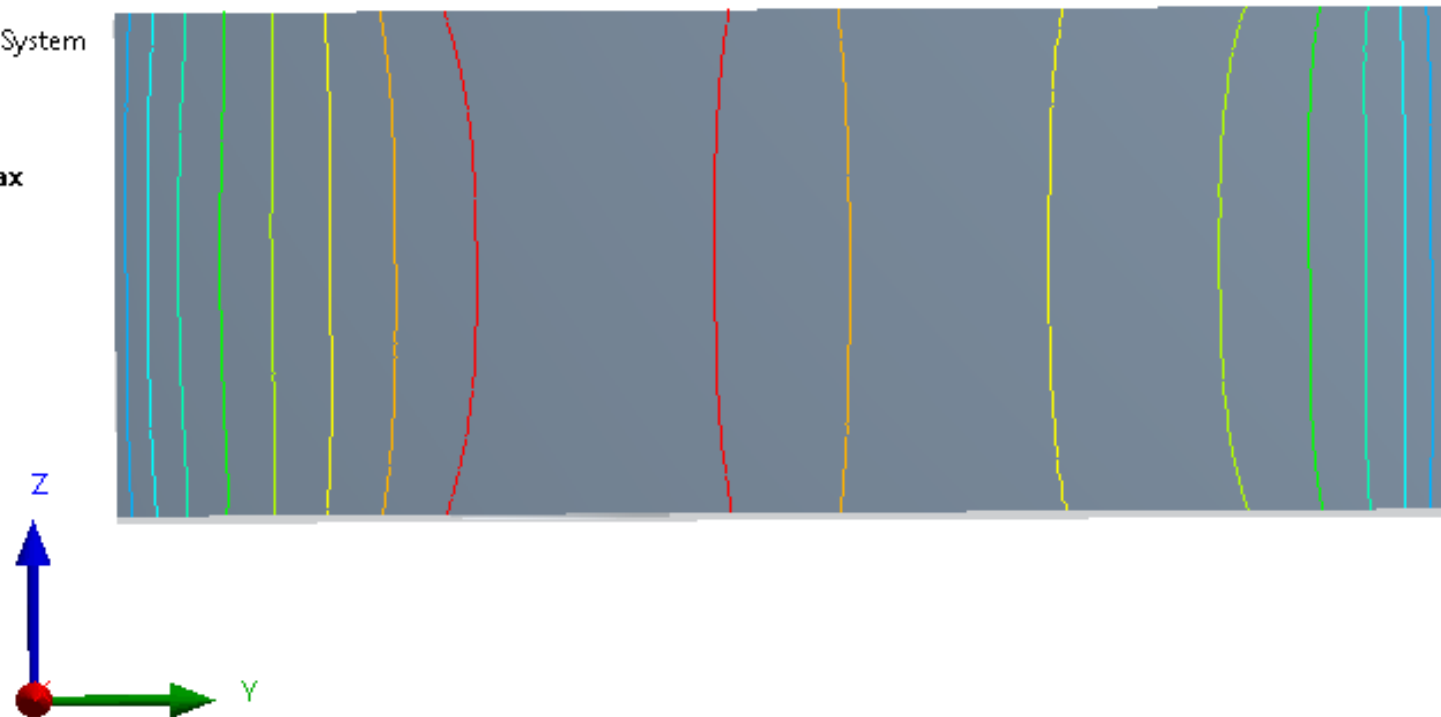


Рисунок 2.29 – Линии уровня нормального перемещения, W_n (шаг 0,266 мкм)

Случай без отверстия

Ориентируясь на расчетную схему ниже (Рисунок 2.30), построим графики нормального перемещения ненагруженного края полосы/параллелепипеда (2D/3D постановка задачи). В 3D расчете нормальное перемещение находилось для средней части полосы (на Рисунке 36 показана горизонтальной линией).

$$U_y = -13 \text{ мкм}, E = 2,72 \text{ ГПа}, \nu = 0,43, L = 48 \text{ мм}, r_0 = 4 \text{ мм}, 2h = 32 \text{ мм}.$$

