Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)»

На правах рукописи

Аль-Гурайбави Азхар Овайд Кадим

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ И ДЕФЕКТОВ КВАРЦЕВЫХ ТРУБОК В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Специальность 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель доктор технических наук, профессор Русинов Л.А.

Санкт-Петербург – 2024

оглавление

ВВЕДЕНИЕ 4
ГЛАВА 1 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА И ОСНОВНЫЕ
ДЕФЕКТЫ КВАРЦЕВЫХ ТРУБОК 10
1.1 Анализ вакуум-компрессионных, вакуум-атмосферных и газопламенных
процессов
1.2 Перечень и свойства дефектов кварцевого стекла 18
1.3 Выводы к главе 1
ГЛАВА 2 АНАЛИЗ СПОСОБОВ КОНТРОЛЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ
ИССЛЕДОВАНИЯ 28
2.1 Общие сведения
2.1.1 Теневые способы
2.1.2 Рефракционные способы 32
2.1.3 Способ фокусировки
2.1.4 Проекционные способы
2.1.5 Способ поперечного сечения
2.2 Обнаружение дефектов поверхности стеклянной трубки 49
2.3 Выводы к главе 2 54
ГЛАВА З АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ И ДЕФЕКТОВ
КВАРЦЕВЫХ ТРУБОК 57
3.1 Получение изображения трубки 57
3.2 Структура предлагаемого комплексного алгоритма контроля параметров
трубки из кварцевого стекла 59
3.3 Контроль толщины трубки 59
3.4 Обнаружение отклонений формы кварцевых трубок от круговой и измерение
лиаметра 69

3.5 Обнаружение дефектов на поверхности трубки из кварцевого
стекла76
3.6 Выводы к главе 3 81
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
РАЗРАБОТАННЫХ АЛГОРИТМОВ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ И
ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ТРУБОК ИЗ КВАРЦЕВОГО
СТЕКЛА
4.1 Экспериментальная проверка алгоритма определения толщины кварцевой трубки
4.2 Обнаружение отклонений геометрии поперечного сечения трубки от круговой
4.3 Обнаружение дефектов на поверхности трубки из кварцевого
стекла
4.4 Оценка времени работы блоков комплексного алгоритма 101
4.5 Выводы к главе 4 102
ПРИЛОЖЕНИЕ А Свидетельство о государственной регистрации
программы для ЭВМ 118
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акты внедрения119

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Кварцевое стекло или так называемое Fused Silica glass обладает комплексом таких уникальных свойств, как нечувствительность к термоудару, высокая светопрозрачность в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра, радиационная стойкость, химическая инертность по отношению к агрессивным средам (кислоты, соли, расплавы металлов) и др. Его уникальные свойства делают его наиболее подходящим типом стекла для многих отраслей промышленности.

Трубки из кварцевого стекла широко используются в таких отраслях, как электроника, оптика, фотоника (включая волокна и лазерные компоненты), упаковка лекарственных материалов [3] и производство различных полупроводников.

Толщина этих трубок напрямую влияет на их оптические свойства, такие как пропускание и преломление света. Точное измерение толщины и диаметра трубки гарантирует ее соответствие требуемым характеристикам [92].

Дефекты поверхности, такие как трещины, царапины, пузыри могут поставить под угрозу структурную целостность и надежность трубок из кварцевого стекла. В тех случаях, когда эти трубки подвергаются воздействию высоких температур, давления или агрессивных веществ, обнаружение и определение характеристик поверхностных дефектов становится важным фактором для обеспечения безопасности и долговечности компонентов или систем, в которых они используются [67].

Более того, соблюдение круглой геометрической формы трубок из кварцевого стекла имеет решающее значение в промышленных применениях, где требуется точное выравнивание и позиционирование. В таких приложениях, как оптоволокно, лазерные технологии и оптоэлектроника, круглая форма трубки обеспечивает правильную передачу света и выравнивание оптических компонентов. Поэтому точное обнаружение и анализ округлости трубки из кварцевого стекла достаточно важны для поддержания желаемой функциональности этих систем.

Выявляя дефекты в ходе производственного процесса, производители могут минимизировать отходы, повысить эффективность и поставлять своим клиентам продукцию более высокого качества.

Актуальность работы определяется повышением эффективности автоматического обнаружения дефектов и отклонений в трубной продукции из кварцевого стекла. Способы неразрушающего контроля и измерений, позволяющие точно выявлять, оценивать и характеризовать эти дефекты, позволили бы принимать соответствующие меры во избежание возможных рисков для безопасности или выхода изделия из строя.

Скорость линии по производству кварцевых трубок и неблагоприятные условия окружающей среды затрудняют человеческому глазу определение дефектов и их своевременное обнаружение. Таким образом, уровень мониторинга и контроля напрямую влияет на производство высококачественной трубчатой продукции. Использование технического зрения обеспечивает высокую скорость и точность контроля [94].

Степень разработанности темы исследования

Объем производства трубок из кварцевого стекла в России и мире велик, поэтому проблема контроля, мониторинга и диагностики дефектов трубок представляет интерес для многих исследователей. Раньше для обнаружения дефектов использовалось множество оптических и неоптических способов, в основном, рассчитанных на использование в лаборатории. В то же время современные условия требуют разработки для контроля каждой трубки на предмет отклонений от нормы или наличия дефектов бесконтактных способов, работающих в реальном времени. Здесь можно отметить работы Фотиева Ю.А., Junmin Bao, Junfeng Jing и Yaohua Xie. Однако до сих пор, к сожалению, во многих случаях предлагаются способы контроля и обнаружения дефектов, рассчитанные на лабораторный анализ, что неприемлемо при организации контроля и измерения в реальном времени.

5

Цель работы. Целью данной работы является разработка структурного, методологического и алгоритмического обеспечения системы диагностирования дефектов кварцевых трубок в процессе их производства в режиме реального времени.

Идея. Определить наиболее распространенные и наиболее нежелательные потенциальные дефекты трубок из кварцевого стекла в соответствии с приоритетом обнаружения, разработать соответствующие алгоритмы для их обнаружения и далее эти алгоритмы интегрировать в комплексную систему мониторинга, осуществляющую контроль качества трубок в режиме реального времени на этапе вытяжки.

Реализация указанной цели предполагает постановку и решение следующих задач:

1. Проанализировать технологический процесс производства кварцевых трубок и выявить их потенциальные дефекты.

2. Исследовать существующие методики детектирования и идентификации дефектов и оценить их соответствие требованиям к системе диагностики.

3. Разработать методологическое и алгоритмическое обеспечение для измерения параметров кварцевых трубок в процессе их вытяжки в режиме реального времени.

4. Разработать алгоритмы и способы детектирования и классификации дефектов кварцевых трубок в реальном времени.

5. Создать программное обеспечение для реализации предложенных алгоритмов и выполнить его экспериментальное исследование.

Объектом исследования являются алгоритмы обработки и анализа визуальной информации при контроле и измерении параметров и техническом диагностировании трубок из кварцевого стекла на основе технического зрения.

Предметом исследования являются методы и способы обнаружения на основе технического зрения дефектов трубок из кварцевого стекла в процессе производства.

Научная новизна:

1. Обоснован способ и алгоритм дистанционного измерения толщины стенки кварцевой трубки в процессе ее изготовления (волочения), обеспечивающий за счет соответствующего задания параметров инвариантность к возможным колебаниям и вибрациям трубки.

2. Разработан алгоритм контроля круговой геометрии трубки (эллипсности, разнотолщинности, сколов и т.п.) на базе преобразования в полярную систему координат, работающий в реальном времени.

3. Предложен алгоритм обработки изображений контролируемых трубок, позволяющий обнаруживать поверхностные дефекты в режиме реального времени с доверительной вероятностью не менее 95 %.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют пунктам 1, 4, 6, 7 паспорта специальности 2.2.8.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость результатов диссертационной работы заключается в разработке архитектуры и алгоритмического обеспечения системы контроля и диагностики дефектов при контроле кварцевых трубок непосредственно в процессе их производства в реальном времени.

