

Введение:

Цель данной работы состоит в создании на базе томографа «Орел», томографической системы для контроля распределения плотности в заготовках из полимерного материала УУКМ для изготовления защитных наконечников спускаемого блока и проведение компьютерной томографии с обработкой томографических данных путем среднестатистического осреднения в заданных объемах локальных значений измеренных условных единиц плотности.

Актуальность. При прохождении спускаемого блока через атмосферу к цели блок испытывает большую температурную нагрузку. Для тепловой защиты в передней части блока устанавливается защитный конус из материала способного выдержать температуру до 4000 ° С. Такими материалами являются углерод-углеродный композиционные материалы УУКМ. Их отличием являются:

- Низкая теплопроводность, теплоемкость, плотность;
- При высоких температурах сохраняются высокие прочностные характеристики (при температурах до 4000° С);
- Высокая ударная вязкость и практическое отсутствие ползучести во всех допустимых температурных интервалах.
- Стойкость к абляции и воздействию многих кислот;

При изготовлении наконечника к нему предъявляются очень жесткие требования по однородности материала, поэтому, вопрос неразрушающего контроля однородности заготовок из углерод-углеродистого композиционного материала является актуальным. Анализ существующих методов контроля показал, что для этих целей может быть использована только рентгеновская компьютерная томография.

Объект исследования и предмет. Томографическая система на базе томографа «Орел» для осуществления томографического сканирования образцов из УУКМ материалов типа 39п7.001 и 4КМС-Л.

Предмет исследования. Конкретная задача данной работы – определить с помощью томографического контроля распределение плотности в изделии из углерод-углеродных композиционных материалов 39п7.001 и 4КМС-Л.

Научная и практическая новизна. В ходе выполнения данной работы были выполнены следующие задачи:

1. Проведен литературный обзор, изучено состояние проблемы на данный момент;
2. Ознакомление с характеристиками объекта контроля;
3. Ознакомление с техническим заданием;
4. Изучена теоретическая база компьютерной томографии;
5. Предложена структурная схема томографической системы;
6. Разработана технология томографического контроля для конкретных изделий;
7. Проведены опыты и получены результаты.

Практическая значимость результатов ВКР. Разработанная технология томографического контроля применяется для определения распределения плотности в изделиях из УУКМ (наконечники боевых блоков (ББ)). Заказчик работы – ОАО «Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева». Результаты данной ВКР станут основой для методических пособий, указаний для последующего совершенствования метода томографического контроля изделий.

Реализация и апробация работы. Разработанная система принята для осуществления томографического контроля изделий из УУКМ.

1. Обзор литературы:

Изделия из углерод-углеродного композиционного материала чаще всего выполняют роль ответственных деталей в авиастроении и космонавтике. Изделия из УУКМ являются сложным объектом контроля на этапах изготовления и эксплуатации. Поэтому предъявляются высокие требования к обеспечению достоверного и высокопроизводительного неразрушающего контроля данных изделий.

В.В. Мурашов в своей статье «Неразрушающий контроль заготовок и деталей из углерод-углеродного композиционного материала для многоразового космического корабля «Буран» [3, стр. 50-52, 57] приводит примеры возможности осуществления неразрушающего контроля с помощью ультразвукового метода. Однако данный метод не решает вопрос определения плотности по всему объему материалу.

При использовании УЗ метода для контроля изделий из УУКМ существует следующая проблема: изделия собираются из углеродных стержней и науглероживаются сажей. Акустические свойства такого материала неоднородны по различным направлениям. УЗ хорошо распространяется вдоль стержней, скорость может достигать 12000 м/с и очень сильно затухает в поперечном направлении. Поэтому отсутствует возможность измерить плотность отдельного объема материала.

Неразрушающий контроль углерод-углеродного композиционного материала освещался в работах: Сорокин К.В., Мурашов В.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. «Прогнозирование развития дефектов в конструкциях из ПКМ способом определения изменений жесткости при актюировании материала» [4, стр. 88], В.А. Григорьева и А.С. Гишварова «Испытания авиационных двигателей» [5, стр. 542-545], Выборнов Б. И «Ультразвуковая дефектоскопия» [6, стр. 100-102], Вайнберг Э.И. «Контроль изделий из композиционных материалов методом рентгеновской вычислительной томографии» [7].

2. Объект и методы исследования

Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) содержат углеродный армирующий элемент в виде дискретных волокон, непрерывных нитей или жгутов, войлоков, лент, тканей с плоским и объемным плетением, объемных каркасных структур. Волокна располагаются хаотически, одно-, двух- и трехнаправленно [8].

Углеродная матрица объединяет в одно целое армирующие элементы в композите, что позволяет наилучшим образом воспринимать различные внешние нагрузки. Определяющими факторами при выборе материала матрицы являются состав, структура и свойства кокса.

К числу специальных свойств относится низкая пористость, низкий коэффициент термического расширения, сохранение стабильной структуры и свойств, а также размеров изделий при нагревах до 4000°C и охлаждении, высокие механические свойства, а также хорошая электропроводность. Основное применение УУКМ находят в изделиях, которые работают при температурах выше 1200°C .

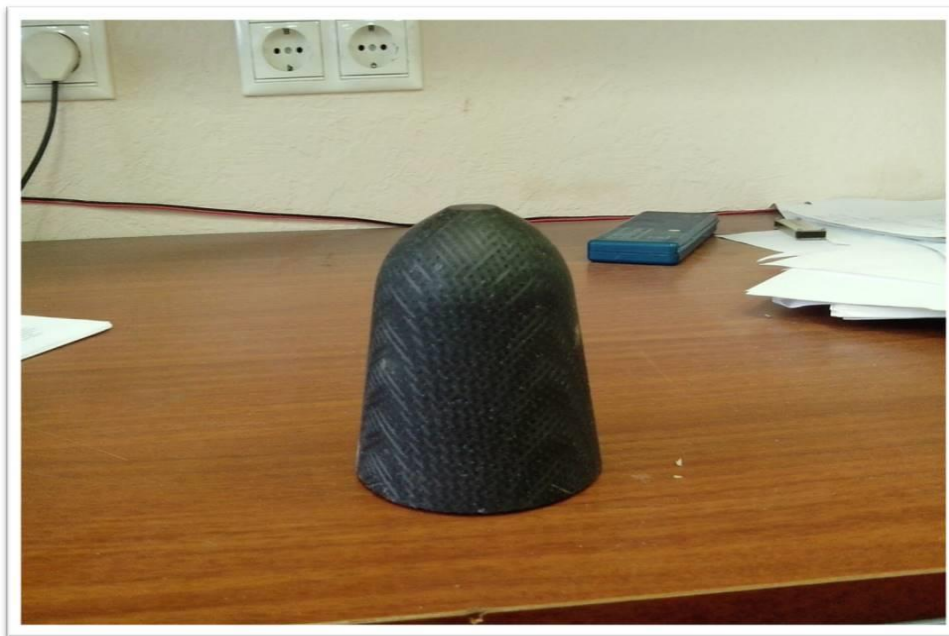


Рисунок 1 – Готовое изделие из УУКМ. Наконечник боевого блока.

3. Выбор и основание использования томографического контроля для исследования

Для реализации неразрушающего контроля существуют методы контроля: магнитный метод контроля, электрический, вихретоковый, радиоволновой, тепловой, оптический, радиационный, акустический, проникающими веществами. Каждый метод используется в определенных условиях, у каждого метода свои требования к контролю и свои результаты.

Некоторыми методами можно найти отклонения плотности, различные дефекты, другие методы представляют визуальную наглядность наличия дефекта. Но ни один из данных методов не решает вопрос определения распределения плотности по всему объему материала. Только благодаря развитию компьютерной томографии появилась возможность проводить данные измерения. Сам принцип работы томографии основан на том, чтобы получать информацию об ослаблении рентгеновского излучения в каждом элементарном объеме. А так как различная плотность – различное ослабление. Таким образом, используем компьютерную рентгеновскую томографию для решения задач данной работы.

3.1 Теоретические положения томографии, её классификация

Среди всех существующих топографических методов особые успехи достигнуты в радиационной (рентгеновской) компьютерной томографии (КТ). [2, стр. 15]

Предпосылкой ее создания послужили минусы обычной рентгенографии, что стало причиной к осуществлению не одного, а массива проекций, снятых под различными углами и определения по ним способами математической реконструкции плотностей исследуемого объекта контроля в ряде сечений. Плюсами компьютерной томографии в сравнении с традиционной рентгенографией являются:

1. Более высокая точность измерения геометрических соотношений;
2. Отсутствие теневых наложений на изображении;

3. Чувствительность на порядок выше, чем при обычной рентгенографии.

Метод компьютерной томографии в 1961 году предложил американский нейрорентгенолог William Oldendorf, а в 1963 году математик Allan M. Cormack провел лабораторные эксперименты по рентгеновской томографии и разработал метод выполнения реконструкции изображения [1, стр. 9].

Конструкция компьютерных томографов за годы их развития значительно изменилась. Выделяют пять поколений сканеров.

В томографических системах первого поколения, появившихся в 1973 году, имелась всего одна рентгеновская трубка и один детектор, которые совместно перемещались вдоль рамы. Контроль проводился в 160 различных положениях трубки, затем система поворачивалась на один градус. Сами измерения длились около 4,5 минут, а обработка полученных данных и реконструкция изображения на специальном компьютере занимали 2,5 часа. [1, стр. 9].

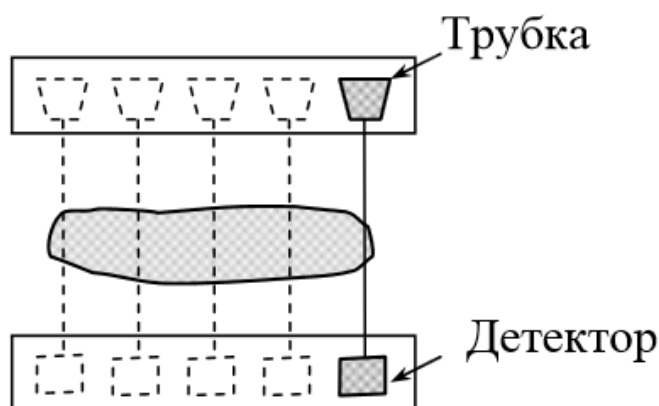


Рисунок 2- Томограф первого поколения.

Томографы следующего поколения (второго) имели несколько детекторов, снимающих показания синхронно. Пучок лучей был не остронаправленным, а веерным. Так же как и в томографах первого поколения, здесь использовалось параллельное сканирование, но угол поворота трубки увеличился от 1 до 30 градусов. Суммарное время экспозиции, необходимое для получения одного изображения, уменьшилось и составляло 20 секунд.

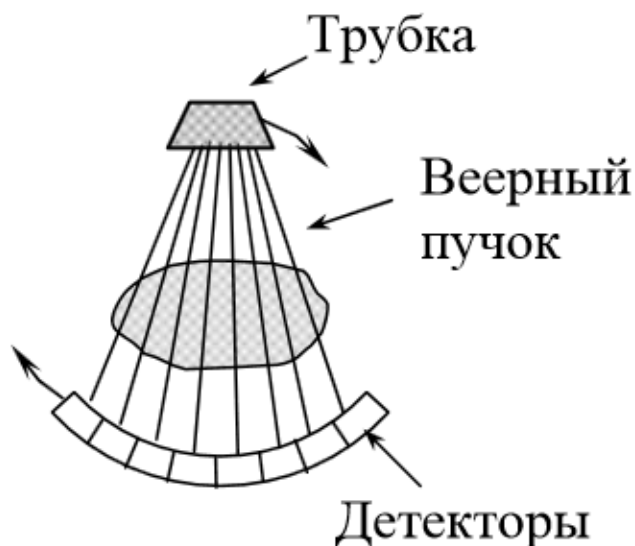


Рисунок 3 - Томограф второго поколения

В томографах третьего поколения рентгеновская трубка излучала веерный пучок на большое количество детекторов (около 700), расположенных по полуокружности. Модернизированная конструкция осуществила возможность непрерывного вращения источника излучения и детекторов на 360 градусов по часовой стрелке за счет использования кольца скольжения при подведении напряжения. Это позволило исключить стадию перемещения трубки и уменьшить время, необходимое для получения одного изображения до 10 секунд.

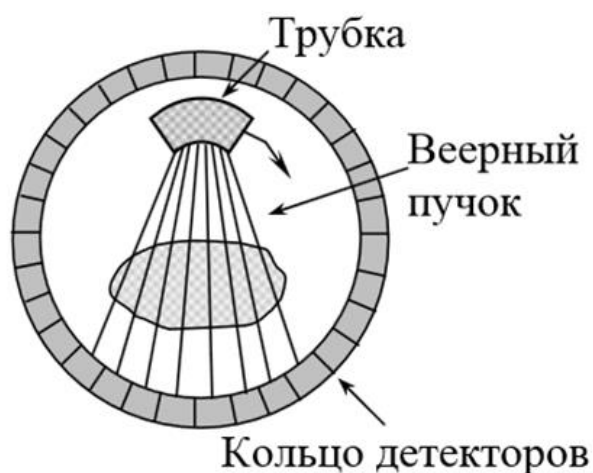


Рисунок 4 - Томограф третьего поколения.

В томографах четвертого поколения имелось сплошное неподвижное кольцо детекторов (1088 сцинтилляционных датчиков) и излучающая веерный пучок лучей рентгеновская трубка, вращающаяся вокруг пациента внутри кольца. Время сканирования для каждой проекции сократилось до 0,7 секунд, а

качество изображения улучшилось. В данных томографах необходимо учитывать влияние эффекта рассеяния при переносе излучения, которое в зависимости от энергии используемой источником может быть рэлеевским или комптоновским. [1, стр. 10].