Построить график перемещений U_x при $x = h$

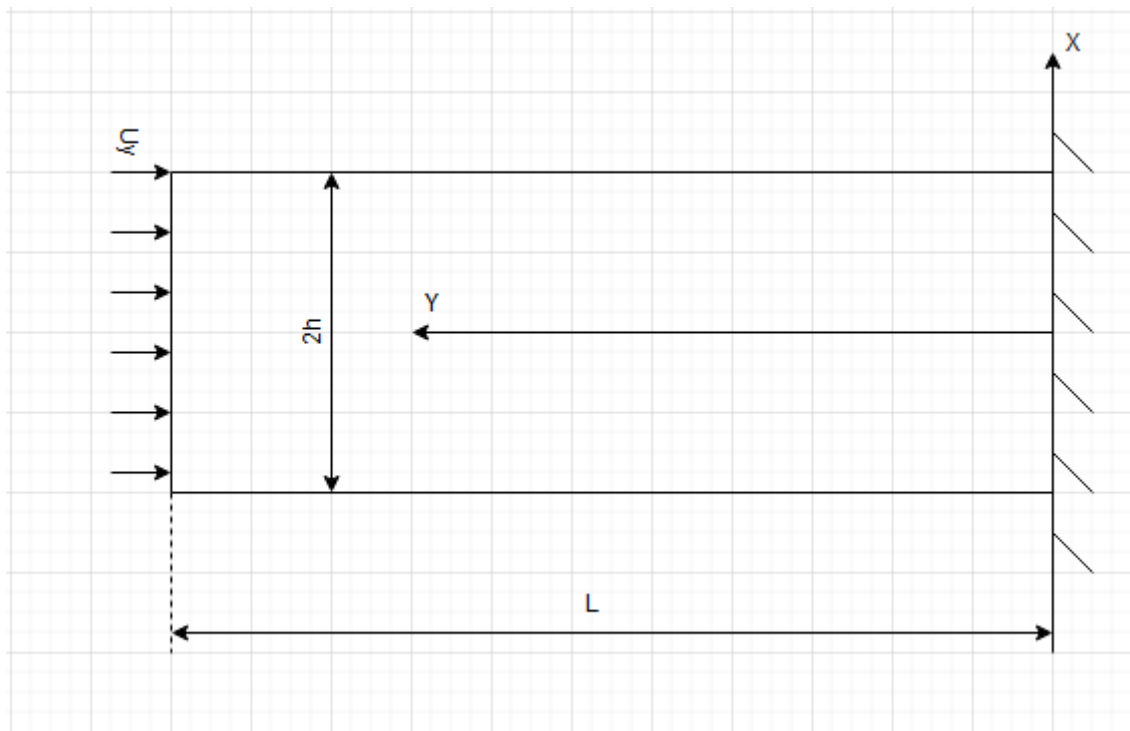


Рисунок 2.30 – Расчетная схема