Практическая значимость результатов исследования заключается в:

1. разработке способов и алгоритмов контроля основных параметров кварцевых трубок

2. разработке алгоритмов контроля возможных дефектов кварцевых трубок в реальном времени с доверительной вероятностью не менее 95%.

3. Получены акты внедрения от Университета «Университетский колледж Аль-Салама» (Ирак) от 03.06.2024 и от компании «Центр обучения и развития Аль-Равафед» (Ирак) от 03.06.2024 (Приложение Б).

Методология и методы исследования

Для достижения поставленных в работе целей были применены методы на основе технического зрения. Получаемые изображения объекта подвергались

цифровой обработке и анализу. В процессе обработки данных была задействована библиотека алгоритмических примитивов OpenCV, что значительно ускорило разработку и выполнение необходимых задач.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Способы и алгоритмы дистанционного контроля трубок из кварцевого стекла, основанные на проекционном способе и преобразовании координат изображения торца трубки в полярные, обеспечивают погрешность измерения толщины стенки не более 5%, обнаружение отклонений от круглой геометрической формы в реальном времени при вытягивании и инвариантность к возможным вибрациям трубки.

2. Алгоритм обнаружения поверхностных дефектов структуры трубок из кварцевого стекла проекционным способом, основанный на преобразовании изображений в оттенки серого и градиентном анализе с последующей бинаризацией на базе пороговой обработки Оцу, обеспечивает доверительную вероятность выявления не менее 95 %.

Достоверность полученных результатов в определенной степени обусловлена значительным количеством экспериментального материала, сопоставлением полученных результатов с ранее опубликованными данными.

Апробация работы. Результаты работы отражались в докладах на конференциях разных уровней:

1. V International Conference on Control in Technical Systems (CTS), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023;

2. Science and Technology: XXI Century Advances, Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University), СПб, 2023

3. Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова, Россия, Санкт-Петербург, 2023, С.16-19

4. XIII Научная конференция «Традиции и инновации», посвященной 194-й годовщине СПбГТИ (ТУ), СПб ГТИ (ТУ), 2022 (2 доклада)

5. XII Научная конференция «Традиции и инновации», посвященной 193й годовщине СПбГТИ (ТУ), СПб ГТИ (ТУ), 2021;

8

6. XI Научная конференция «Традиции и инновации», посвященной 192й годовщине СПбГТИ (ТУ), 2020 (3 доклада).

7. Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» - ММТТ 32, т.6.СПб, 2019

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в анализе процессов производства кварцевых трубок с целью выявления типовых дефектов и причин их возникновения, в создании алгоритмов и программного обеспечения для обнаружения и идентификации этих дефектов в режиме реального времени, а также в проведении испытаний для проверки полученных результатов и подготовке публикаций.

Публикации

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 12 печатных работах (пункты списка литературы №4-11, 60-61, 67-68), в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК). Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (Приложение А).

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка, содержит 127 страниц машинописного текста, 63 рисунка, 5 таблиц, список литературы из 106 наименований и 2 приложения на 10 страницах.

ГЛАВА 1 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА И ОСНОВНЫЕ ДЕФЕКТЫ КВАРЦЕВЫХ ТРУБОК

Стеклянные трубки производятся из различных видов стекла и диаметром от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. В большинстве производственных процессов прямо из расплава вытягивают стеклянную трубку «бесконечной длины», от которой после прохождения роликовой дорожки к волочильному станку отрубаются куски соответствующей длины.

Общие способы различаются в зависимости от направления вытягивания. При горизонтальном направлении вытягивания выделяют процессы Даннера и Велло [80].

В процессе Даннера расплавленное стекло течет из питателя по ленте на наклоненный вниз под углом во вращающийся полый керамический цилиндр трубу Даннера. Через полую трубку продувается сжатый воздух, чтобы предотвратить разрушение стеклянной трубки. На кончике трубы образуется так называемая волочильная луковица, от которой в свободном провисании по горизонтальной тянущей линии вытягивается стеклянная трубка.

Если скорость вытяжки поддерживается постоянной, увеличение давления выдува приводит к увеличению диаметра и уменьшению толщины стенок.

В процессе Велло стекло проходит через кольцевое отверстие снизу питателя. Это отверстие образовано между круглым выходным патрубком питателя и регулируемой по высоте полой иглой (оправкой). Здесь трубка также «надувается» сжатым воздухом. Стеклянная трубка, которая первоначально выходит в вертикальном направлении, затем в свободном провисании отклоняется в горизонтальное положение. Оправка сопла отрегулирована относительно центра сопла волочения, чтобы обеспечить постоянную толщину стенок после изгиба.

При использовании этого способа пропускная способность выше, чем при использовании способа Даннера. Температуры на вытяжном сопле ниже, чем в муфеле Даннера.

Процессы Даннера и Велло используются для производства тонкостенных стеклянных трубок относительно небольшого диаметра.

Способ вытягивания вниз в принципе аналогичен способу Велло, только здесь стеклянная трубка не отклоняется, а вытягивается в вертикальном направлении. Достижимая толщина стенок для больших наружных диаметров свыше 250 мм составляет около 10 мм.

При направлении вытягивания вертикально вверх стеклянная трубка не формируется оправкой, а проходит через вытяжное сопло, снизу через которое в стеклянную трубку нагнетается воздух. Поскольку качество и скорость волочения, достигаемые в процессе вертикального волочения труб, относительно невысоки, этот процесс в настоящее время практически не имеет практического значения [79].

1.1 Анализ вакуум-компрессионных, вакуум-атмосферных и

газопламенных процессов

Технологические процессы производства кварцевого стекла. Процессы изготовления кварцевого стекла имеют существенные отличия от методов производства технических стекол. Эти различия обусловлены высокой температурой плавления кристаллических модификаций диоксида кремния, а также значительной вязкостью расплава кремнезёма.

В настоящее время в промышленности кварцевое стекло получают с использованием нескольких способов (рисунок 1.1), среди которых выделяют электротермический, газопламенный, плазменный и парофазный, которые. включают множество модификаций, направленных на оптимизацию процесса и повышение качества получаемого материала.



Рисунок 1.1 – Способы производства кварцевого стекла

Электротермический способ

Электротермический способ производства кварцевого стекла реализуется с использованием вакуумных и стержневых электропечей, а также тигельных печей, функционирующих в среде газов с высокой диффузионной способностью (рисунок 1.2). [46, 53].

Вакуум-компрессионный способ

При вакуум-компрессионном способе в качестве исходного сырья используются природные кварцевые зерна, которые в некоторых случаях подвергаются предварительной химической очистке. Производственный процесс осуществляется в условиях вакуума при остаточном давлении Не в диапазоне от - 0,01Па до 1Па. Кварцевая крупка подаётся в зону электродугового пламени при температуре ~1750 °C [46, 53].



Рисунок 1.2 – Электротермический способ получения кварцевого стекла

Кварцевое стекло получают в тигельных электропечах сопротивления (рисунок 1.3). Печь имеет разрезной трехфазный трубчатый графитовый нагреватель, внутри которого устанавливается графитовый тигель с шихтой. Тигель представляет собой стакан с крышкой, внутри которого по всей длине укреплена графитовая трубка, обеспечивающая при расплавлении шихты получение блока с центральным отверстием. После обработки блок перетягивается в трубы. Потребляемая мощность печи порядка 100 кВА, температура до 1750^оС. В период плавки под вакуумом его значение достигает от одного до 100 Па, а в период компрессии давление составляет величину до 2,5 МПа. Длительность цикла составляет от 6 до 8 часов с учетом перезагрузки печи.



Рисунок 1.3 – Вакуумно-компрессионная электропечь [40]

При повышении температуры в процессе плавки кремнезёма происходит его химическое взаимодействие с графитом, сопровождающееся интенсивным образованием газообразных продуктов. В результате на заключительном этапе плавления наблюдается увеличение остаточного давления, которое достигает значений порядка 10²–10³ Па. Максимальная температура плавки, как правило, не превышает 1750 °C, поскольку при её превышении в стекломассе начинается активное образование пузырей.

Для получения кварцевого стекла оптического качества с минимальным содержанием газовых включений на завершающем этапе плавки в печную камеру подаётся инертный газ, не вступающий в реакцию с графитом или молибденом. Чаще всего для этих целей используется азот, подаваемый под давлением 2,5 МПа.