Принцип работы томографии и получения изображения

Современную томографию без преувеличения считают всеволновой. В зависимости от типа поставленной задачи реконструкция объекта может основываться на регистрации пучков нейтронов, электронов, ионов или фотонов во всем диапазоне спектра. Источником излучения при этом может быть сам сторонний прибор или сам объект. Метод повышения информативности рентгенограммы предложил еще в 20-х годах французский врач Бокаж, а его идею вскоре реализовал на практике итальянский инженер Валлебона, назвавший созданный им аппарат томографом [2, стр. 10]. Суть идеи отражена на рисунке 5. Таким образом, если во время эксперимента перемещать в плоскостях любые два из основных трех компонентов (ИИ, ОК, фотопленка), оставляя неподвижным оставшийся, то на пленке даст четкое изображение только один из нескольких слоев, остальные размажутся. Регулируя скорость перемещений, получают различные слои и последовательно изучают структуру трехмерного объекта.

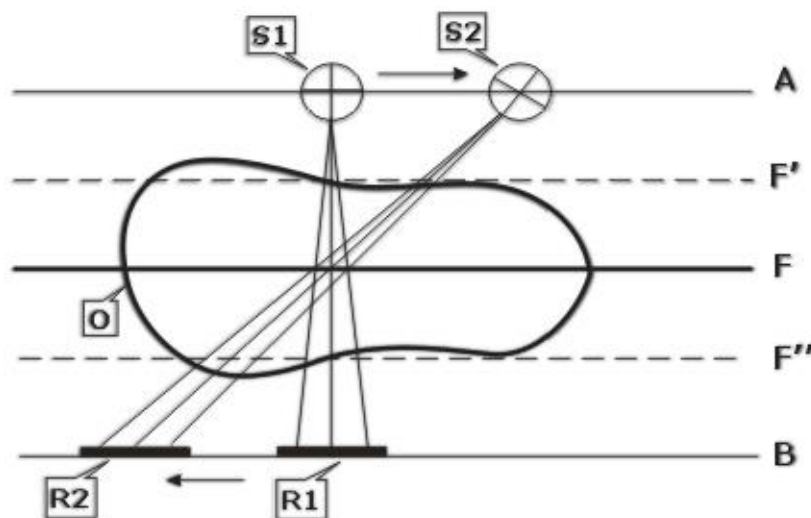


Рисунок 5 - Схема томографии по Бокажу.

III S1 перемещается в положение S2, в плоскости А, в то время как рентгеновская пленка R1 переходит в положение R2 (плоскость В). Резко воспроизводится плоскость F; детали объекта О, соответствующие плоскости F' и F'', размываются.

На настоящее время, вычислительная томография использует совершенно другой метод для получения интересующей нас проекции. Данный метод представлен на рисунке 6. Излучение рентгеновской трубки достаточно сколлимировано: диаметр пучка составляет порядка одного или нескольких миллиметров. Проходя через тело, каждый подобный луч, характеризуется ослаблением своей интенсивности, по сравнению с исходным лучом.

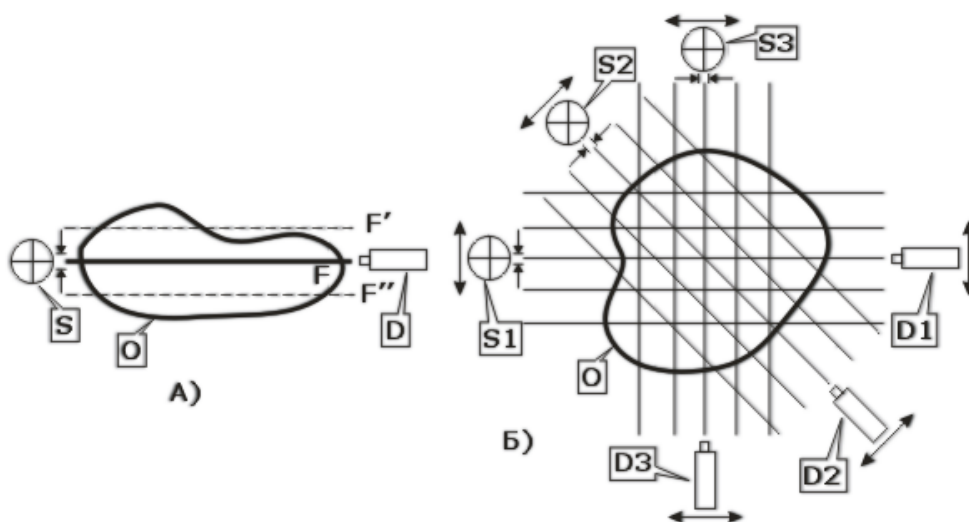


Рисунок 6 - Схема вычислительной томографии.

а) Сколлимированный пучок излучения проходит в плоскости F, ослабляется объектом О и регистрируется детектором D; влияние плоскостей F' и F'' полностью устранено. б) Вид на плоскость F сверху: источник и детектор перемещаются, образуя набор луч сумм и формируя проекцию. Затем происходит поворот на некоторый угол. Показано получение трёх проекций.

Далее, перемещая луч по определенному закону в выбранной плоскости (например, параллельно самому себе или веером с некоторым углом), получаем набор луч-сумм, определяющий одномерную проекцию. Для определенности говорят о параллельном смещении лучей; тогда одной проекции соответствует некоторый угол относительно выбранной системы отсчета. Поворачивая затем луч в той же плоскости на малый угол, повторяем

процесс регистрации луч-сумм и получаем новую проекцию и т. д. Процесс сканирования по углу продолжается до тех пор, пока полный угол поворота не составит 180° . В результате в памяти компьютера накапливается необходимая исходная информация для реконструкции изображения в выделенной плоскости (сечении). При этом отсутствуют какие-либо помехи в виде размытых элементов изображения, соответствующих другим плоскостям, и теоретически можно ожидать весьма высокого контраста томограммы. Возможность количественной оценки плотностей структурных элементов при использовании ЭВМ очевидна.

Одним из достоинств методов вычислительной томографии является то, что она создает большое разнообразие применяемых решений (технических, физических, математических) и это обеспечивает компьютерной томографии широчайшее поле использования. Задача восстановления внутренней структуры трехмерного объекта по полученному массиву его проекционных данных поставлена давно и на данный момент имеется большое количество различных методов решения.

Наиболее известные методы, которые получили наибольшее распространение в реконструкции изображения, принято разделять на два больших класса: аналитические методы и итерационные. Методы аналитические основаны на решениях точных математических уравнений реконструкции изображения. В основе многих из них используется аппараты преобразования Фурье и Радона. Методы итерационные для восстановления изображений объекта используют аппроксимирование массива ячеек равной плотности, представляющее собой случайные величины, которые связаны системой линейного алгебраического уравнения, свободными членами которого являются отсчеты на проекциях. Основное применение нашли аналитические методы. Их принято разделять на два больших класса: это двумерное восстановление Фурье и обратная проекция с фильтрацией сверткой.

В современных томографах чаще всего используют метод обратной проекции [2, стр. 25].

Смысл реализации метода приведён на рисунках 7 и 8. Рассмотрим пример, когда для восстановления используется только три проекции.

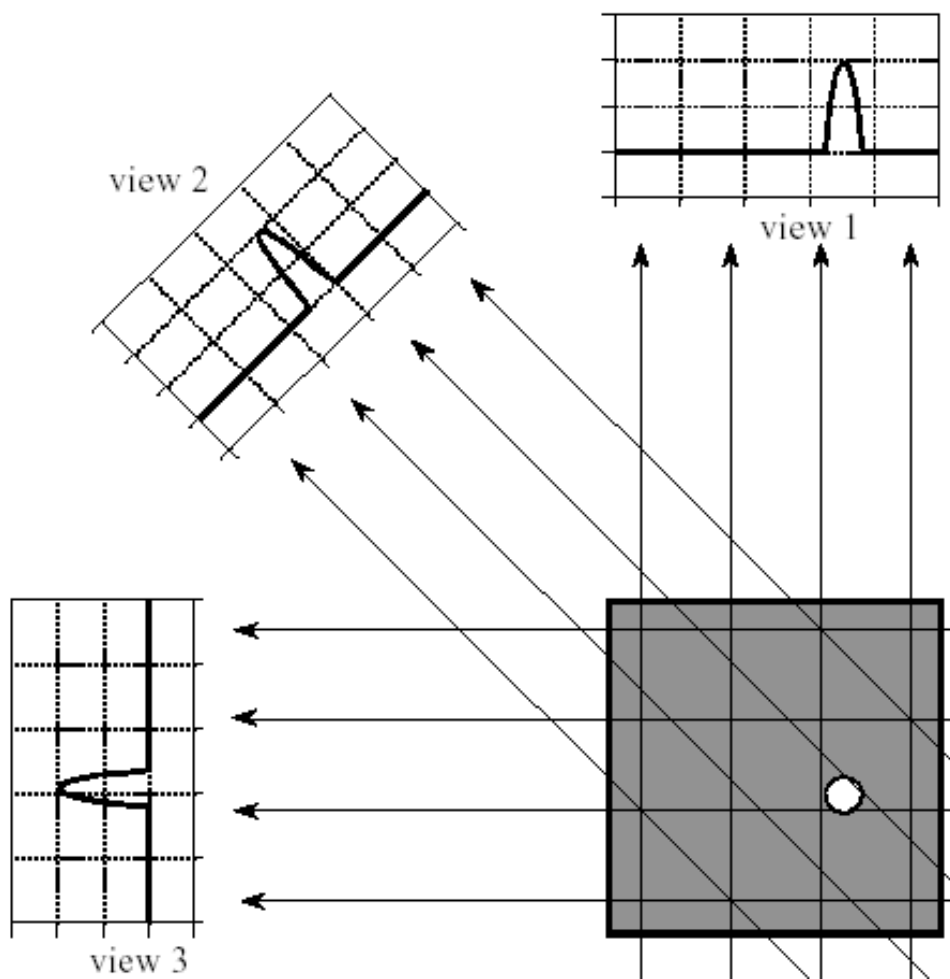


Рисунок 7 - Проекции, снятые с объекта

Первая проекция получается при просвечивании объекта контроля при положении 0 градусов (view 1);

Вторая проекция получается при некотором угле α , отличным от нуля; (view 2)

Третья проекция получается при некотором угле β , отличным от нуля и от α . (view 3)

Далее три проекции «размазываются» обратно на плоскость объекта контроля под углами, под которыми они были получены (0, α , β).

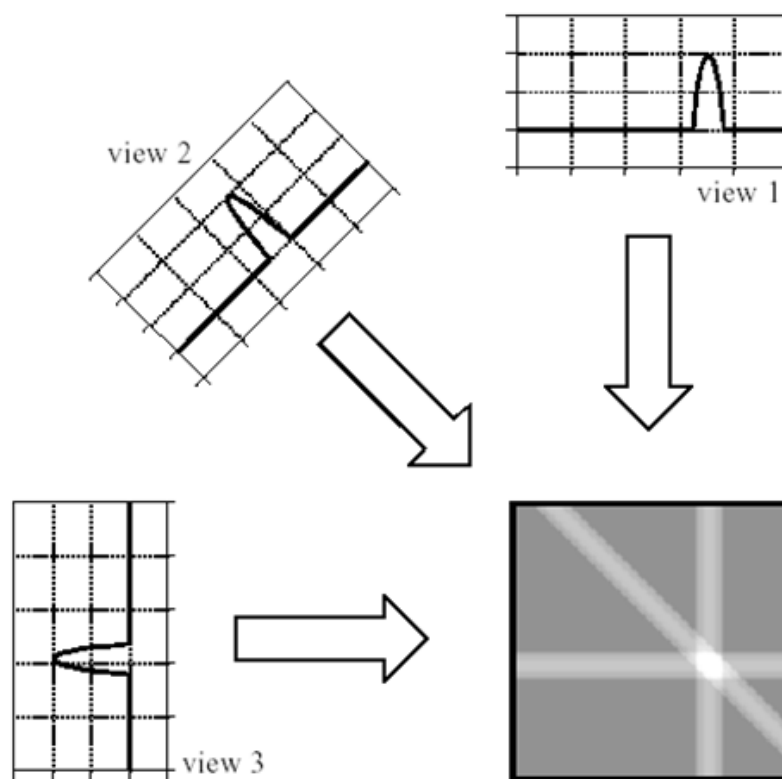


Рисунок 8 - Восстановление объекта (белого пятна) методом «обратной проекции»

Наглядно видно из рисунка 8, что восстановленное изображение содержит значительный ложный сигнал. Это происходит потому, что точки за пределами исходного объекта получают часть интенсивности спроецированного обратного сигнала. Кроме того, точки внутри объекта получают интенсивность составляющих сигнала от соседних точек, в результате чего небольшие перепады плотности не различаются. Предположим, что восстанавливаемый объект состоит из одной точки. Тогда результат восстановления по проекциям методом суммирования будет представлять собой не точку, а многолучевую звезду, центр которой находится в восстанавливаемой точке (рисунок 9).