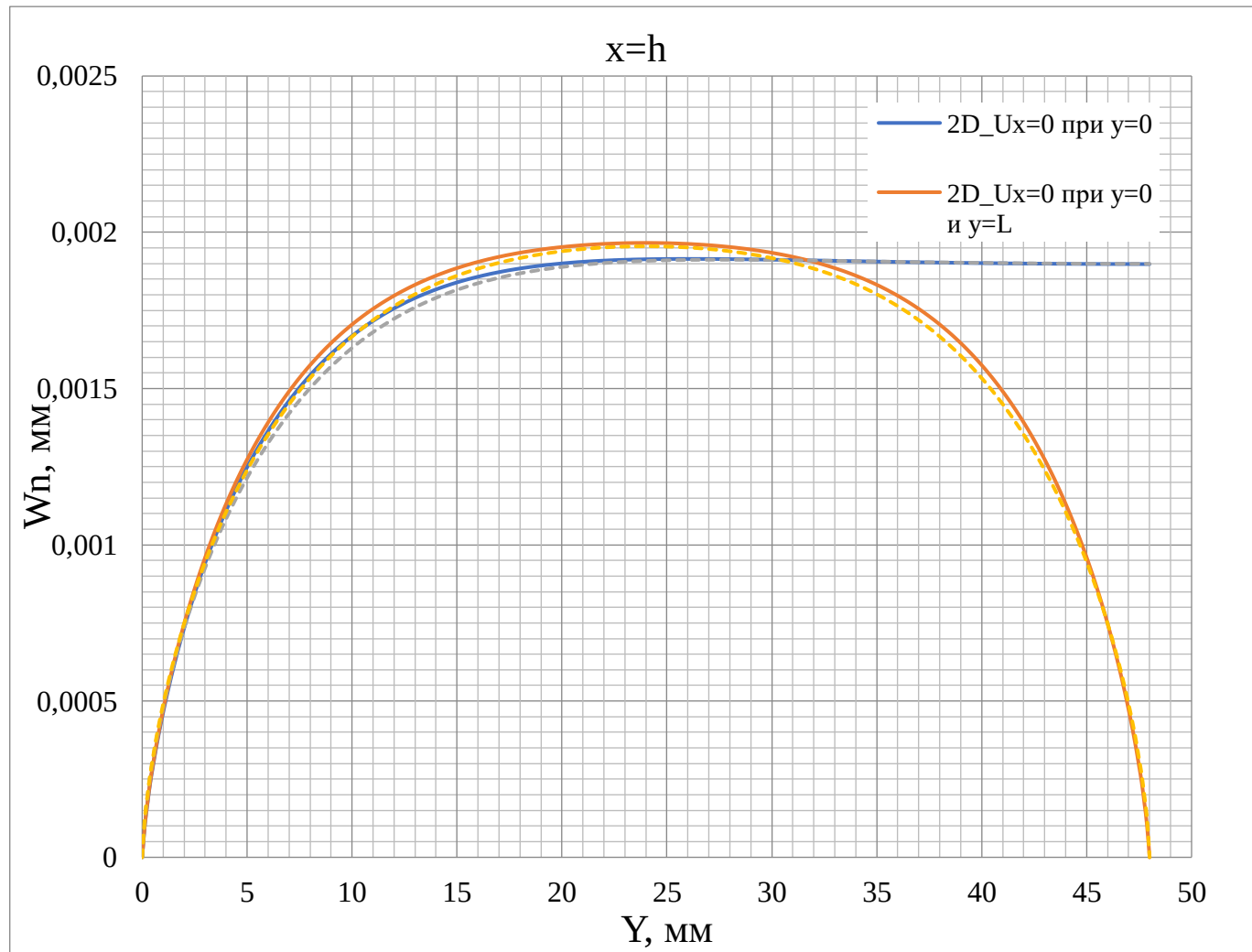
Линия на которой определялось
нормальное перемещение для 3D расчета