Дальнейшее развитие электротермический способ получил благодаря замене вакуумной среды на атмосферу газов, обладающих высокой диффузионной способностью и хорошей растворимостью в кремнезёме [46]. Уровень автоматизации печей предусматривает автоматическое поддержание температуры в печи по заданной программе, поддержание температуры и давления воды для охлаждения печи с автоматической блокировкой при превышении заданных значений.

Помимо применения печей с графитовыми нагревателями используются печи с нагревателями из вольфрама и тиглем из молибдена, с помощью которых вырабатывают высококачественные стержни и трубы диаметром до 20 мм непрерывным способом. В период разогрева и работы печи в рабочее пространство подается защитный газ (аргон или смесь азота с водородом).

Автоматизация процесса предусматривает поддержание температуры, автоматическое регулирование геометрических параметров труб и стержней (диаметра и длины), управление скоростью вытягивания, автоматическую отрезку, контроль процентного содержания водорода и др. параметров [40,46,53].

Вакуум-атмосферный способ

Получение труб и стержней широкого ассортимента осуществляется в вакуум-атмосферных тигельных индукционных электропечах. Печь состоит из основания с нижней и верхней съемными крышками, между которыми располагается цилиндрический корпус из непрозрачного кварцевого стекла. Снаружи корпуса располагается цилиндрический многовитковый индуктор, являющийся нагрузкой генератора (лампового, транзисторного или др.) мощностью до 100 кВт и более, частота 66 кГц и более для различных типов генераторов ВЧГх.

В графитовый тигель устанавливается предварительно обработанный блок и после достижения вакуума порядка 1-6Па осуществляется расплавление блока и выработка труб (стержней) или полос. Как известно, глубина проникновения вихревых токов индуктора, нагревающих тигель (δ), зависит от частоты тока (f), магнитной проницаемости (μ) и удельного электросопротивления материала (ρ).

Глубина проникновения для графитового тигля f = 66 кГц, $\mu \approx 1$, $\rho = 14 \cdot 10^{-4}$ Ом·см составит порядка $\delta = 5030 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} = 0,73$ см. Степень нагрева в общем случае зависит от частоты тока и геометрических соотношений диаметров тигля и индуктора. Коэффициент полезного действия индукционных печей составляет 0,6-0,83 [46,53].

Производство сверхчистого кварцевого стекла основано на высокотемпературной обработке, происходящей в газовой среде высокого давления и выполняется, как правило, под вакуумом, для сушки и дегазации материалов применяют вакуумно- компрессионные электропечи.

Снстема автоматического управления данным процессом предусматривает:

1. автоматический подъем температуры по заданной программе и ее поддержание с высокой точностью в пернод выработки труб;

2. автоматическое регулирование геометрических размеров вытягиваемых труб, в том числе длины, с автоматизацией их отрезки;

3. контроль процентного содержания водорода в защитном газе, давления, скорости вытягивания труб, потребляемой мощности, расхода защитного газа и некоторых других параметров [46].

Газопламенный способ

Газопламенный способ плавления кварцевого стекла базируется на технологии Вернейля, которая сначала была разработана для синтеза синтетического рубина. В данном процессе измельчённый кремнезём с заданной скоростью подаётся на поверхность расплавленной стекломассы, нагреваемой водородно-кислородным пламенем. В зоне воздействия пламени температура может достигать 2100–2200 °C [46].

Для создания необходимых термических условий используется несколько горелок, работающих на смеси Н₂ и O₂, что позволяет формировать зоны с высокой температурой (рисунок 1.4).

15



Рисунок 1.4 – Схема газопламенного способа получения кварцевого стекла (направление пиодачи крупки отмечено знаком +) [46,53]

В этом методе используется реакция образования SiO₂ при воздействии паров воды или кислорода на четыреххлористый кремний (1.1):

$$SiCl_4 + 2H_2O \rightarrow SiO_2 + 4HCl;$$

$$SiCl_4 + O_2 \rightarrow SiO_2 + 2Cl_2.$$
(1.1)

Газопламенная печь представляет собой муфель с подложкой, которая вращается и опускается по мере наплавления изделия в виде диска или блока кварцевого стекла. В верхней части муфеля располагается водородно-кислородная горелка, формирующая факел, в область которого подается кварцевая крупка. Расплавление крупки происходит по мере нахождения в пламени горелки и растекания на поверхности расплава на подложке. Данная технология основана на способе Вернейля - способе наплавления мелкой крупки кварца на подвижную заготовку из кварцевого стекла с помощью кислородно-водородной смеси газа, подаваемого в горелку (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Газопламенный способ [59]

16

Процесс плавления частиц кварца в водородно-кислородном пламени протекает с существенно более высокой скоростью по сравнению с плавлением в вакууме и занимает лишь доли секунды. В данных условиях практически полностью исключаются фазовые превращения кварц—кристобалит, а также процессы вскрытия газо-жидких включений, содержащихся в исходных частицах кварца. При попадании на поверхность расплавленной стекломассы кварцевые частицы мгновенно плавятся, а образовавшиеся капли равномерно растекаются по поверхности.

На сформированную поверхность поступают новые порции кварца, которые аналогично расплавляются и растекаются, обеспечивая послойное наплавление кварцевого стекла. Однако присутствующие в кварцевых частицах газо-жидкие включения приводят к образованию пузырей в расплаве [7,8].

Плавка осуществляется при минимальном значении вязкости стекломассы в зоне нагрева факелом (~10⁴Па·с), что обеспечивает её медленное растекание, но практически исключает конвективное перемешивание. Вследствие особенностей послойного наплавления такое стекло характеризуется высокой оптической однородностью вдоль оси наплавления, но проявляет выраженную слоистую неоднородность в направлении, перпендикулярном оси [59].

Альтернативно для наплавления кварцевого стекла может применяться высокочастотная плазма в качестве источника тепла. При этом в качестве газаносителя используются азот, аргон или их смеси. Добавление кислорода в газноситель позволяет регулировать окислительно-восстановительные условия плавки.

Сырьём для данного процесса служит либо кварцевая крупка, либо кристобалит. Однако, независимо от используемого источника нагрева, получаемое наплавленное стекло сохраняет присущую данному способу слоистую неоднородность.

Система автоматического управления данным процессом предусматривает: мониторинг процесса, контроль температуры внутри печи и поверхности стекла в

зоне расплава, высоту блока или наплавляемого диска, расход газов (водорода и кислорода), скорости вращения и опускания подложки и др. [59].

1.2 Перечень и свойства дефектов кварцевого стекла

Единого понятия порока/дефекта не существует, различными нормативными документами даются разные понятия.

ГОСТ 15467–79 «Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения» дает понятие дефекта как каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям, а также определяет разновидности дефектов (устранимый, скрытый, малозначительный и т.д.) [25].

ГОСТ Р 27.002–2015 "Надёжность техники. Основные понятия. Термины и определения" [27] определяет дефект как каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным в документации (п.3.4.2)

ГОСТ Р ИСО 9000-2011 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь» [32] считает дефект невыполнением требования, связанного с предполагаемым или установленным использованием (п. 3.6.3).

В целом, порок стекла – это разного рода нарушения в его физической и химической однородности. ГОСТ 32361-2013 «Стекло и изделия из него. Пороки. Термины и определения.» [29] устанавливает определения понятий, характеризующих пороки стекла и изделий из него. Этот же нормативный документ выделяет разрушающие пороки (нарушающие целостность стекла), неразрушающие, различные по форме и по происхождению:

- Дефекты или пороки, возникающие в процессе проектирования и производства изделий [60].

- Дефекты, возникающие в готовом изделии [44].

В кварцевом стекле могут возникать различные дефекты из-за способа нагрева и типа нагревательных установок, а также в зависимости от технологической ситуации при производстве, качества сырья, примесей и других факторов. Ряд дефектов стекла можно контролировать в ходе технологического процесса, а другие можно зафиксировать только после его завершения [36]. Особенности производства оптического кварцевого стекла заключаются еще и в том, что помимо нормирования по оптической однородности, двойному лучепреломлению, пузырчатости и бессвильности, ГОСТ 15130—86 «Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия» оговаривает показатели качества, характерные именно для кварцевого стекла — мелкозернистую неоднородность (рябь) и включения [23]. Мелкозернистая неоднородность получается в результате различного воздействия высокой температуры, газовой атмосферы и различных физических и химических параметров при наплаве на центральную и периферийную части каждой крупинки из исходной шихты.