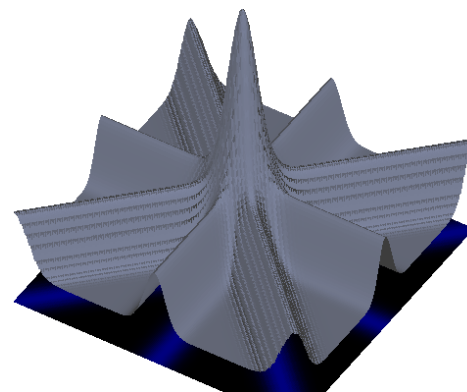
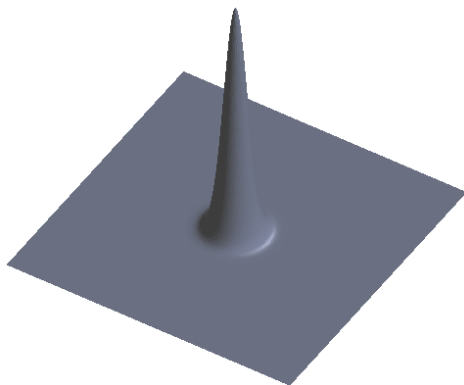
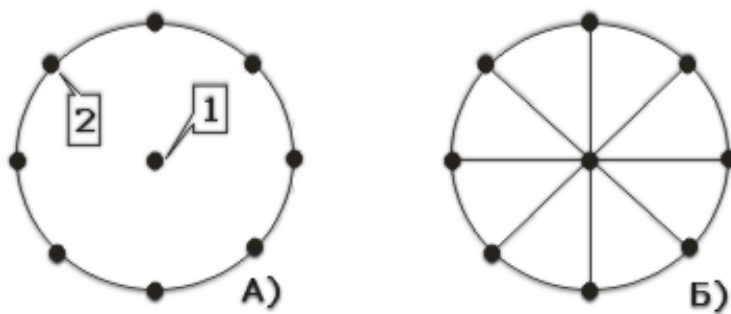


Рисунок 9 Восстановление точечного объекта методом "обратной проекции": а - объект (1) и его проекции (2); б - обратное проецирование; ясно видно формирование фона в пространстве, окружающем точку.

Очевидно, что точка будет представлена наиболее ярко, но в то же время на окружающее пространство эта точка будет накладывать фон, пропорциональный $1/\Gamma$, где Γ - расстояние от точки 1. Фон и является основным источником погрешностей, которые снижают достоинства этого метода. Для получения большей точности следует использовать метод обратной проекции со сверткой. В этом методе проекции до обратного проецирования сначала фильтруются.

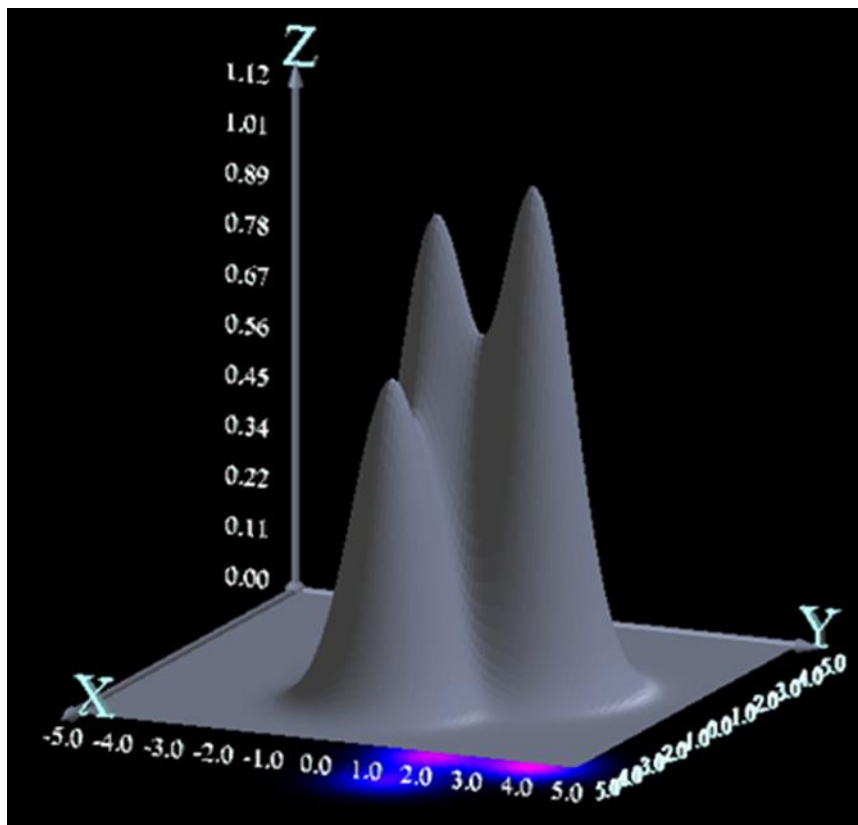


Рисунок 10. Созданная модель

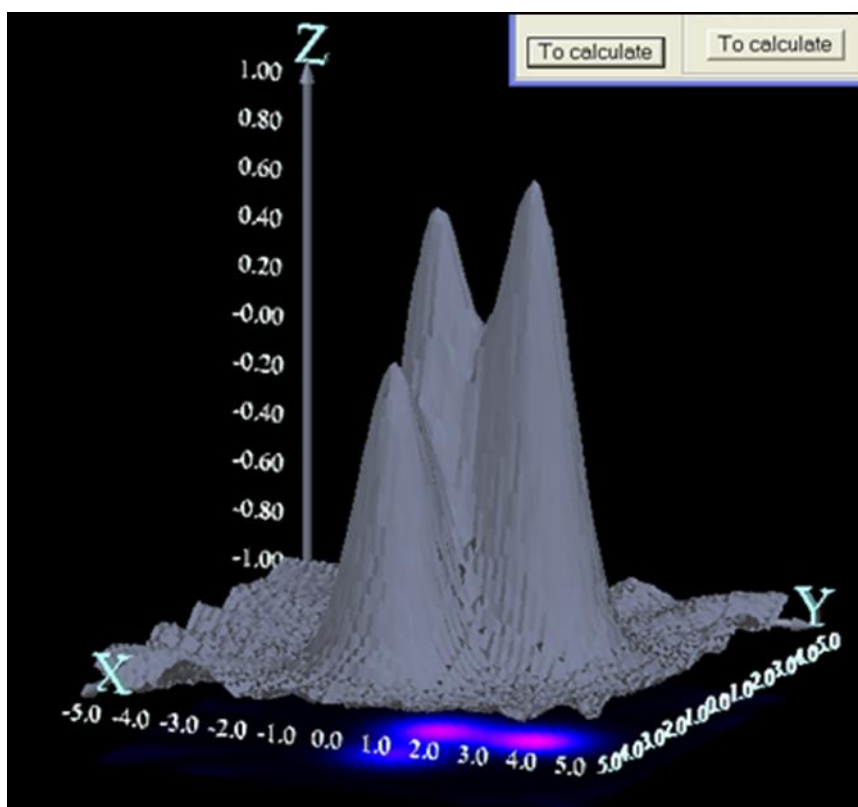


Рисунок 11. Метод обратной проекции с фильтрацией сверткой (погрешность: $\sim 6\%$)

4. Разработка системы томографического контроля. Результаты контроля

Для реализации процесса томографирования необходимы следующие элементы: система сбора проекционных данных, программное обеспечение для сбора данных, реконструкции, анализа. Для выполнения данной работы был использован рентгеновский томограф «ОРЕЛ-МТ»

4.1 Аппаратная часть системы

Рентгеновский томограф «ОРЕЛ-МТ» является совместной разработкой лаборатории №40 ИНК ТПУ и лаборатории Технических Средств Неразрушающего контроля МИРЭА (Москва). Томограф имеет следующие характеристики:

Таблица 1- Характеристики томографа «ОРЕЛ-МТ»

Основные технические характеристики:	
Простр.разрешение томограммы, мкм	до 5
Габариты объекта, мм	0.5-150
Масса объекта, кг	до 20
Габариты рабочей области, мм	1150x600x500
Рентгеновский аппарат,	РАП-150
Анодное напряжение, кВ	40-150
Анодный ток, мкА	до 100
Фокусное пятно, мкм	не более 50
Детектор-панель	PaxScan-2520V (Varian)
Размер пикселя, мкм	127
Рабочая область детектора, мм	193x242
Размер матрицы, пиксель	1900x1516

В качестве источника излучения использован рентгеновский аппарат XWT 160-TC (X-RAY WorX), Germany. Его характеристики:

- 1) Напряжение 20-160 кВ,
- 2) Три режима работы: мощный, микрофокусный, нанофокусный. Режимы отличаются мощностью и размером фокального пятна. Пятно, соответственно: 20 мкм, 3-5 мкм, 1 мкм. Мощности: до 10 Вт, до 4 Вт, до 1 Вт. Ток на мишени варьируется в зависимости от мощности. Например, при напряжении 100 кВ и режиме "микрофокус" (до 4 Вт), ток может быть от 1 до 40 мкА. При напряжении 50 кВ: от 1 мкА до 80 мкА.
- 3) Мишень - трансмиссионная. Вольфрам напылен на бериллиевую подложку.
- 4) Угол расхождения лучей - 160 градусов.
- 5) Минимальное расстояние "фокус-объект" - 0.25 мм
- 6) Система охлаждения отсутствует.

Для получения разноракурсных проекций объект контроля вращается с помощью вращающейся платформы M-061.PD Её характеристики:

Таблица 2 – Характеристики вращающейся платформы

Название характеристики	Значение
Диаметр платформы	100 мм
Диапазон угловых перемещений	> 360°
Минимальный шаг углового перемещения	17,5 мкрад (0,001°)
Люфт	200 мкрад
Точность поворотного позиционирования	50 мкрад
Максимальная скорость вращения	90 °/с

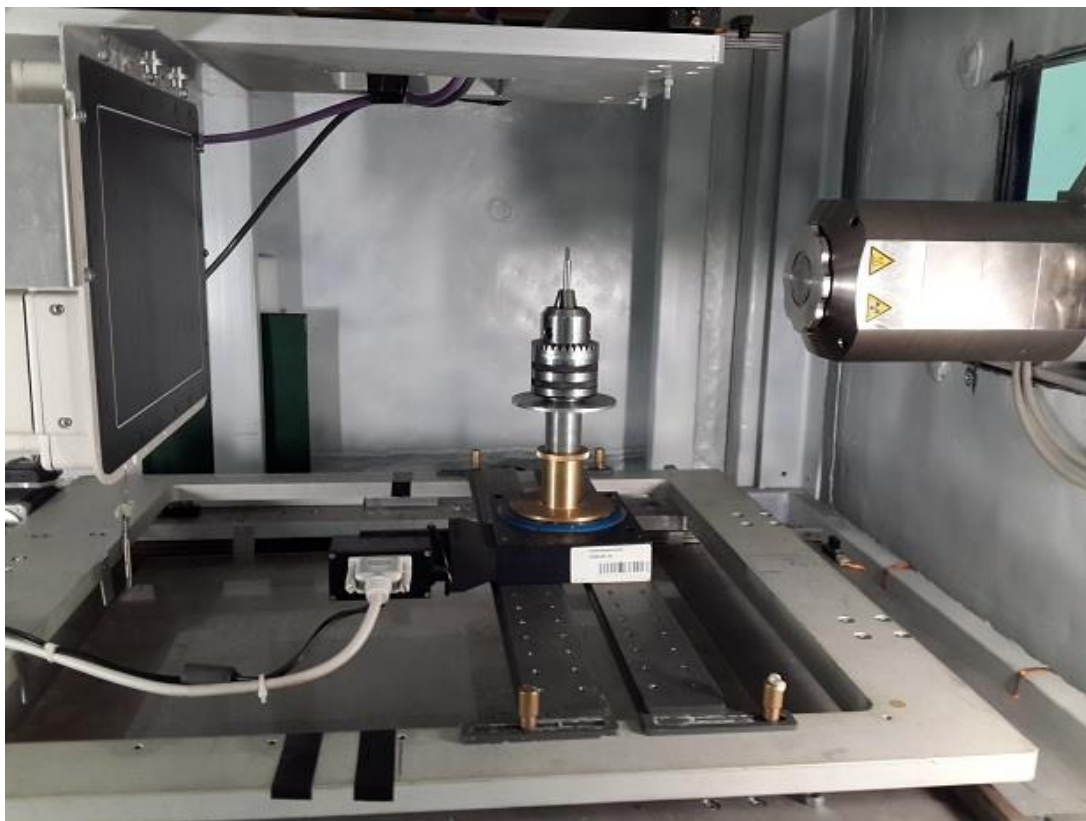


Рисунок 12- Детектор, объект контроля на подвижном вращающемся столике, рентгеновский аппарат.

4.2 Программное обеспечение.

Программное обеспечение томографа позволяет выполнять следующие операции:

1. Сбор проекционных данных:

uCT - программа для управления рентгеновской системой микро-томографии.

Первый шаг – включить приводы. Нажатие на **Вкл.всё** (Рис.13), включает приводы. Далее задаем шаг скорости – 5.

Далее – тренировка РАП. Сначала тренировка без излучения (без накала), потом с излучением (с накалом) (Рис.14)

Калибровка детектора (Рис. 15). Сначала калибровка без излучения, потом с излучением.