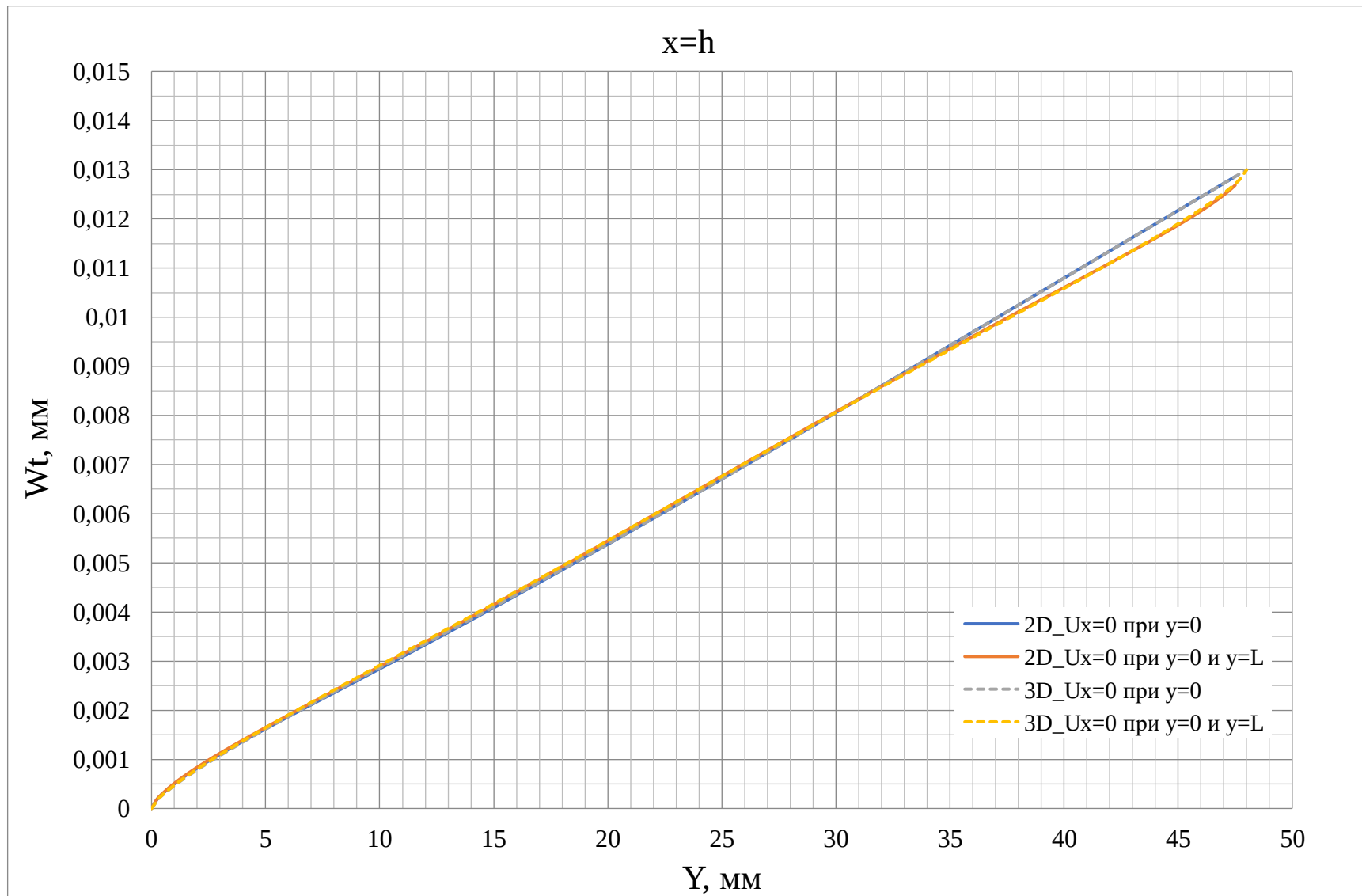
48 мм



Рисунок 2.31 - График нормального перемещения ненаружного края

Результаты расчета

Рисунок 2.32 – График нормального перемещения, W_n

Рисунок 2.33 – График касательного перемещения, W_t

Линии уровня для 3D расчета

J: Copy of 3D_Ux=0_y=0

Directional Deformation 2

Type: Directional Deformation(X Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

Time: 1

14.04.2022 21:31

0,0019291 Max

0,0016631

0,0013971

0,0011311

0,00086509

0,0005991

0 Min

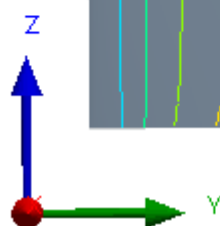


Рисунок 2.34 – Линии уровня нормального перемещения, W_n (шаг 0,266 мкм)

O: Copy of 3D_Ux=0_y=0_y=L

Directional Deformation 2

Type: Directional Deformation(X Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

Time: 1

14.04.2022 21:58

0,0019962 Max

0,0017302

0,0014642

0,0011982

0,0009322

0,0006662

0 Min

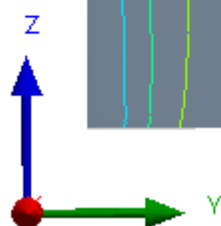


Рисунок 2.35 – Линии уровня нормального перемещения, W_n (шаг 0,266 мкм)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения дипломного проекта был освоен стандартный процесс проектирования в команде специалистов, в лаборатории механики прочности и разрушения материалов и конструкций Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук – базовой кафедре «Прикладная механика» НИУ МГСУ.