К дефектам трубок из кварцевого стекла, определяемых в ГОСТ 16548-80 [26] и подлежащим диагностике, относятся: включения (прозрачные и непрозрачные), выпуклость, многослойная неоднородность, микронеоднородность, пузырьки и мошки, неполное плавление, капиллярность, изменение толщины.



Рисунок 1.6 – Классификация пороков стекла в соответствии с российскими

стандартами

Пороки, по природе и по причине появления, делят на включения (пороки стекломассы), пороки формования, пороки, появившиеся вследствие механических повреждений. Классификация основных видов дефектов представлена на рисунке 1.6.

Включения

1. Непрозрачные включения, оставшиеся в сырье или полученные в результате взаимодействия с материалом тигля, дюзы и пр., появляются при резких скачках температуры в процессе производства. При интенсивной кристаллизации (большом количестве включений) стекло теряет прозрачность.

Встречающиеся включения в виде черных точек являются следствием загрязнения сырья хромистыми рудами или огнеупорами. Такой дефект свидетельствует о необходимости изъятия из производства всего загрязненного сырья и утилизации боя с черными точками - в печь его возвращать нельзя [30].

Также причиной появления включений могут быть недостатки пуска печи колебания температуры, распыление щелочей и сильное испарение, давление газов в пространстве печи, изменения уровня стекломассы, слишком длинное или слишком короткое пламя и т.д

2. Пузыри, представляющие собой полость, заполненную газом, наличие мелких газообразных примесей происходящее во время плавления при производстве [82,87,100]. (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Пузыри

Пузыри – это полости разной формы, появляющиеся в стекле по разнообразным причинам и содержащие газообразные включения, портящие

внешний вид изделия, понижающие их стойкость к химическим и механическим воздействиям [12,31]. Появляются они по следующим причинам:

- присутствие в стекломассе воздуха, газообразных продуктов, появившихся вследствие разложения шихты;

- вторичное разложение компонентов стекломассы, ее реакция с печными газами;

- наличие в плаве металлического железа.

Значительных размеров пузыри будут образовываться из сульфосодержащей шихты, так как сульфатный остаток будет восстанавливаться - чтобы этого избежать необходимо использовать огнеупоры без содержания восстановителей [17, 62].

Также необходимо не допускать попадания в стекломассу сульфидов, сохранять в зонах студки и выработки окислительную среду. Если происходит восстановление, пузыри обычно имеют малые размеры (мошка), если оно происходит повторно - образуются крупные пузыри, и их величина находится в прямой зависимости от величины источника газообразования.

Если огнеупор имеет крупные поры или шамот в своем составе, то возможно образование пузырьков из газа или воздуха из самого огнеупора, либо сажи, если огнеупор обжигался в коптящем пламени в интервале температур 1000-1100°С - их надлежит обжигать при нейтральных либо слабо восстановительных условиях.

3. Мошка - мельчайшие пузыри (размером меньше 0,05 мм) в массе стекла. Это может быть вызвано огнеупорными материалами, а также низкой температурой и высокой вязкостью расплавленного стекла (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 - Мошка

4. Шлир - включения (капли, бугорки), которые появляются при непроварении песчинок или попадании стеклянных капель со свода печи. Также это случается при несоблюдении режима варки стекла, некачественном перемешивании шихты (рисунок 1.9).

Шлиры иногда бывают в виде сплошных полос, чаще всего они появляются в прокатном стекле.



Рисунок 1.9 – Шлир

5. Свиль - прозрачный участок, отличающийся от массы стекла показателем преломления (рисунок 1.10). Этот порок может быть следствием ошибок в процессе варки стекла, проникновения в стекломассу частиц огнеупорного материала и капель стекла от свода печи. Свили неблагоприятно влияют на оптические свойства стекла, затрудняют процесс отжига, повышают хрупкость и понижают механические свойства трубного стекла [24].



Рисунок 1.10 – Свиль в стекле

Свиль, хоть и является включением, отличается от камней и «руха» - она представляет собой некристаллическое образование. Вообще, говоря о свили, понимают разнообразные неоднородности, различающиеся по своим свойствам от окружающего стекла, и именно поэтому делающиеся заметными. Свиль разделяют на термическую, которая по своему образованию отличается тепловым прошлым от остального стекла, и химическую, отличающуюся составом - она встречается чаще всего. Также на появление свили влияет вязкость расплава - теоретически, его можно было бы нивелировать повышением температуры, сделав смесь более подвижной и улучшив её гомогенизацию. Но при всем этом улучшается растворимость огнеупоров, что также приводит к появлению свилей.

На производстве стекло осматривают на теневой установке (рисунок 1.11) и относят к 1-й или 2-й категориям бессвильности [28]. Также имеется два класса бессвильности: по классу А (используют для призменной оптики) стекло проверяют на бессвильность в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а по классу Б (используют для линзовой оптики) – в одном направлении (указывает заказчик).



Рисунок 1.11 – Структура теневой установки, где 1 – источник света; 2 – конденсор (при необходимости); 3 – диафрагма; 4 – светофильтр (при необходимости); 5 – тестируемый образец; 6 – держатель образца (стекло); 7 – экран или камера; 8 – дефект

Контроль осуществляется следующим образом - получают теневую картину свили на экране и сравнивают ее с эталонной картиной 1-й или 2-й категорий бессвильности.

Пороки формирования

Существуют разные виды пороков формирования (рисунок 1.12):

1. Кованость поверхности - местные деформации нижней поверхности стекла, принимающие вид круглых пятен, которые создают непрерывный искажающий рисунок. Возникают они из-за отклонений от температурного режима при выплавке стекла.

2. Прилипшие частицы - включения в виде капель стекла, имеющие вытянутую форму на нижней поверхности [22].

3. Рух представляет собой явление потери прозрачности стекла, которое может происходить как в процессе его обработки, так и на стадии варки. Данный эффект, также известный как расстекловывание, обусловлен кристаллизацией силикатов из стекломассы при крайне медленном охлаждении или при длительном воздействии высоких температур, например, в зоне нагрева пламени газовой горелки. В области термического воздействия стекло мутнеет, а его поверхность приобретает шероховатость.

Наименьшую склонность к расстекловыванию демонстрируют молибденовые стекла. Формирование непрозрачной поверхности в процессе расстекловывания связано с выгоранием щелочных оксидов и изменением соотношения компонентов стекломассы. Введение в пламя горелки солей щелочных металлов, таких как хлорид натрия, в большинстве случаев позволяет полностью восстановить прозрачность зарухшейся поверхности стекла.

4. Хальмоз (пенка) представляет собой поверхностные дефекты стекла в виде белесых либо грязеподобных пятен. Их возникновение обусловлено всплыванием лёгких включений на поверхность стекломассы в процессе варки. Как правило, такие примеси удаляются на стадии плавления, однако при их неполном устранении на поверхности готовых изделий может образовываться так называемая "пенка".

5. Слоистая неоднородность, одной из причин появления которой является неполное расплавление зерен крупки в процессе плавки. Это происходит из-за сбоя

температурного режима печи. Этот дефект обладает свойством оптической неоднородности по слоям, параллельным поверхности растекания расплава [93].

6. Камни - они могут появляться в ходе длительного нахождения стекломассы при наиболее благоприятных для образования и роста кристаллов температуре. Чтобы избежать кристаллизации, состав стекол адаптируют так, чтобы температура их выплавки была выше интервала кристаллизации на 25-30°C, и по возможности сокращают время нахождения массы при опасных температурах, а кристаллы уничтожают хорошим прогревом.

7. Прилеп стекла – порок наружной поверхности в виде прилипших крошек стекла, сколов на местах соприкосновения стеклянных изделий при повышенной температуре.