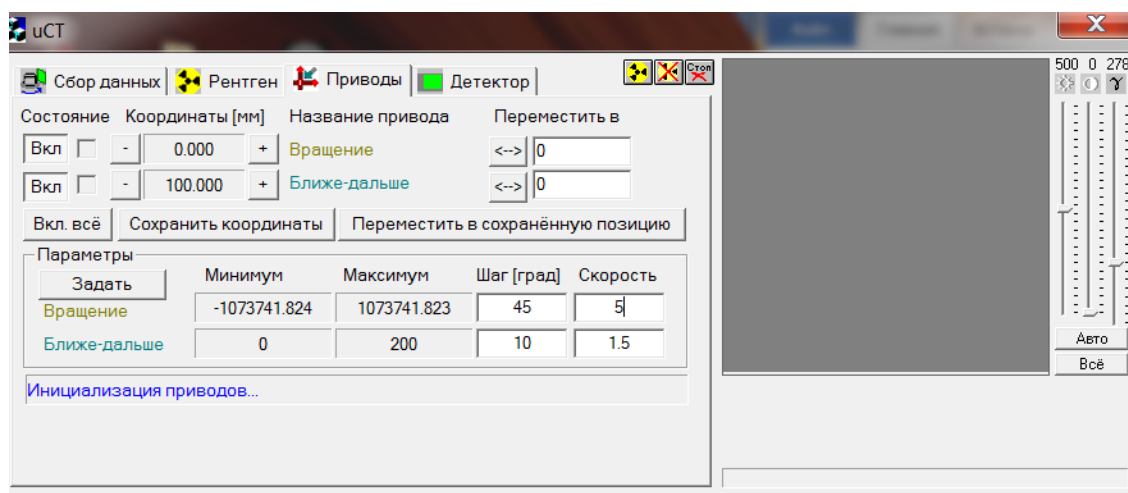


Рисунок 13 – Рабочее окно Приводы.

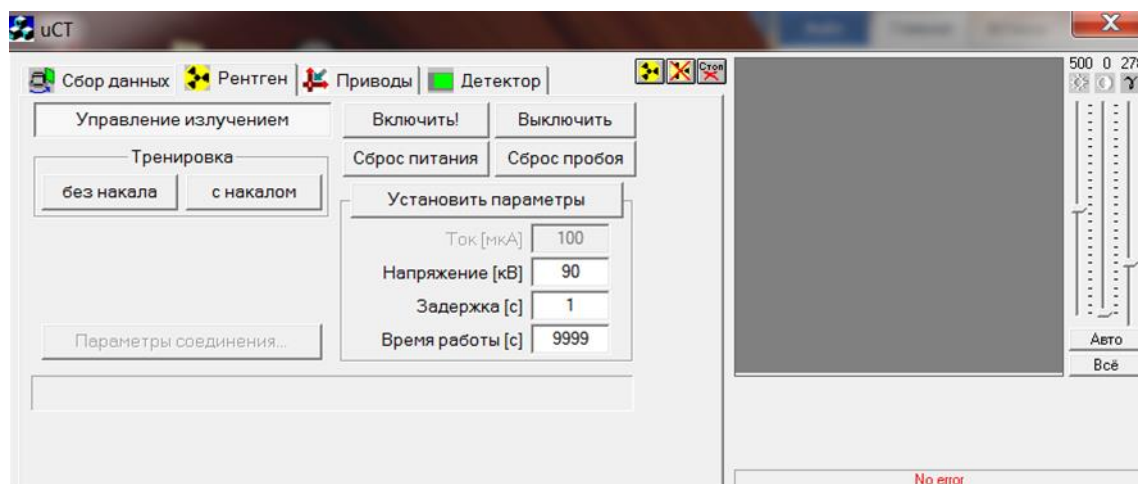


Рисунок 14 – Рабочее окно Рентген

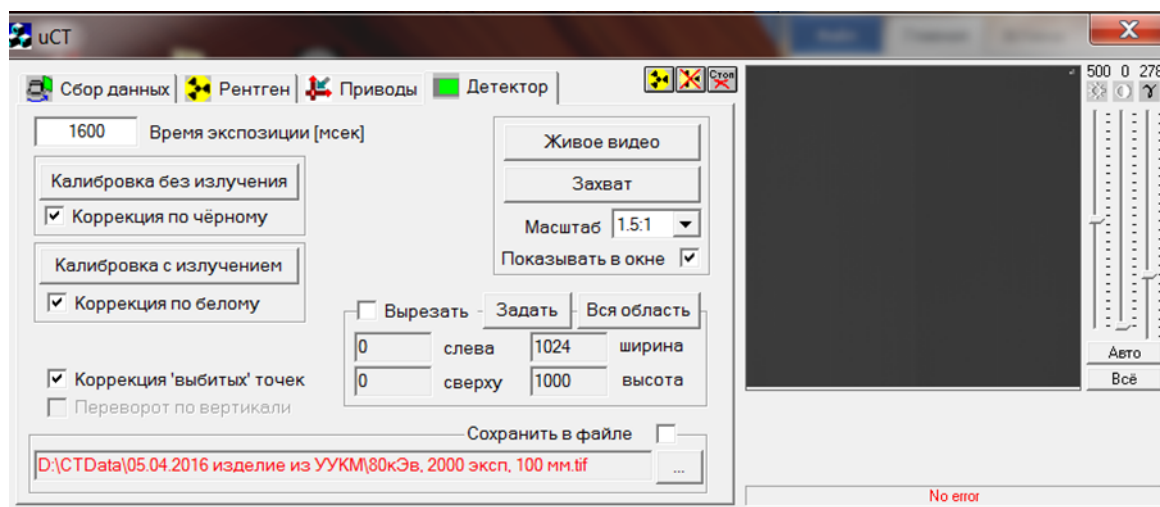


Рисунок 15 – Рабочее окно Детектор

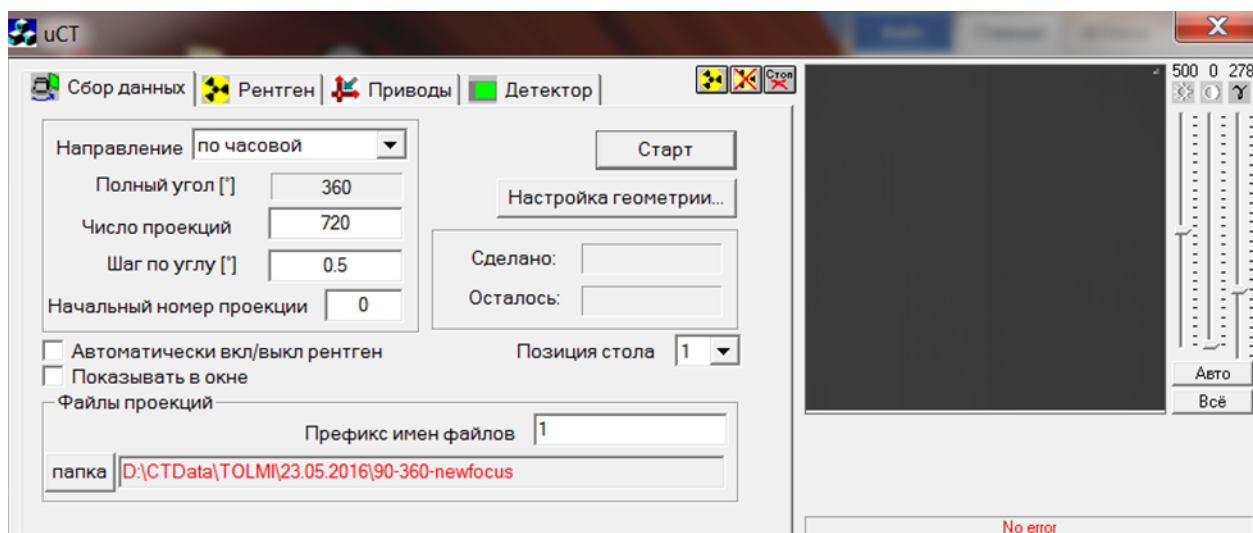


Рисунок 16- Рабочее окно Сбор Данных

После завершения этапов калибровки, тренировки, включения привода – начинается сбор данных. Основные изменяемые параметры сбора данных – Направление (почасовой или против), Число проекций, Шаг по углу, Папка (директория сохранения томограмм).

Для проведения реконструкции, получения 3D-моделей и количественного анализа используется комплекс программного обеспечения SkyScan. В данный комплекс входят следующие программы:

2. Программный пакет для трехмерной реконструкции- **NRecon**: реконструированные сечения могут быть сохранены в формате BMP, TIFF, JPG или числовом формате. Программа предусматривает коррекцию изменения спектра рентгеновского излучения при прохождении через объект, компенсацию кольцевых искажений, возможность реконструкции выделенной области и объектов превышающих поле сканирования. Пакетная обработка данных обеспечивает расчет задач с разными параметрами без участия

оператора.

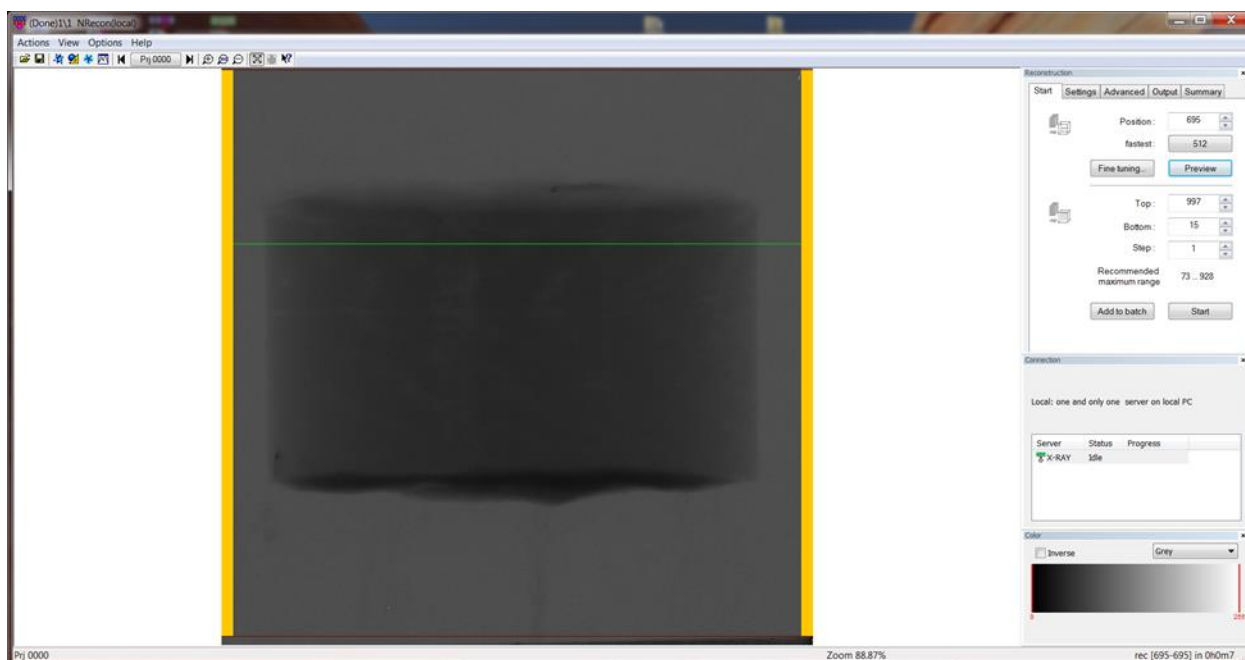


Рисунок 17 –Рабочее окно NRecon

- Программа визуализации реконструированных изображений в ортогональных сечениях с сохранением оригинального объема и разрешения – **Data Viewer:** данная программа предназначена для просмотра реконструированных сечений. Изображения могут выводиться послойно или в виде трех ортогональных сечений пересекающихся в любой точке образца. Сечения можно перемещать и вращать в любом направлении с помощью мыши.

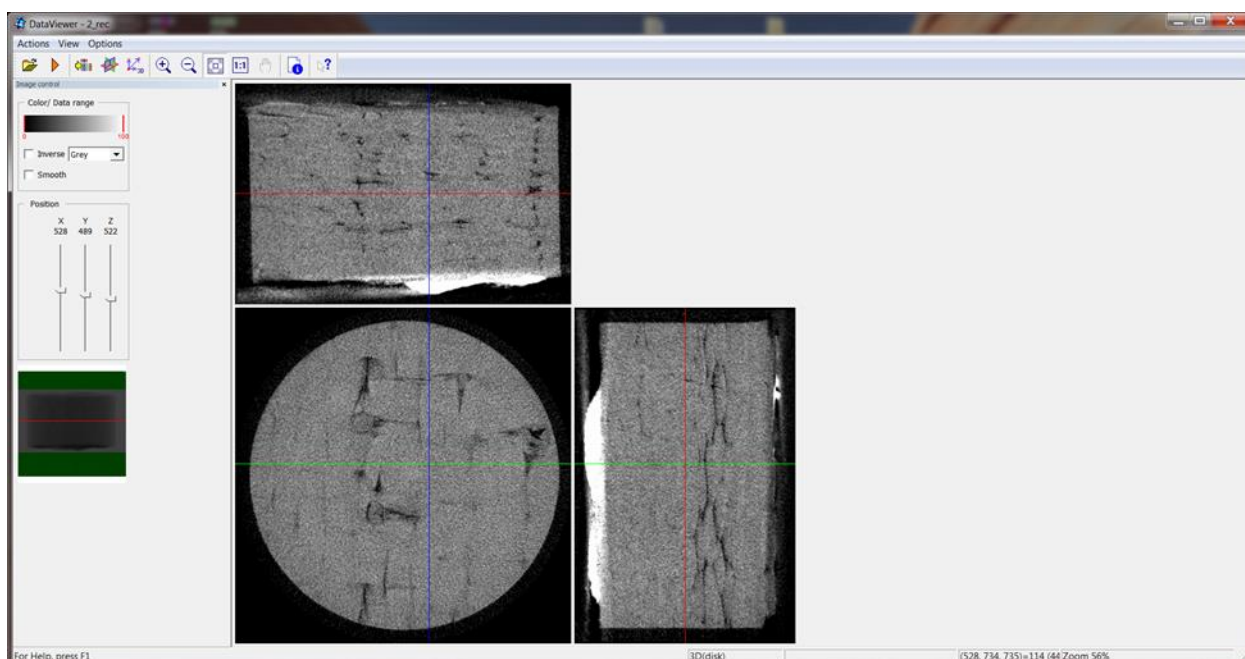


Рисунок 18 – Рабочее окно DataViewer

- Программа проведения точного детального анализа морфологических и плотностных характеристик – **СТан:** данная программа