Разработана программа предназначенная для получение компьютерной интерферограммы, соответствующей линиям уровня нормальных перемещений возмущённой поверхности исследуемого тела путём поточечного вычитания матриц оцифрованных изображений поверхности тела до и после внесения возмущения (заданной силы, зондирующей лунки и др.). Она имеет также ряд возможностей по улучшению полученных изображений и расчёту напряжений по интерферограмме малых упругих перемещений.

- Программное обеспечение используется в установке, предназначенной для регистрации микроперемещений поверхности объекта.
- Программное обеспечение обеспечивает непрерывную передачу видеопотока с видеокамеры на экран ЭВМ.
- Программное обеспечение обеспечивает корректное сохранение фотокадров и видеокادров по заданному пользователем пути.
- Программное обеспечение обеспечивает корректное вычитание кадров, полученных данным ПО, а также загруженных извне.

Также были проведены испытания трехмерного образца на сжатие, приведена теоретическая модель сжатия стержня, описана экспериментальная установка и дана расчетная модель метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Островский Ю.И., Бутусов М.М., островская Г.В. Голографическая интерферометрия М.: Наука, 1978. 336с.
2. Л.И. Голубенцева, В.П Рябухо, О.А. Перепелицына Голографическая спекл-интерферометрия, учебное пособие под редакцией профессора В.П. Рябухо, 2009. 67с.
3. Spyder IDE - Среда разработки python [Electronic resource]. – URL: <https://континентсвободы.рф/spyder-ide-sreda-programmirovaniya-python/> (date of treatment: 21.05.2022).
4. ИТ Блог. Администрирование серверов на основе Linux (Ubuntu, Debian, CentOS, openSUSE) [Electronic resource]. – URL: <https://andreyex.ru/yazyk-programmirovaniya-python/uchebnik-po-python-3/python-3-obzor/> (date of treatment: 20.04.2022).
5. Учебник по Python [Electronic resource]. – URL: <https://itchef.ru/articles/303685/> (date of treatment: 20.04.2020).
6. Python GUIs for Humans [Electronic resource]. – URL: <https://pysimplegui.readthedocs.io/en/latest/#creating-a-windows-exe-file> (date of treatment: 20.04.2022).
7. Учебник по OpenCV | OpenCV с использованием Python [Electronic resource]. – URL: <https://www.itquaa.com/tutorial/opencv/opencv.html> (date of treatment: 20.04.2022).
8. Python против PHP [Electronic resource]. – URL: <https://coderlessons.com/tutorials/kompiuternoe-programmirovanie/uchebnik-python/31-python-protiv-php> (date of treatment: 20.04.2022).
9. OpenCV [Electronic resource]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/OpenCV> (date of treatment: 20.04.2020).
10. Electronic speckle pattern interferometry [Electronic resource]. – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_speckle_pattern_interferometry#:~:text=Электронная%20спекл-интерферометрия%20\(ESPI\)%2C%20также%20известная,компонентов%20с%20оптически%20шероховатыми%20поверхностями](https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_speckle_pattern_interferometry#:~:text=Электронная%20спекл-интерферометрия%20(ESPI)%2C%20также%20известная,компонентов%20с%20оптически%20шероховатыми%20поверхностями) (date of treatment: 20.04.2022).
11. СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ [Electronic resource]. – URL: https://studme.org/199207/matematika_himiya_fizik/spekl_interferometriya (date of treatment: 20.04.2022).
12. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ СПЕКЛИНТЕРФЕРОМЕТРИИ С РАСШИРЕННЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ [Electronic resource]. – URL: http://optic.cs.nstu.ru/files/Article/Dis/Nechaev_dis.pdf (date of treatment: 20.04.2022).
13. Л.И.Седов, МЕХАНИКА СПЛОШНОЙ СРЕДЫ. ТОМ 2, М.: Наука, 1970 г., 568 стр.