Рисунок 1.12 – Пороки формирования, где 1 – пузырь; 2 – свиль; 3 – шлир; 4 – камень; 5 – крупка; 6 – рух; 7 - плохой отжиг стекла

Отжиг – медленное понижение температуры стеклоизделия, когда наружные его слои остывают одновременно. В том случае, если сразу после изготовления охладить горячее изделие, из-за резкого перепада температур в нем образуются напряжения. Такое стекло при обработке (полировке или резке) трескается, отламывается не по линии надреза.

Пороки, обусловленные механическими воздействиями

1. Царапина является самым часто встречающимся пороком стекла и изделий из него, и имеет вид черты на поверхности. По российским стандартам, в зависимости от ширины разделяют грубые и волосяные царапины. Возникают они вследствие механических воздействий в процессе производства, транспортировки изделий, проведения каких-либо операций с ним (резка, обработка краёв и т.д.).

2. Скол – это повреждение, возникающее в случаях, когда какой-либо твердый предмет отрывает небольшой кусок от стекла.

3. Трещина — порок, являющийся областью с полностью и частично разрушенными межатомными связями. Посечка - несквозная трещина.

4. Выступ - часть поверхности изделия, которая поднимается относительно других участков.

Распознавание пороков стекла

Часть вышеприведенных дефектов, которые могут быть обнаружены в открытых процессах производства трубок, стержней или в газопламенных процессах наплавления блоков, представляют собой контролируемые изъяны и могут быть зарегистрированы системой управления. Часть дефектов особенно в печах закрытого типа (печи сопротивления, вакуум-атмосферные печи и др.) не могут быть определены в ходе процесса и выступают как неконтролируемые изъяны. Их параметры представляются как виртуальные величины, моделирование которых базируется на массиве экспериментальных данных.

Дефекты кварцевого стекла, которые анализируются после завершения технологического процесса [91]:

1. Разнотолщинность стенок кварцевых труб, полос и др. профилей (рисунок 1.13).



Рисунок 1.13 – Разнотолщинность стенок кварцевых труб

2. Капилляр в изделии, представляющий собой полость вытянутой формы малого сечения.

3. Ребристость изделий или неровность поверхности.

4. Трещина, оцениваемая как раскол в изделии.

5. Царапина.

6. Вмятина, представляющая собой ямку или канавку на поверхности изделия. Причина этих дефектов в том, что на поверхность стекла из-за неправильной эксплуатации попадает шлифовальная головка.

1.3 Выводы к главе 1

1. Производство трубок из кварцевого стекла на глобальном уровне имеет значительные масштабы и демонстрирует устойчивую тенденцию к увеличению. Это обусловлено уникальными физико-химическими свойствами данного материала, которые обеспечивают его востребованность в различных отраслях промышленности. Однако параметры трубок, их геометрическая форма, а также наличие дефектов различного происхождения оказывают значительное влияние на возможность и область их применения. Отклонение данных характеристик от установленных норм приводит к ограничению сфер использования. В работе приведены ссылки на действующие стандарты, регламентирующие требования к кварцевым трубкам.

2. Проведен анализ ключевых этапов производства трубок из кварцевого стекла с точки зрения вероятности возникновения дефектов и геометрических отклонений. В результате исследования были определены критические параметры технологического процесса, несоблюдение которых может являться основной причиной формирования дефектов.

3. Осуществлена классификация наиболее распространённых дефектов кварцевых трубок. На основании проведённого анализа технологического процесса установлено, что идентичные дефекты могут иметь различные причины возникновения, начиная от недостаточного качества исходного сырья и заканчивая ошибками в настройке и эксплуатации технологического оборудования.

ГЛАВА 2 АНАЛИЗ СПОСОБОВ КОНТРОЛЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Общие сведения

В центре анализируемой проблемы стоят вопросы, связанные со способами и средствами бесконтактного контроля геометрических параметров прозрачных трубок в реальном времени в процессе их производства.

Система контроля качества, которая используется на отечественных предприятиях, заключается в оценке диаметра и толщины трубок при помощи откалиброванных проверочных насадок. Так как проверяется уже изготовленная продукция, это приводит к большому количеству бракованных изделий. Это связано с тем, что при изменении технологического процесса при получении неудовлетворительных результатов по контролю прозрачных трубок, процесс корректировки происходит с запаздыванием. По этой причине бракованное изделие, выпущенное с браком по геометрическим параметрам поперечного сечения прозрачных трубок, уже не поддается исправлению и корректировке.

Важно также отметить, что неразрушающих средств проверки параметров трубок в процессе вытяжки практически нет. По этой причине создание методики и средств управления геометрическими характеристиками прозрачных трубок – это одна из важных задач, решение которой поспособствует производству и выпуску высококачественной продукции.

В этой главе рассматриваются способы и средства измерения геометрических параметров прозрачных трубок.

В перечень главных геометрических характеристик прозрачных трубок входят: внутренний и наружный диаметры, эллиптичность, форма сечения, толщина стенки. И это помимо обнаружения поверхностных дефектов трубы.

Исходя из анализа источников литературы, неоптические и контактные способы контроля не могут гарантировать полную надежность при эксплуатации, точность в процессе измерения геометрических параметров протяженных объектов [39,54,56]. Кроме того, некоторые используемые способы применимы только в части наблюдения за электропроводящими изделиями.

При оценке результатов ряда исследований было выявлено, что самыми технологически логичными и эффективными способами остаются бесконтактные [1,20,64].

В течение нескольких последних лет были разработаны многочисленные бесконтактные способы оптического контроля, которые основаны на использовании оптических явлений. К ним следует отнести: дифракцию и интерференцию плоской волны, которая падает на полый цилиндр, рефракцию узкого зондирующего пучка, а также рассеяние, отражение, поглощение, поляризацию и иные явления.

Группу современных способов и средств для измерения геометрических параметров трубок можно разделить на 4 класса:

- теневые, с помощью которых можно оценить величины внутренних и наружных диаметров на основании анализа расстояния между показателями теневой картины [19,61]

- рефракционные, которые основаны на определении положения преломленного луча, с его помощью и анализируется размер стеклотрубки;

- фокусировка, при помощи которой фиксируются моменты изображений тест-объектов на двух поверхностях;

- способ проекции, основанный на просмотре двух изображений, соответствующих распределению отраженного и преломленного света.

2.1.1 Теневые способы

Теневые способы, соответственно названию, используют параметры тени, созданной при помощи контролируемого образца трубки, измеряя размеры тени, при проецировании тени трубки на экран [18, 56]. В большинстве способов измерения теней предполагается использование хорошего осветительного устройства для повышения контрастности видимого теневого изображения [20,42].

В ряде исследований описываются приборы, состоящие из источника света 1, двух объективов - коллимирующего 2 и фокусирующего 3, установленную в фокальной плоскости фокусирующего объектива диафрагму 4, фотоприемник 5, блок обработки информации 6 (рисунок 2.1). Теневое изображение сканируется фотоприемником (типа ПЗС). Сформировавшийся в результате электрический сигнал позволяет определить диаметр испытуемого объекта, повторяя распределение интенсивности излучения в теневой области. Ложная информация, которую могут создать центральные лучи, попавшие на фотоприемник через трубку, устраняется в блоке обработки информации.



Рисунок 2.1 – Схема фотоэлектрического теневого устройства

Также имеются описания устройства [33], проверяющего размеры стеклянных трубок в процессе изготовления. Его работа заключается в расчете внешнего и внутреннего диаметра исследуемого образца в диапазоне от десятков микрометров до нескольких сантиметров с относительной погрешностью 0,5% после анализа теневой картины с помощью сканистора. Расчеты происходят с учетом показателя преломления материала, и могут проводиться для толсто- и тонкостенных трубок.

Сканирующее оптико-электронное устройство (рисунок 2.2) состоит из лазера 1, поворотного 2 и сканирующего 3 зеркал с приводом 9, двух объективов (коллимирующего 4 и фокусирующего 5), фотоприемника 6 и блока обработки информации 7 [51]. Лазерный пучок с помощью зеркала 3 поворачивается с постоянной скоростью в плоскости, перпендикулярной стеклотрубке 8. Время, в течение которого этот пучок, пересекая стеклотрубку, не попадает на фотоприемник, фиксируется. Внешний и внутренний диаметр стеклотрубки

определяются исходя из теневой зоны, параметры которой определяются величиной промежутков между импульсами.