позволяет проводить морфометрию и денситометрию исследованных объектов, выделение сегментов и их увеличение, а также измерения характеристик от величин пористости, до площади поверхности частей заданной плотности и любой сложной строения

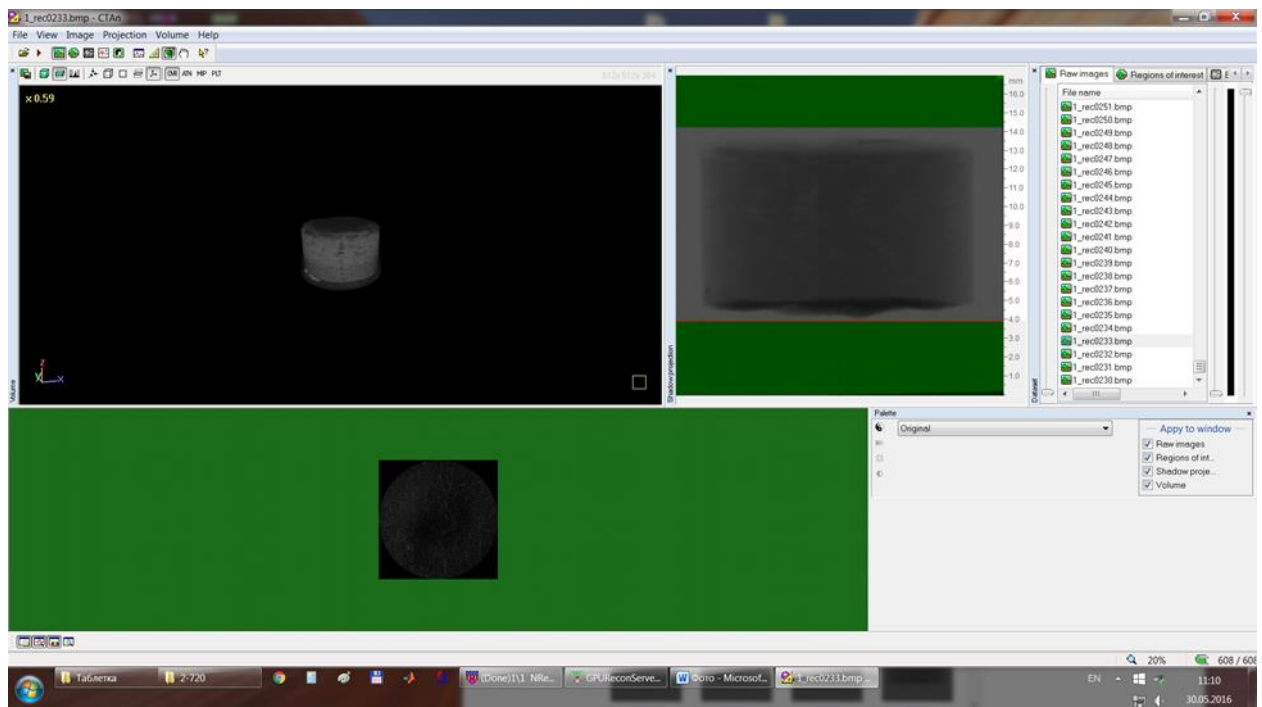


Рисунок 19 – Рабочее окно СТАп

- Программа объемного рендеринга – **CTVox**: программное обеспечение для объемной визуализации, основанное на технике объемного рендеринга отображает набор реконструированных срезов в трехмерные изображения.

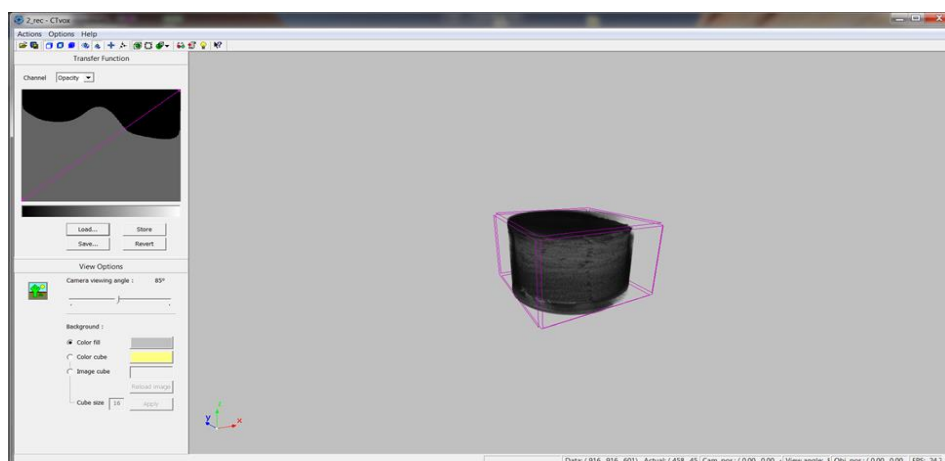


Рисунок 20 – рабочее окно CTVox

4.3 Разработка конструкции механизма перемещения

По требованию заказчика объем должен иметь размеры $0,2 \times 0,2 \times 8 \text{ мм}^3$. Для получения такой информации требуется перемещение объекта контроля по вертикали с шагом 8 мм. Необходимо провести томографирование каждого слоя высотой 8 мм. Для решения этого разработан механизм вертикального перемещения объекта, позволяющий одновременно вращать объект контроля.

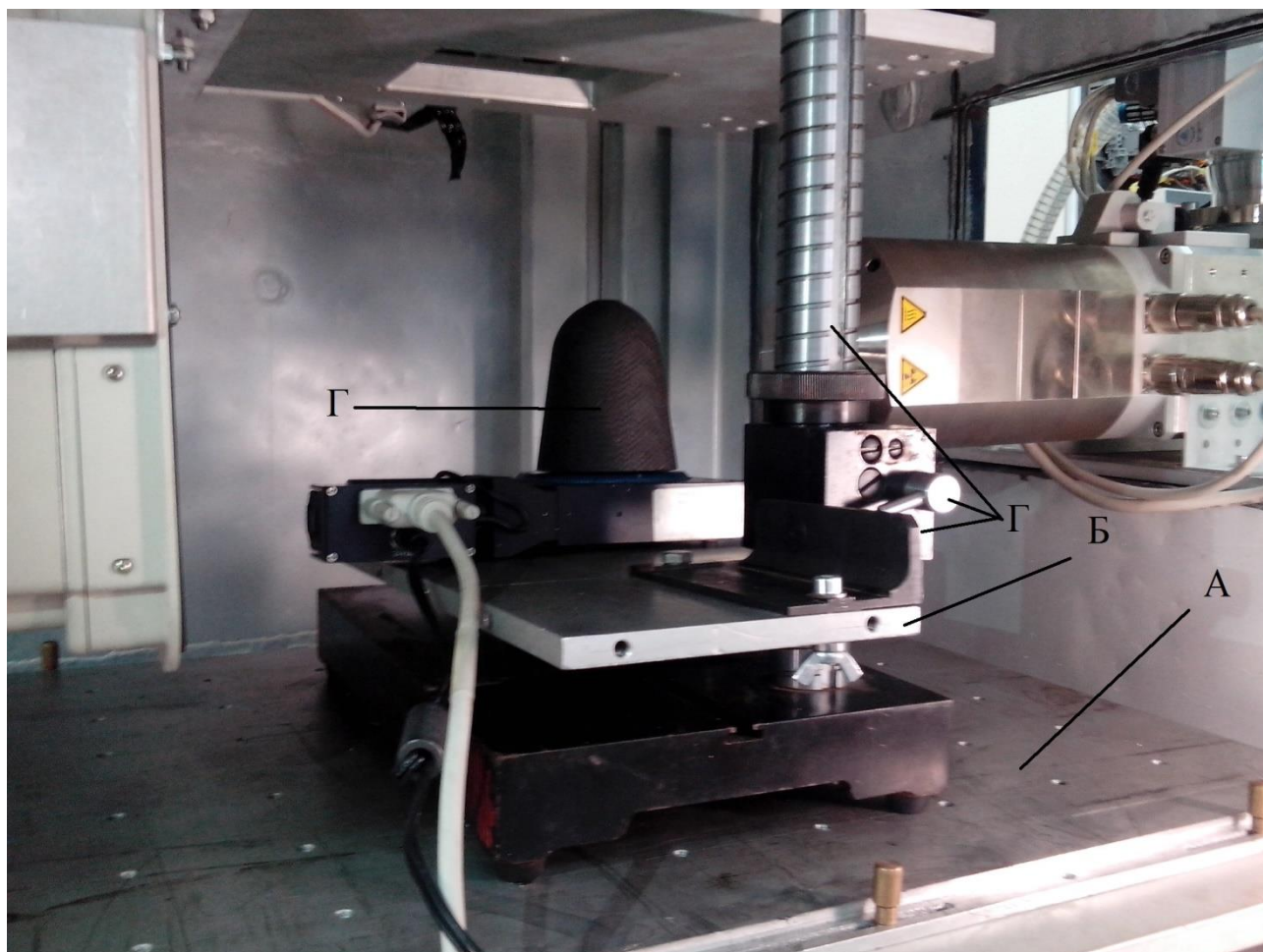


Рисунок 21–Механизм перемещения с установленным на нем механизмом вращения и объектом контроля.

Механизм перемещения состоит из нескольких основных элементов (рис.22): А – установочная платформа (рис. 23), Б – установочная платформа механизма вращения (рис.24.), В – механизм вертикального перемещения.

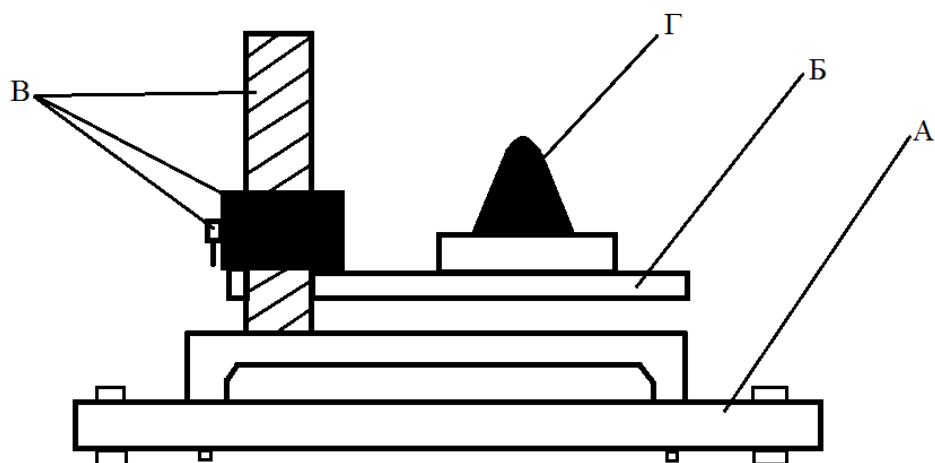


Рисунок 22 – Структурная схема механизма перемещения (Г-Объект контроля)