14. ARECONT VISION [Electronic resource]. – URL: <https://www.arecontvision.ru/asp/catalog/12/174> (date of treatment: 20.04.2022).
15. Sphotonics [Electronic resource]. – URL: <https://sphotonics.ru/company/partnery/MSL-S-532.pdf> (date of treatment: 20.04.2022).
16. Тензорезисторный датчик C2 [Electronic resource]. – URL: <https://www.tensom.ru/tenzodatchiki/rastjazhenija-szhatija/78/> (date of treatment: 20.04.2022).
17. Инкрементный преобразователь линейных перемещений [Electronic resource]. – URL: <https://skbis.ru/datasheet/lir-14.pdf> (date of treatment: 20.04.2022).
18. Клименко И.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. М. : Наука, 1985. – 224 с.
19. Р.В. Гольдштейн, В.М. Козинцев, А.В. Подлесных, А.Л. Попов, Д.А. Че-любеев. Применение электронной спекл-интерферометрии для регистрации наноперемещений. Изв. РАН. МТТ. – 2008. –175 с.
20. В.П.Рябухо «Спекл-интерферометрия». Соросовский образовательный журнал, том 7, №5,2001г. – 9 с.
21. F. Roddier, “The effect of atmospheric turbulence in optical astronomy,” Progress in Optics, E. Wolf, ed. (North-Holland, Amsterdam, 1981). – 376 с.
22. Варданян Г.С. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности / Г.С. Варданян, В.И. Андреев, Н.М. Атаров, А.А. Горшков – М.: Изд.АСВ. 1995. / стр. 42-50.
23. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.
24. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Наука. 1974. – 560 с.
25. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. 1986. – 328 с.
26. Ричард Томпсон, Джеймс Моран “Интерферометрия и синтез в радиоастрономии”-2003. – 624 с.
27. М. Франсон. Оптика спеклов. - СПб.: Питер, 1980. – 170 с.
28. Г.З. Шарафутдинов. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КИРША ДЛЯ ПЛАСТИНКИ ИЗ НЕОДНОРОДНОГО ПО ТОЛЩЕ МАТЕРИАЛА. НИИ механики МГУ М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 2019, №1, с. 63-71

Рецензия

На выпускную квалификационную работу обучающегося

Суворовой Валерии Дмитриевны

Направления подготовки (специальности) 15.04.03 Прикладная механика

Тема ВКР Совершенствование алгоритмов и программ лазерно-интерферометрического метода измерения остаточных напряжений

Актуальность темы Актуальность темы ВКР обусловлена необходимостью создания действующего варианта программы создания и обработки компьютерных интерферограмм, пригодной для испытаний образцов на разные типы воздействий.

Содержание разделов ВКР Работа состоит из двух разделов. В первом разделе дано описание разработки программного обеспечения для получения и анализа компьютерных интерферограмм. Во втором разделе описан метод электронной спекл-интерферометрии, а также применение электронной спекл-интерферометрии. Приведен пример применения программного комплекса при испытании трехмерного образца на сжатие, приведена теоретическая модель сжатия стержня, описана экспериментальная установка и дана расчетная модель метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS.

Оценка правильности результатов ВКР Правильность результатов ВКР обеспечена тестированием программы при испытании конкретных образцов с известными параметрами образца и условий испытаний.

Положительные стороны ВКР Программа составлена на современном кроссплатформенном языке Python с возможностью ее совершенствования, применительна к различным типам испытаний и образцов.

Замечания/ недостатки ВКР Ограниченность функционала разрабатываемой программы, позволяющая получать электронные спекл-интерферограммы только при статическом нагружении.

Рекомендации по ВКР Дополнить в дальнейшем функционал программы возможностью получения интерферограмм в реальном времени.

Рекомендованная оценка «отлично»

Рецензент

ИПМех РАН, с.н.с., к.ф.-м.н.

старший научный сотрудник

Козинцев Виктор Михайлович

(организация, должность,
ученое звание, ученая степень)

Подпись

(фамилия, имя отчество)

« ____ » _____ 2022 г.
дата

М.П.