Рисунок 2.2 – Схема сканирующего оптико-электронного теневого устройства

Теневые способы просты в реализации, могут обеспечивать непрерывное бесконтактное дистанционное измерение диаметров трубок. Погрешность измерений очень мало зависит от положения трубки в световом пучке. Вместе с этим, теневые способы имеют ряд недостатков - погрешность находится в прямой зависимости от свойств и чистоты материала, формы стеклотрубки. Измерения изза наличия полутеневой зоны на границе света и тени, влияния дифракции света могут быть относительно неточными; также диапазон измерений ограничен малыми размерами объектов.

Как показано, системы, применяющие метод теневой проекции, требуют механического сканирования. Это ухудшает эксплуатационные характеристики измерительного устройства и увеличивает его стоимость.

Для снижения стоимости измерительного устройства и повышения его надежности обеспечивается его хорошее согласование с системами обработки информации, включая блоки управления и компьютеры [37].

В большинстве случаев фотодетекторы относятся к двум наиболее распространённым технологиям (камеры): ПЗС или КМОП.

ПЗС-матрица обеспечивает более высокую чувствительность, чем технология КМОП, но она дороже, поскольку требует более сложных схем [35].

В работах [43,49,50,52] рассмотрено применение теневых устройств, в которых данные о координатах луча с ПЗС-матрицы передаются в компьютер для обработки и расчета диаметра трубки по определенному алгоритму.

2.1.2 Рефракционные способы

Данные способы берут за основу оценку углового положения луча, преломленного при прохождении через прозрачную трубку. Исходя из этих данных и определяются оба диаметра трубки – внутренний и внешний.

Через стеклянную трубку при автоматических измерениях перпендикулярно ее оси пропускается пучок света. По величине изменения угла между нормалью к поверхности трубки в точке падения светового пучка до позиции, при котором он же, только прошедший сквозь стенки трубки, будет параллелен своему первоначальному направлению судят о внутреннем диаметре [13]. Этот способ схематически изображен на рисунке 2.3. На трубку 1 под углом β нормали NO падает пучок света 2, проникает через обе стенки трубки, выходя под углом γ к этой же нормали. Угол $\alpha = \gamma - \beta$ пропорционален внутреннему диаметру трубки d. Его же в свою очередь можно определить выражением (2.1):

$$d = \frac{D \cdot \sin\beta \sqrt{n^2 - 2n\cos\left(\frac{\alpha}{2} - \theta + \beta + 1\right)}}{n \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2} - \theta + \beta\right)},$$
(2.1)

где *D* - внешний диаметр трубки, *n* - коэффициент преломления материала, трубки, *θ* - угол преломления пучка света на границе раздела.



Рисунок 2.3 – Схема рефракционного способа

Необходим постоянный контроль за положением светового пучка на поверхности трубки и его стабилизация в одной точке в ходе всего измерения угла, поэтому данный способ достаточно сложно реализовать. Его видоизмененным вариантом является схема, представленная на рисунок 2.4 [13,14].

При проведении измерения по данной схеме в плоскости, перпендикулярной к оси трубки, перемещают световой пучок, отмечают три позиции, при которых он, выходя из трубки, остается параллелен самому себе (1, 2, 3). При том что известны такие параметры как внешний радиус R, коэффициент преломления материала трубки n, а от внешнего и внутреннего радиусов зависит расстояние *a* между положениями 1 и 2, 2 и 3, то измерив *a*, находят внутренний диаметр трубки по выражению (2.2):

$$d = \frac{2aR^2}{R^2 + \sqrt{R^2 - a^2(\sqrt{R^2 \cdot n^2 - a^2} - \sqrt{R^2 - a^2})}}$$
(2.2)

Впрочем, реализация этого способа также представляется сложной ввиду некоторой сложности установления параллельности входящего и выходящего световых пучков, к тому же высокой точностью полученные результаты не отличаются.



Рисунок 2.4 – Схема измерения внутреннего диаметра из прозрачных трубок

На рисунке 2.5 представлена схема прибора для определения внутреннего диаметра прозрачных трубок, который состоит из источника света 1, системы

сканирования 2, объектива 3, фотоприемника 4, поляризатора 5 и блока фиксации данных 6.



Рисунок 2.5 – Схема поляризационного устройства

Исходящий от источника света 1 неполяризованный пучок при помощи устройства 2 перемещается в плоскости, которая перепендикулярна оси трубки 7 с заданной скоростью. В позициях 8 и 9 (рисунок 2.6), где падающий пучок отражается от внутренней поверхности, поляризация прошедшего света максимальна; серия из двух импульсов, соответствующая этим положениям, поступает при перемещении пучка света с выхода фотоприемника 4 на вход блока фиксации данных 6. Определив время Т между этими импульсами, из выражения можно вычислить параметр a (2.3):

$$a = V \times T, \tag{2.3}$$

где *а* - половина расстояния между положениями 8 и 9 пучка света, *V* - скорость перемещения пучка света, *T* - время между импульсами, а внутренний диаметр d трубки 7 можно вычислить из выражения (2.2).



Рисунок 2.6 – Ход лучей в капилляре

На рисунке 2.7 изображена схема прибора для оценки диаметров прозрачных трубок [47]. От источника света 1 пучок 6 посредством устройства 2 с не изменяющейся скоростью перемещается в плоскости, которая перпендикулярна

оси трубки 7. На линии наблюдения АА максимум рассеянного света на поверхности трубки фиксируется лишь в четырех позициях падающего светового пучка (рисунок 2.8). Рассеяние света на внешней поверхности трубки происходит в позициях 8 и 9, на внутренней - положениях 10 и 11. Серия из четырех импульсов, соответствующая этим положениям, поступает при перемещении пучка света с выхода фотоприемника 4 на вход блока фиксации данных 5. Определив время Т между первым и последним импульсами, из выражения можно вычислить внешний диаметр прозрачной трубки (2.4):

$$D = V \times T, \tag{2.4}$$

где *D* - внешний диаметр трубки, *V* - скорость перемещения светового пучка, *T* - время между импульсом 1 и импульсом 4.



Рисунок 2.7 – Схема измерителя геометрических размеров прозрачных трубок



Рисунок 2.8 – Положения падающего пучка, в которых наблюдается максимум интенсивности рассеянного света

Внутренний диметр d вычисляют по выражению (2.2.). Величину а можно найти как (2.5):

$$A = V \times t_2, \tag{2.5}$$

где *t*₂ – время между вторым и третьим импульсами.

Технологические возможности данного способа ограничены, так как не представляется возможным определить четко положение светового пучка, которому соответствует максимум рассеянного на поверхности трубки света по линии его регистрации, когда диаметр пучка равен или больше внутреннего диаметра трубы.

Устройство, которое является усовершенствованной модификацией описанного выше, учитывает данную особенность [47,48]. Прибором формируется подходящий по размеру пучок путем применения ослабителя, введенного перпендикулярно основному световому пучку. По положениям пучка, которые соответствуют изменению интенсивности света на поверхности трубки, судят о внешнем и внутреннем диаметрах прозрачных трубок (рисунок 2.9).





В работе [16] описан прибор для измерения параметров трубок, состоящий из диафрагмы 1 с непрозрачной шторкой 2, экрана 3 и контролируемой трубки 4 (рисунок 2.9). Диафрагма образует световой пучок, который по ширине больше внешнего диаметра исследуемой трубки 4, таким образом на экране в любом случае будут формироваться две границы пучка - нижняя и верхняя. При помощи шторки
пучок разделяется на два, преломляющихся на внутренних и внешних границах исследуемой трубки. От внешней поверхности трубки может полностью отражаться вторая внутренняя граница пучков, а это дает более ясное изображение контура трубки на экране.

Дополнительно трубку поворачивают вокруг ее оси на один и тот же угол, а после каждого поворота оценивают положение преломленного луча - делается это с целью исключения из процесса измерения неопределенности. Основываясь на измерениях, вычисляют оба диаметра прозрачных трубок и эксцентриситет окружностей.