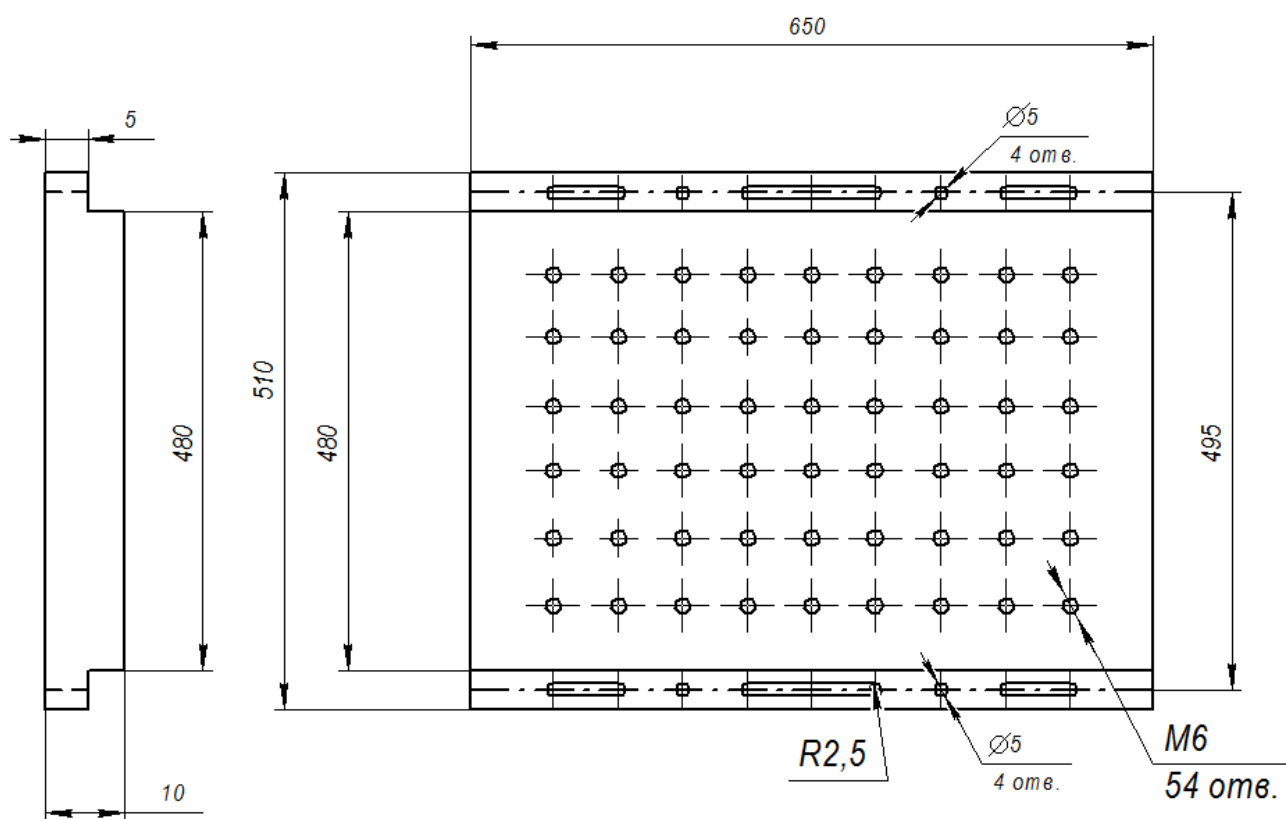


Рисунок 23 Установочная платформа

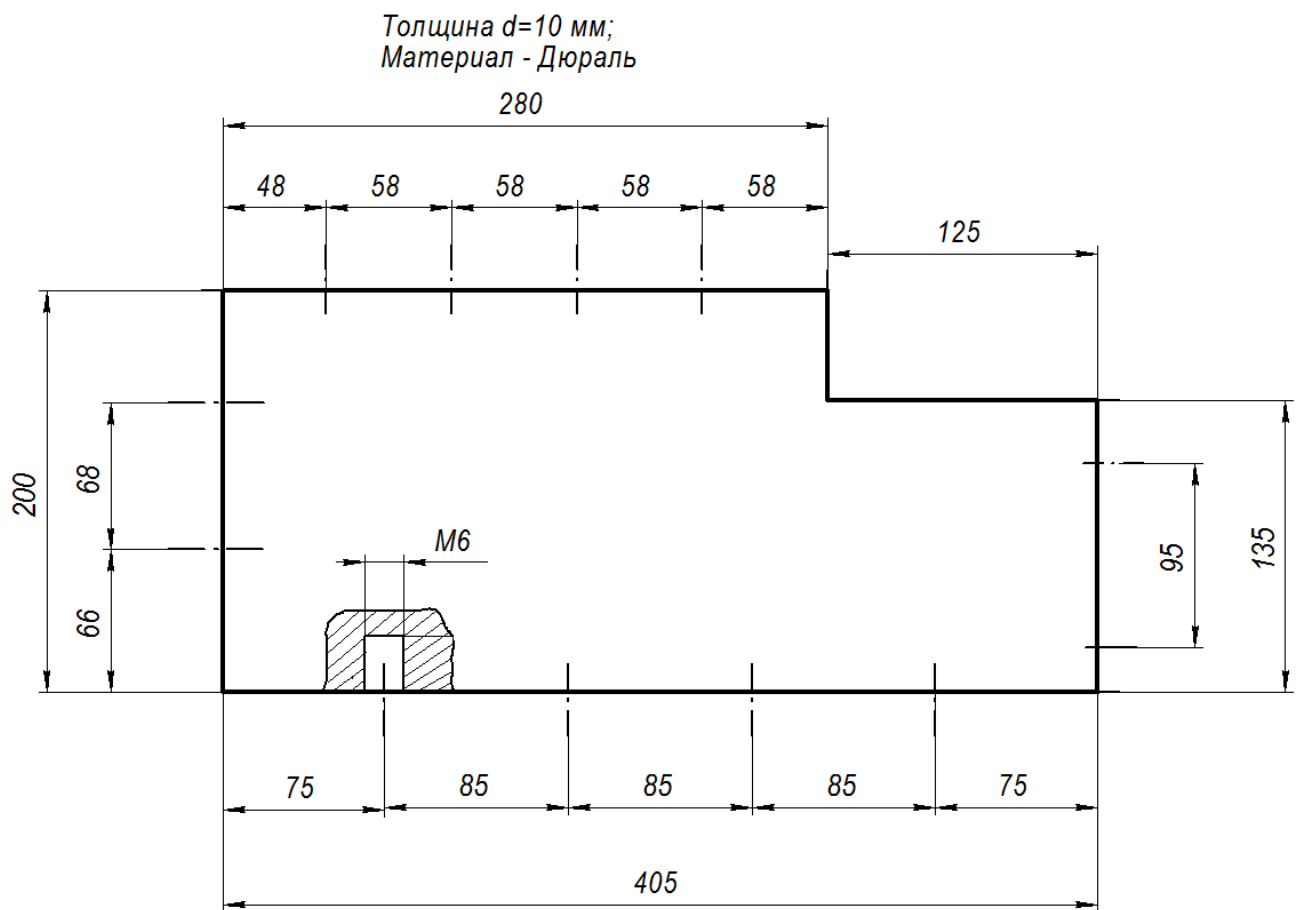


Рисунок 24 – Установочная платформа механизма вращения.

Полностью механизм перемещения обеспечивает следующие характеристики:

1. перемещение по оси X – 300 мм;
2. перемещение по оси Y – 300 мм;
3. перемещение по оси Z – 300 мм;
4. перемещение объекта вокруг оси вращения
5. погрешность механизма вращения –
6. минимальный шаг углового перемещения - $0,001^\circ$

4.4 Томографирование изделий из УУКМ

В соответствии с требованиями технического задания ТЗ 001/105-424-2013 должны быть выполнены следующие работы

- проведение компьютерной томографии изделий из УУКМ и обработка томографических данных путём среднестатистического осреднения в заданных объёмах локальных значений измеренных условных единиц плотности;
- перевод значений условных единиц плотности в значения физической плотности.
- результаты испытаний должны быть привязаны к цилиндрической системе координат;
- контролю подлежат изделия:
 1. Заготовки из базового УУКМ типа 39п7.001 (рис.
 2. Заготовки из УУКМ типа 4КМС-Л

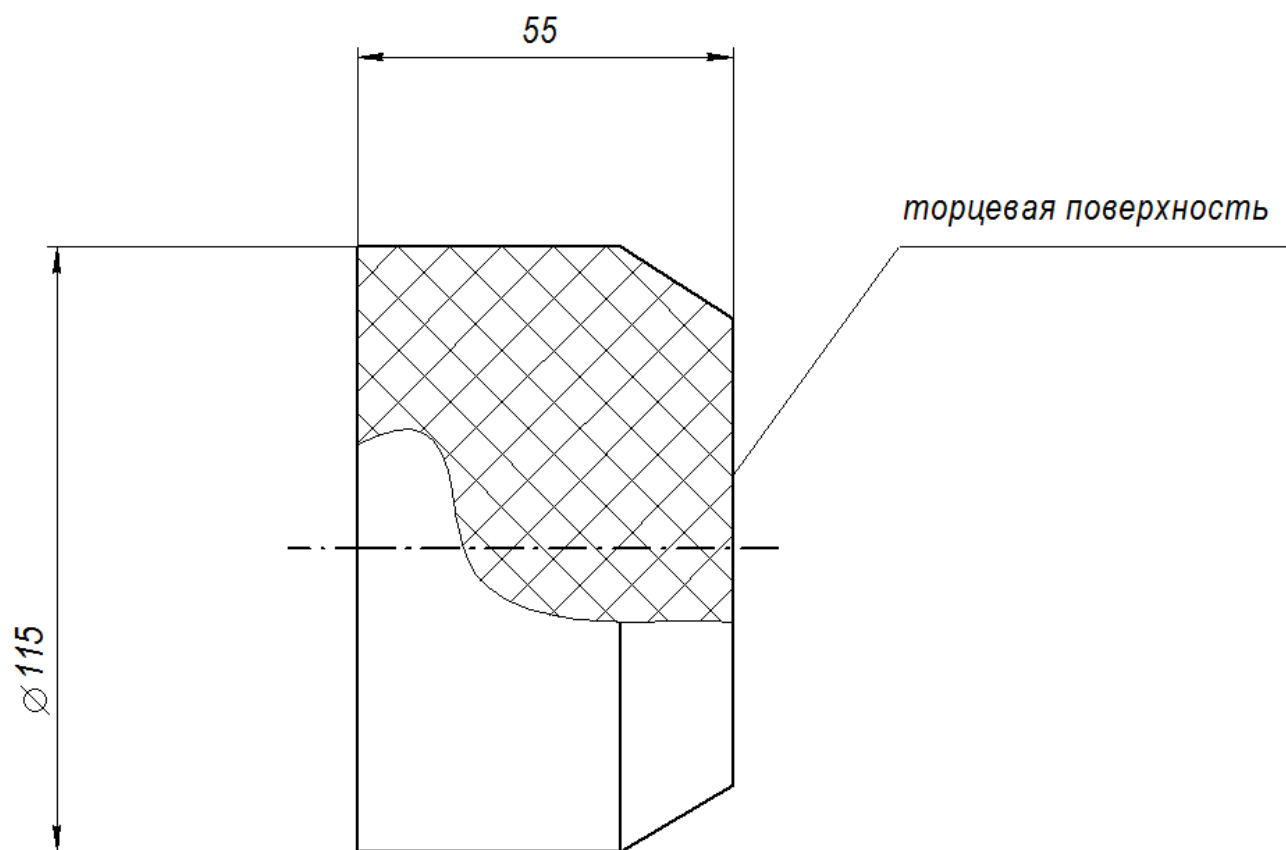


Рисунок 25— образец 39п7.001

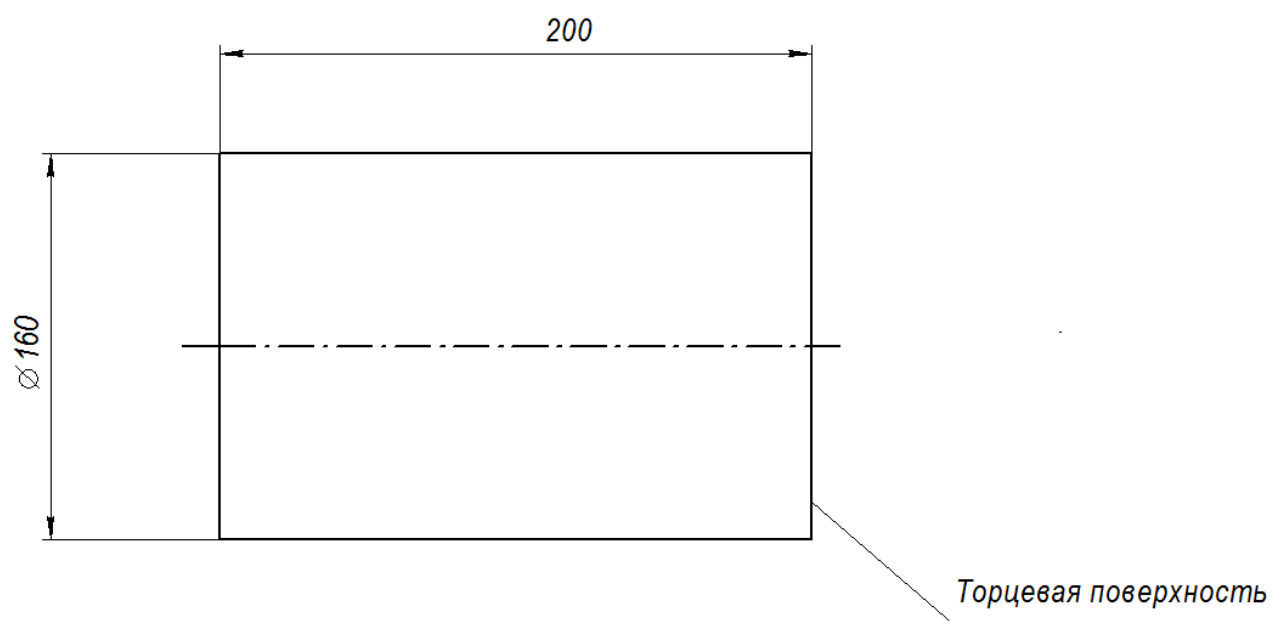


Рисунок 26 – Образец из материала 4КМС-Л

Томографирование проводится сканированием в слоях толщиной 8 мм (условное название – скан), перпендикулярно продольной оси образца, начиная от торцевой поверхности с 1.

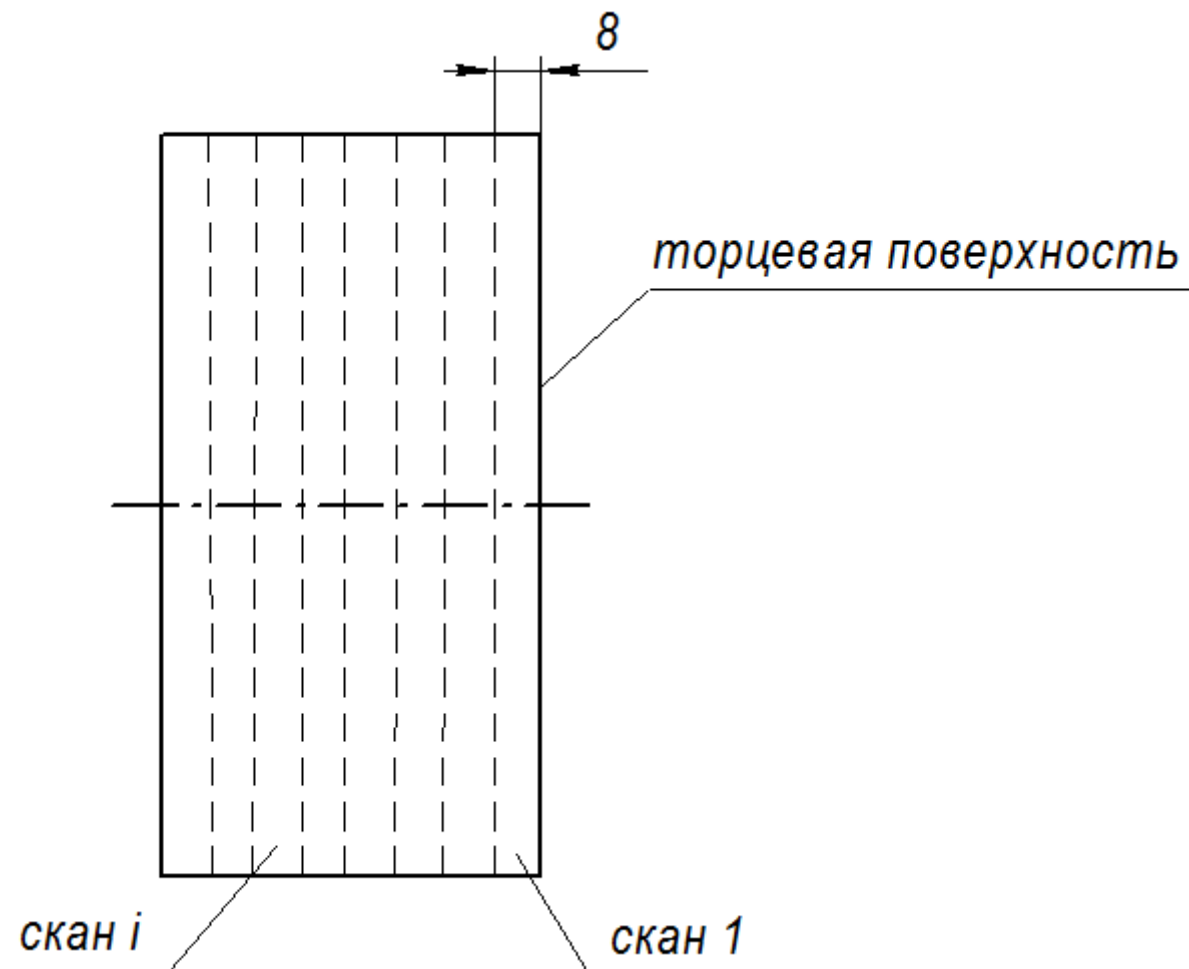


Рисунок 27 – деление образца на «сканы»

i – номер скана по высоте.

В соответствии с ТЗ должны быть выполнены осреднения:

- первичное осреднение – осреднение в пределах одного «скана» высотой 8 мм, т.е. в объеме $0,2 \times 0,2 \times 8 \text{ мм}^3$
- вторичное осреднение – осреднение по цилиндрам толщиной 6 мм в пределах одного «скана»

Первичное осреднение

Координаты объёма осреднения в пределах одного скана задаются параметрами:

i – номер слоя (скана);

r – радиус;

φ – угол;

Таким образом, элементарный объём:

$$V(i, r, \varphi) \text{ (0.2 x 0.2 x 8.0 мм}^3\text{)}$$

Распределение средней плотности в элементарном объёме $V(i, r, \varphi)$ обозначим как: $\Psi(i, r, \varphi)$ (1)

Для каждого i параметры r и φ изменяются в пределах:

$$r = 0..R$$

$$\varphi = 0..360^\circ$$

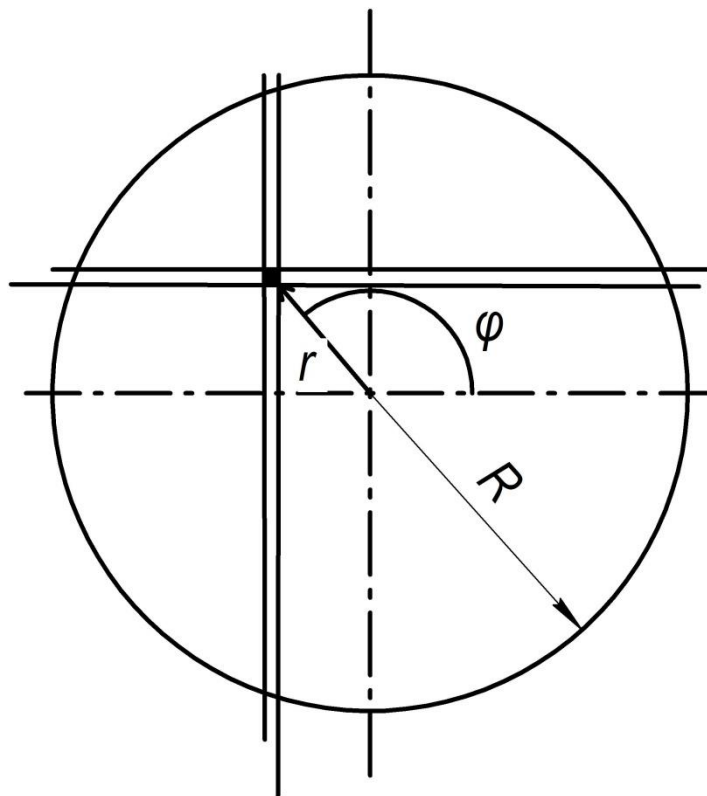


Рисунок 28– Элементарный объём

Вторичное осреднение в цилиндрах

Вторичное осреднение первичных томографических данных производится в более крупных, чем элементарные, объёмах. Его цель получить среднее значение плотности в концентрических цилиндрах (рисунок 29), имеющих толщину стенки 6 мм.

Таким образом, главной задачей является определение средней плотности в массиве данных, образованных, концентрическим цилиндром с толщиной стенки 6 мм. Применяя заданное ранее определение элементарного объёма (1) выведем формулу:

$$\overline{\Psi}_{i,j}[\Psi(i,r,\varphi)] = \int_0^{2\pi} \int_{R_{j-1}}^{R_j} \Psi(i,r,\varphi) d\varphi dr \quad (2)$$

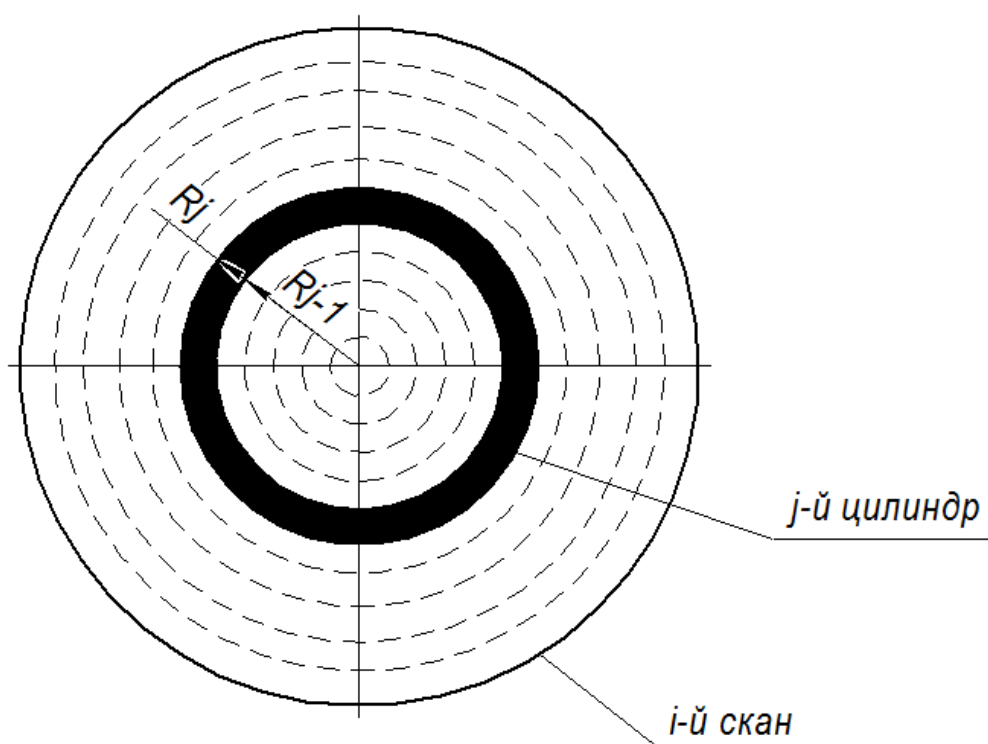


Рисунок 29 – формирование цилиндрических объёмов.

Вторичное осреднение в угловых секторах:

Данный вид осреднения позволяет определить неоднородность материала по окружности цилиндра, т.е. степень разбалансированности каждого цилиндра. Осреднение проводится в каждом скане в секторах с центральным углом 15° (рисунок 30)

Количество секторов = 24

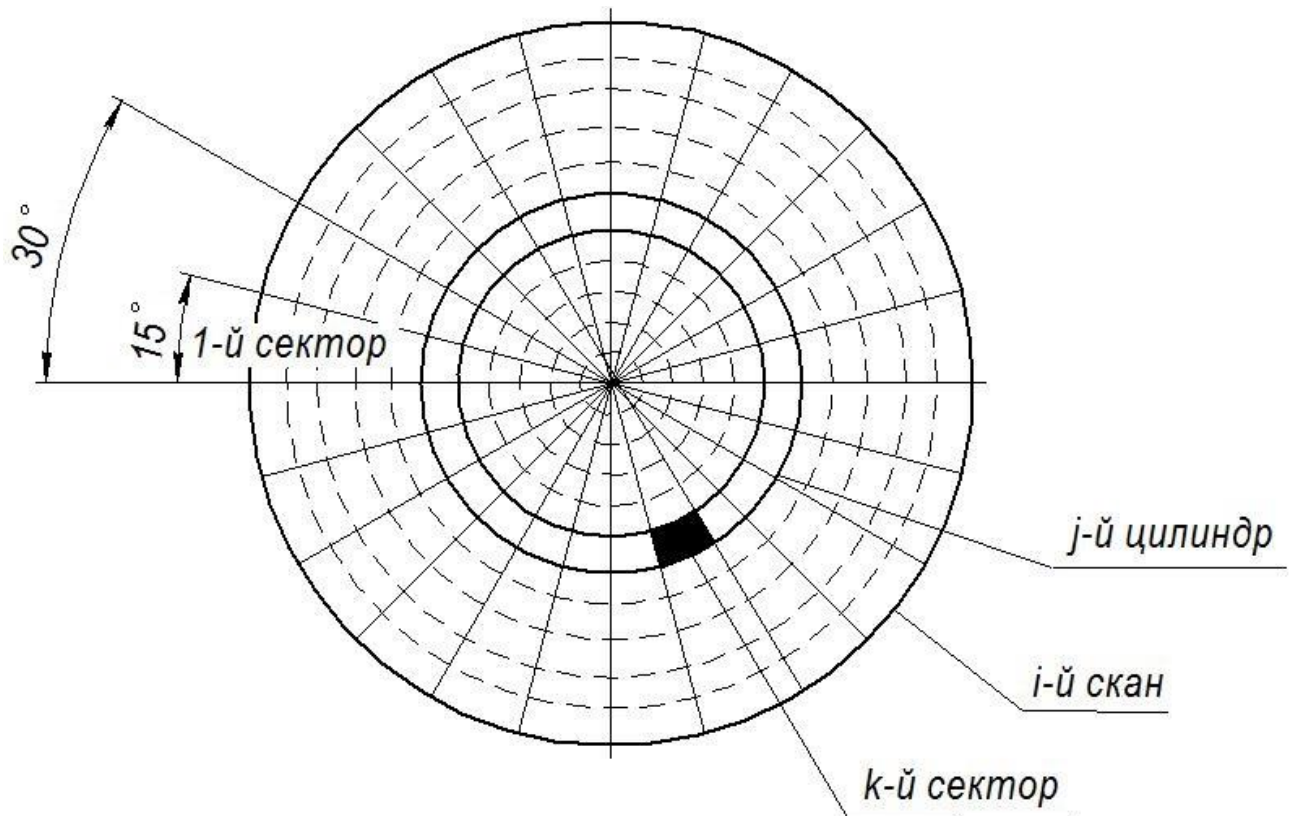


Рисунок 30 - формирование объёмов в угловых секторах

Формула для расчета плотности:

$$\overline{\Psi}_{i,j}[\Psi(i,r,\varphi)] = \int_{R-1}^R \int_{k-1}^k \Psi(i,r,\varphi) d\varphi dr \quad (3)$$

4.5 Образцы из материала УУКМ. Результаты контроля.

Для исследования возможности томографирования описанных выше изделий по ТУ была проведена экспериментальная проверка томографии изделий из УУКМ на примере контрольных образцов из этого материала. Каждый эксперимент имеет свои параметры: параметры сбора данных, параметры реконструкции. В ПО SkyScan все эти данные хранятся в log- файле.