В работе [34] имеется описание метода определения внутреннего и внешнего диаметров прозрачных трубок, который состоит в том, что на исследуемую трубку направляют пучок света, передвигают его перпендикулярно оси измеряемой трубки и фиксируют движение падающего светового пучка.

В итоге, при преодолении пучком света границ трубки и канала, а также в процессе перемещения светового пучка изменяется направление перемещения светового пучка, который проходит через трубку. Регистрация позиции входящего пучка света дает возможность определить оба диаметра трубки (внешний и внутренний).

Нельзя не отметить, что имеющиеся в процессе вытяжки колебания трубки низкой частоты во взаимно перпендикулярных плоскостях могут привести к значительным неточностям и погрешностям в измерениях рефракционным способом. Именно по этой причине на практике произвести точные измерения, используя эти способы, как правило, не представляется возможным. К тому же, в данных способах предполагается, что наружный диаметр трубки известен - на практике же это условие соблюдается не всегда.

2.1.3 Способ фокусировки

Способ использует запись моментов фокусировки изображения тестобъекта на первой и второй поверхностях объекта контроля и вычисление измеряемого расстояния по временным интервалам между этими фокусировками. Схема устройства, иллюстрирующая способ фокусировки, показана на рисунке 2.10 [2]. Принцип его работы следующий.

Изображение щелевой диафрагмы 2 образуется посредством осветителя 1, полупрозрачного зеркала 3 и микрообъектива 4. Тот при помощи привода 5 с неизменной скоростью совершает продольное сканирование вдоль оптической оси. Отраженное изображение на одной из поверхностей исследуемой трубки 9 перемещается объективом 4 в плоскость анализа с анализирующей диафрагмой 6. Электроимпульс максимальной амплитуды образуется на выходе из фотоприемника 7, аналогичным образом формируется второй импульс с другой поверхности стеклянной трубки. По интервалу между импульсами судят о толщине стенки стеклянной трубки.

В случае, если исследуемая трубка меняет положение, погрешностей измерения не создается, т.к. микрообъектив выстраивает протяженное изображение щелевой диафрагмы на анализирующей. Колебания трубки перпендикулярно оптической оси сканирующего объектива могут иметь место в пределах изображения щелевой диафрагмы.



Рисунок 2.10 – Схема способа фокусировки оптико-электронного устройства

Впрочем, из-за микрозагрязнений на поверхности трубки и невысокой стабильности источника света, амплитудный метод фиксации усиливает погрешность измерения. Также не учитываются возможные наклоны рубки, и возможность колебаний значения показателя преломления материала в процессе вытяжки.

2.1.4 Проекционные способы

Эти способы определяют толщину стенки и диаметры стеклянных трубок по расстоянию между пучками отраженного и преломленного света в плоскости регистрации. На рисунке 2.11 изображена схема прибора, реализующего этот способ измерения параметров стеклянных трубок [41]. На часть трубки 6 и на грани экрана 2 от осветителей 1 попадают параллельные пучки света. Объективом 3 фокусируются отражаемые от поверхностей трубки и от экрана лучи, создавая таким образом на экране 4 полосы света.



Рисунок 2.11 – Устройство для измерения диаметров трубки проекционным способом

Эти полосы сканируются фотоэлектрическим преобразователем, который вырабатывает последовательность электроимпульсов, а время между этими импульсами пропорционально расстоянию между полосами. По этому времени блоком обработки сигнала 5 определяются внутренний и наружный диаметры трубки.

Устройство для измерения толщины стенок прозрачных трубок, которое изображено на рисунке 2.12, содержит две системы - осветительную и измерительную, имеющие следующее устройство [39]:

- осветительная система состоит из источника 1 света, конденсора 2, щели 3, объектива 4;

 приемная система состоит из приемного объектива 6, диафрагмы 7 в его задней фокальной плоскости, цилиндрического объектива 8, измерительной щели
 9, развертывающего элемента 10, конденсора 11, фотоприемника 12 и блока обработки информации 13.



Рисунок 2.12 – Блок-схема устройства для измерения толщины стенки прозрачной трубы проекционным способом

Все части каждой из систем установлены последовательно, приемная система располагается под углом к осветительной. Стенка исследуемой трубки изображается при помощи приемного объектива. В результате отражения света от поверхностей трубки образуются отраженные пучки, а в плоскости щели - два ее изображения. По расстоянию между ними можно оценить толщину стенки трубки. Интервал между двумя световыми импульсами пропорционален расстоянию между частями изображений, вырезаемых на фотоприемнике щелью, и соответствует размеру стенки трубки, которая оказывает на излучение влияние в качестве цилиндрического оптического элемента. Таким образом оказывается

влияние на формирование изображений. Такие параметры как их ширина и расстояние между ними зависят от позиционирования лучей внутри стенки трубки.

Формируемое объективом в аналитической плоскости изображение щели принимает вид двух дуг меняющейся ширины, а расстояние между ними на разных участках будет отличаться. Через приемный объектив проходят световые пучки, апертура которых ограничена диафрагмой - таким образом через объектив проходит только определенный вид лучей, а именно те, что отражены от ограниченных участков поверхности трубы и располагающиеся на одинаковом расстоянии от приемного объектива даже при колебании трубки продольно изображению щели - таким образом нивелировано влияние деформации изображения щели на результаты измерений. Изображение щели увеличивается объективом до длины, при которой во время смещения трубки изображение не выходит за измерительную щель - таким образом обеспечивается непрерывность измерения вследствие поступления сигнала на фотоприемник вне зависимости от смещения трубки.

Существует способ измерения толщины стенки стеклянной трубки, заключающийся в формировании изображения, образованного световым пучком, падающим на трубку под известным углом - и по данному изображению оценивают необходимые параметры. Для того, чтобы повысить точность измерений, световой пучок от наружной поверхности трубки экранируется, на экран направляется тот пучок, что был отражён от внутренней поверхности трубки.

На рисунке 2.13 изображена схема метода измерения геометрических размеров прозрачных трубок [56]. Постоянный угол наклона лазерного пучка относительно геометрической оси исследуемой прозрачной трубки 5 формируется посредством системы 3, угол регистрируется при помощи индикатора 4, Лазерный пучок направляется в центр контролируемой трубки 5 и попадает на стенки трубки, при этом частично отражается, формируя световой пучок на светочувствительной поверхности фотоприемника 6. Сквозь стенку измеряемой трубки проходит большая часть пучка, преломляясь и отражаясь частично от внутренней цилиндрической образующей трубки. При этом формируется второй пучок,

41

проникая через прозрачную стенку, он попадает на фотоприемник. Производится определение расстояния между центрами двух отраженных пучков, значение которого принимается блоком обработки информации 7.



Рисунок 2.13 – Измерение диаметра по проекции отраженных лучей на экране

Для более точной оценки угла наклона лазерного пучка в него включают отклоняющий оптический элемент 2, который формирует два новых пучка на фотоприемнике, отражая луч под другим углом на внешней поверхности трубки. Расстояние между центрами новых пучков также принимается блоком обработки информации. Для изменения масштаба изображения пучка перед фотоприемником можно установить проекционную систему. Исходя из того, что известен показатель преломления материала, из которого выполнена трубка и углы наклона лазерного пучка в обоих измерениях с полученными расстояниями между отраженными бликами можно определить такие параметры исследуемой трубки как внутренний диаметр и толщину стенки.

Проекционные способы обеспечивают достаточно точные измерения в широких диапазонах, относительно просты в применении в автоматизированных системах непрерывного контроля, к тому же дифракция, которая искажает

световые пятна, в зоне контроля отсутствует [56]. Также эти способы позволяют нивелировать погрешности измерений из-за колебаний трубок в ходе вытяжки, но часто эти методы не принимают во внимание изменений, которые могут произойти с трубкой в процессе вытяжки.