Образец УУКМ («таблетка») с размерами: диаметр 15 мм, высота 10мм

Log-файл :

[System]

Scanner=OREL - наименование сканера

Instrument S/N=10H03060 - серийный номер сканера

Software=Version 1.1 (build 3) - версия программы

Home Directory=C:\ - домашняя директория

Source Type=RTW 60/100 - тип источника

Camera=SHT MR285MC - детектор

Camera Pixel Size (um)=96 - размер пикселя

CameraXYRatio=1.024 - отклонение X/Y для детектора

[Acquisition] - сбор проекционных данных

Data Directory=D:\CTData\07.04.2016 изделие из УУКМ\2-720 -
директория данных

Filename Prefix=2 - наименование префикса

Number Of Files=720 - количество проекций

Number Of Rows=1000 - количество строк (т.е. количество интервалов по
У)

Number Of Columns=1024 - количество столбцов (т.е количество
интервалов по Х)

Optical Axis (line)=512 - слои на матрице

Object to Source (mm)=60.000000 - расстояние ИИ-ОК

Camera to Source (mm)=338.000000 - расстояние ИИ-матрица
 Source Voltage (kV)=60 - напряжение трубки
 Source Current (uA)=100 - ток трубки
 Image Pixel Size (um)=17.04 - размер пикселя изображения
 Image Format=TIFF - формат изображения
 Depth (bits)=16 - разрядность данных
 Screen LUT=0 - регулирование LUT изображения на экране
 Exposure (ms)=1000 - экспозиция
 Rotation Step (deg)=0.500 - шаг вращения в градусах
 Use 360 Rotation=YES - использовать вращение на 360 градусов
 Scanning position=0 mm - позиция сканирования
 Flat Field Correction=ON - коррекция ровности поля
 Frame Averaging=ON (3) - осреднение изображений
 Sharpening (%)=40 - резкость
 Random Movement=OFF - случайные движения
 Geometrical Correction=ON - коррекция геометрии
 Filter=no filter - использование фильтра
 Rotation Direction=CC - направление вращения
 Type of Detector Motion=STEP AND SHOOT - тип движения детектора
 Scanning Trajectory=ROUND - траектория сканирования
 Number of connected scans=1 - количество подключенных сканов
 Study Date and Time=Apr 07, 2016 11:17:12 - дата и время
 Scan duration=00:06:13 - длительность сканирования
 [Reconstruction] - реконструкция
 Reconstruction Program=NRecon - программа реконструкции
 Program Version=Version: 1.6.10.4 - версия программы реконструкции
 Program Home Directory=C:\OREL\NreconServerLocal64 -
 местоположение программы

Reconstruction engine=NReconServer - сервер реконструкции

Engine version=Version: 1.6.10 - версия сервера реконструкции

Reconstruction from batch=No - реконструировать только часть

Postalignment=-12.50 - смещение по оси

Reconstruction servers= X-RAY - наименование сервера реконструкции

Reconstruction mode=Standard - режим реконструкции

Dataset Origin=OREL- томограф

Dataset Prefix=2 - префикс датасета

Dataset Directory=D:\CTData\07.04.2016 изделие из УУКМ\2-720 -
директория датасета

Output Directory=D:\CTData\07.04.2016 изделие из УУКМ\2-720\2_Rec -
директория, где сохраняются результаты реконструкции

Time and Date=Apr 07, 2016 12:24:48 - дата и время

First Section=222 - первое сечение

Last Section=822 - последнее сечение

Reconstruction duration per slice (seconds)=0.349418 - время
реконструкции одного слоя

Total reconstruction time (601 slices) in seconds=210.000000 - полное время
реконструкции

Section to Section Step=1 - шаг от слоя к слою

Sections Count=601 - количество слоев

Result File Type=BMP - формат конечных файлов

Result File Header Length (bytes)=1134 - размер в байтах

Result Image Width (pixels)=916 - ширина реконструированного
изображения

Result Image Height (pixels)=916 - высота реконструированного
изображения

Pixel Size (um)=17.04000 - размер пикселя

Reconstruction Angular Range (deg)=197.00 - угловая область
реконструкции

Use 180+=ON - поворот более чем на 180 градусов

Starting view of 180+ reconstruction=0 - старт обзора с 180+

Angular Step (deg)=0.5000 - шаг по углу

Smoothing=4 - сглаживание

Smoothing kernel=2 (Gaussian) - сглаживание ядра

Ring Artifact Correction=14 - коррекция круговых артефактов

Draw Scales=OFF - рисовать сечения

Object Bigger than FOV=OFF - объект больше чем поле обзора

Reconstruction from ROI=ON - реконструировать из Области интереса (Region of Interest)

ROI Top (pixels)=955

ROI Bottom (pixels)=39

ROI Left (pixels)=29 - размер ROI

ROI Right (pixels)=945

ROI reference length=1024

Filter cutoff relative to Nyquist frequency=100 - фильтрация по частоте Найквиста

Filter type=0 - тип фильтра

Filter type description=Hamming (Alpha=0.54) - описание фильтра (Hamming Window)

Threshold for defect pixel mask (%)=20 - убирать дефектные пиксели

Beam Hardening Correction (%)=20 - коррекция луча

Cone-beam Angle Horiz.(deg)=16.546564 - угол конуса по горизонтали

Cone-beam Angle Vert.(deg)=16.163937 - угол конуса по вертикали

Результаты контроля представлены на Рисунках

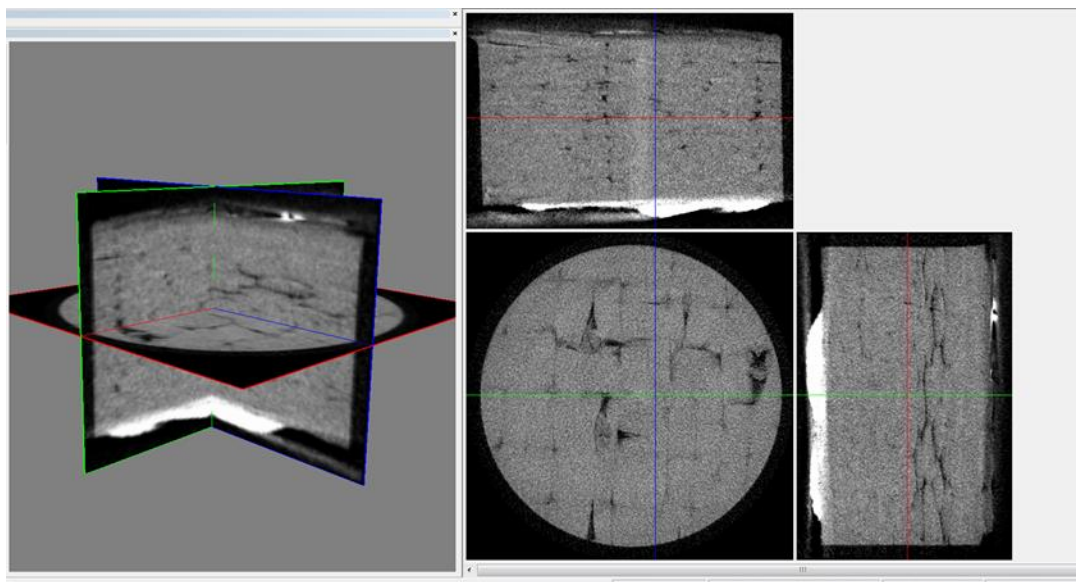


Рисунок 29 – Сечения контрольного образца

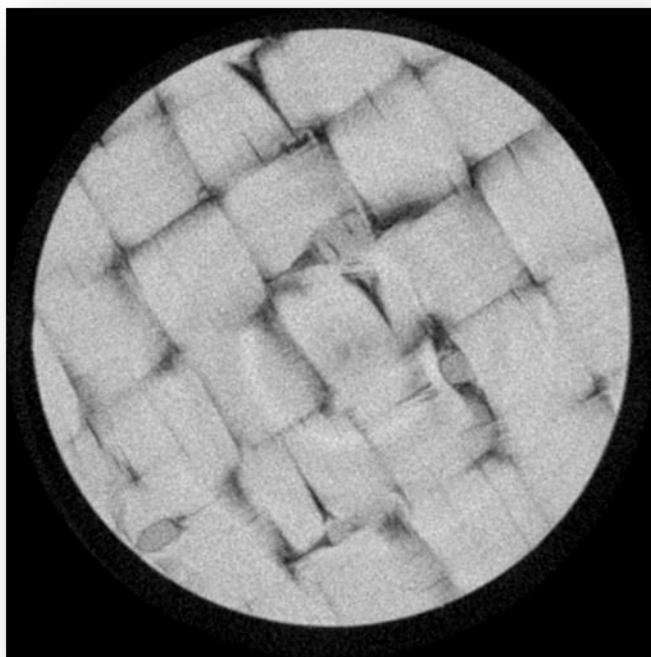


Рисунок 30– Внутреннее сечение образца из УУКМ. Хорошо различимы углеродные стержни и видны нити, из которых они состоят.

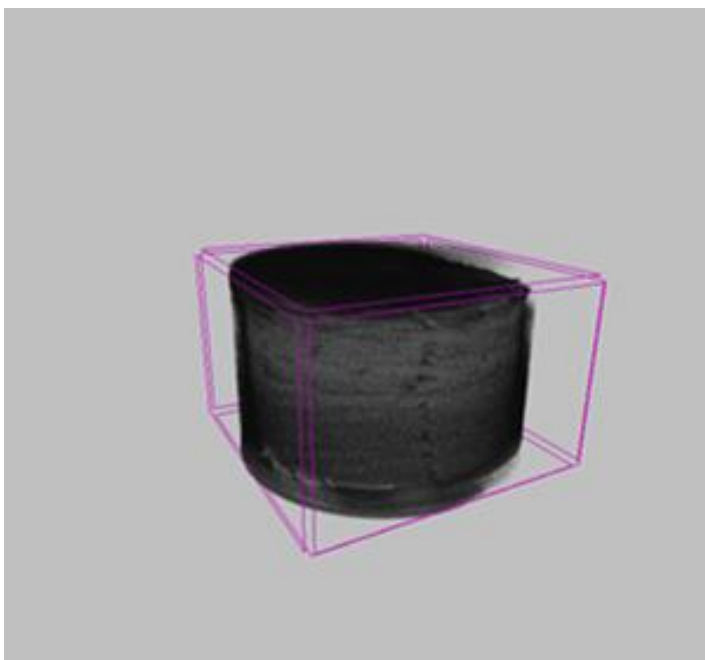


Рисунок 31– 3D-модель, созданная при помощи NRecon CTVox.

В приложении ВКР на дисковом носителе **CD-VKR** расположен файл **1movie.avi** – данный видеоролик демонстрирует 3D-модель под различными углами и вырезами

Проведено также исследование распределения плотности в готовом наконечнике боевого блока из УУКМ. Log – файл в **приложении А**.

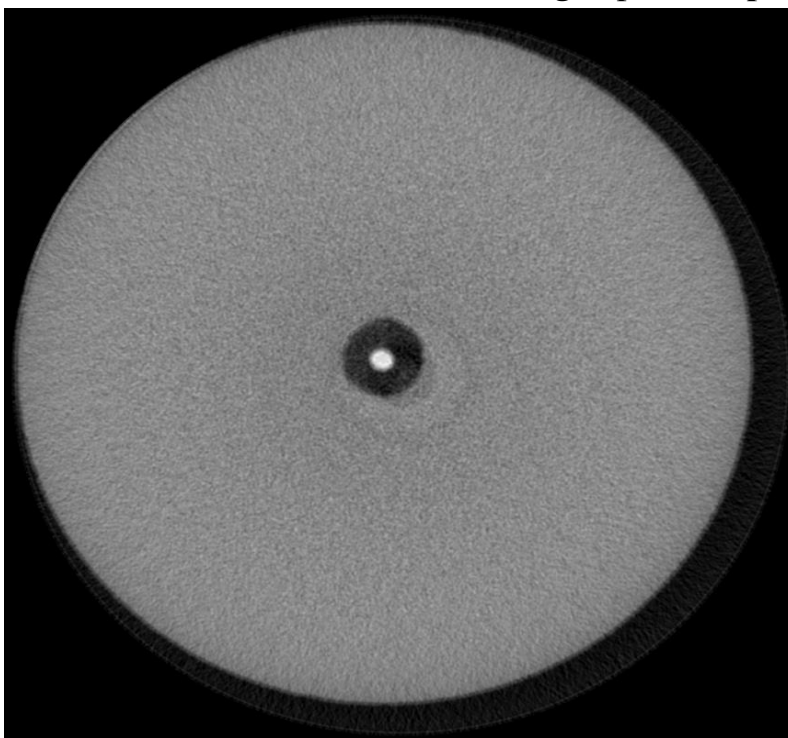


Рисунок 32– Реконструированное сечение образца УУКМ.

Из рис. видна однородность материала, слегка различимы углеродные стержни. Для определения чувствительности по плотности и привязки значений относительной плотности к истинному значению плотности в центр образца был вставлен карандаш с графитным стержнем, что позволяет провести нормировку на истинное значение плотности для произвольного сечения.

4.6 Отчетная документация

Для представления результатов контроля в форме, соответствующей требованиям ТЗ разработаны таблицы результатов измерений

1. Массив таблиц данных по сканам. Для каждого скана своя таблица с переменными: r – радиус, φ – угол поворота.

Таблица 3 - Распределение плотности в элементарных объемах (первичное осреднение)

φ r	0	1	...	360
0				
0.2				
...				
R				

2. После осреднения получаем массив данных по цилиндрам.

Таблица 4 - Распределение плотности в цилиндрических объемах (вторичное осреднение по цилиндрам)

j i	1	2		Jmax
1				
2				
...				
N				

3. После вторичного осреднения – массив данных с распределением плотности в угловых секторах. Для каждого i -того скана своя таблица:

Таблица 5 - Распределение плотности в угловых секторах (вторичное осреднение в секторах)

$\begin{matrix} j \\ k \end{matrix}$	1	2	...	J _{max}
1				
2				
....				
24				