Этот фактор принимался во внимание лишь в некоторых работах. Так в работе [58] при помощи двух фотоприемных устройств на разных расстояниях во время вытяжки учитывается «клиновидность» стенки трубки. Кроме того, в этой работе принимаются во внимание угловые колебания трубки через внедрение дополнительного автоколлимационного канала в план измерений. Работа и в первом, и во втором случаях усложняется, к тому же действительные значения измерений трубки не учитываются, как и ее положение во время процесса вытяжки. К тому же показатель преломления материала, из которого выполнена трубка, может изменяться в довольно-таки больших пределах (n=1,46 ... 1,56), хотя считается, что он является неизменным.

Эффективная схема оценки параметров трубки приведена на рисунке 2.14. Два световых пучка О и О' одновременно направляются под отличающимися постоянными углами α и β – на рисунке они направлены в точку. Прозрачные стенки трубки в плоскости, которая определена положением лучей света и плоскостью чертежа (ось трубы), выступают в роли плоскопараллельных пластин. Внешняя поверхность трубки частично отражает световые пучки и частично они преломляются под углами α' и β' . Они падают на внутреннюю поверхность трубки, где тоже частично отражаются и преломляются. Далее световые пучки, проникая в просвет трубки, снова попадают на обе поверхности стенки трубки (внутреннюю и наружную). Таким образом, в результате четырех пересечений двух пучков границы «стекло-среда», образуются четыре отражённых пучка [44,58]. Они в свою очередь попадают на плоскости Р и Р', являющиеся плоскостями анализа; положения пучков на рисунке 2.14 обозначены точками A, A', B, B', C, C', E, E'. В результате имеем (2.6 – 2.9):

$$AB = CE = a = c = 2l \times tg \ \alpha' \times cos \ \alpha, \tag{2.6}$$

$$BC = b = 2d \times \sin \alpha, \tag{2.7}$$

$$A'B' = C'E' = a' = c' = 2l \times tg \beta' \times \cos \beta, \qquad (2.8)$$

$$B'C' = b' = 2d \times \sin\beta, \qquad (2.9)$$

где *а* и *а*' – расстояния между пучками 1, 1' и 2, 2' в плоскостях анализа P и P';*b* и *b*' – расстояния между пучками 3, 3' и 4, 4' в плоскостях анализа P и P'; *с* и *с*' – расстояния между пучками 2, 2' и 3, 3' в плоскостях анализа P и P'; α и β – углы падения пучков O' и O' на наружную цилиндрическую поверхность трубки α ' и β ' - углы преломления пучков O' и O' от наружной цилиндрической поверхности трубки.



Рисунок 2.14 – Схема измерения параметров прозрачных трубок (без учета угловых наклонов)

Основные параметры трубки находятся, исходя из выражений (2.10 – 2.11):

$$l = \frac{a \cdot n_{\circ\lambda} \cdot \cos \dot{\alpha}}{\sin 2 \alpha} = \frac{a' \cdot n_{\circ\lambda} \cdot \cos \dot{\beta}}{\sin 2 \beta},$$
 (2.10)

$$d = \frac{b}{2\sin\alpha} = \frac{\acute{b}}{2\sin\beta}$$
(2.11)

и наружный диаметр (2.12)

$$D = d + 2l$$
 (2.12)

Рассчитанные по отрезкам в плоскостях анализа Р и Р ' толщина стенки (1) и внутренний диаметр (d) должны быть одинаковы независимо от углов α и β и направления, в котором идут пучки света [58].

Далее рассмотрим момент, когда показатель преломления материала, из которого изготовлена трубка неизвестен, либо имеются его отклонения вдоль оси трубки. На основе утверждения, что измерение проходит за малое время, которое никак не соизмеримо со скоростью вытяжки, можно принять, что стенка трубки никак не меняется в процессе измерений, и ее толщина остаётся постоянной. Запишем равенство[44] (2.13):

$$l = \frac{a \cdot n_{\circ\lambda} \cdot \cos \dot{\alpha}}{\sin 2\alpha} = \frac{a \cdot n_{\circ\lambda} \cos \dot{\beta}}{\sin 2\beta}$$
(2.13)

Исходя из геометрической связи углов α и α', β и β' получаем абсолютное значение показателя преломления материала, из которого изготовлена трубка (2.14):

$$n = \sqrt{\frac{\dot{a}^2 \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 \beta - a^2 \cdot \sin^2 2\beta \cdot \sin^2 \alpha}{\dot{a}^2 \sin^2 2\alpha - a^2 \cdot \sin^2 2\beta}}$$
(2.14)

В том случае, если выбрать углы зондирования, учитывая, что β=90°- α, выражение (2.8) можно, упростив, привести к виду (2.15):

$$n = \sqrt{\frac{\dot{a}^2 \cdot \cos^2 \alpha - a^2 \cdot \sin^2 \alpha}{\dot{a}^2 - a^2}} \tag{2.15}$$

Также непосредственно во время вытяжки возможно фиксировать неоднородность величины показателя преломления – что в свою очередь позволяет уменьшить погрешность измерений.

Случай, когда исследуемая трубка совершает угловые наклоны в процессе вытяжки, требует отдельного рассмотрения (рисунок 2.15), т.к. они могут привести к ощутимым искажениям размеров контролируемых отрезков в плоскостях анализа Р и Р'.



Рисунок 2.15 – Контроль измерений прозрачных трубок во время вытяжки при наличии возможных наклонов трубки из-за вибраций

Допустим, что наклон трубки в плоскости чертежа относительно исходной геометрической оси составляет Δ . Тогда рассматриваемые отрезки A_1B_1, B_1C_1, C_1E_1 , $A_1'B_1', B_1'C_1', C_1'E_1'$ между проекциями пучков лучей в плоскостях анализа P и P' можно представить выражениями (2.16 – 2.19):

$$a_{1} = c_{1} = \frac{l \cdot \sin 2(\alpha + \Delta)}{\cos 2\Delta \cdot n \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\sin(\alpha + \Delta)}{n}\right)^{2}}}$$

$$\dot{a}_{1} = \dot{c}_{1} = \frac{l \cdot \sin 2(\beta - \Delta)}{\cos 2\Delta \cdot n \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\sin(\beta - \Delta)}{n}\right)^{2}}},$$
(2.16)
(2.16)
(2.17)

$$b_1 = \frac{2d \cdot \sin(\alpha + \Delta)}{\cos 2\Delta},\tag{2.18}$$

$$\hat{b}_1 = \frac{2d \cdot \sin(\beta - \Delta)}{\cos 2\Delta}$$
(2.19)

Зондирующие пучки О и О' идут в противоположных направлениях. Проекции расстояний на плоскость Р между лучами а₁, b₁, c₁ для пучка О за счет этого будут увеличиваться, а для пучка О' – наоборот, уменьшаться. Приращение к исследуемым отрезкам в плоскостях анализа Р и Р' таким образом будет происходить с противоположным знаком [58].

Величину внутреннего диаметра трубки можно получить, пользуясь выражениями (2.18) и (2.19), получив (2.20):

$$d = \frac{b_1 \cdot \cos 2\Delta}{2\sin(\alpha + \Delta)} = \frac{\dot{b}_1 \cdot \cos 2\Delta}{2\sin(\beta - \Delta)}$$
(2.20)

С учетом выражений (2.18) и (2.19) получим (2.21):

$$\Delta = \arctan\left[\frac{b_1 - \hat{b}_1 \cdot tg\alpha}{b_1 \cdot tg\alpha + \hat{b}_1}\right]$$
(2.21)

Из того, что имеется разница в результатах вычислений внутреннего диаметра трубки в двух измерительных каналах, можно сделать вывод о том, что имел место наклон трубки во время измерений. Выражение (2.21) дает возможность найти угол наклона трубки и скорректировать результат измерений [44].

В действительности из-за непостоянства показателя преломления материала трубки и ее угловых наклонов в процессе вытяжки условия n=const и Δ =0 не соблюдаются. По этой причине вычисление толщины стенки и внутреннего диаметра трубки целесообразно будет проводить по формуле [58] (2.22):

$$l = \frac{a_1 \cdot (n_{\circ\lambda} \pm \delta_n) \cdot \cos \alpha \cdot \dot{\cos} \Delta}{\sin 2(\alpha \pm \Delta)} = \frac{\dot{a_1} \cdot (n_{\circ\lambda} \pm \delta_n) \cdot \cos \beta \cdot \cos \Delta}{\sin 2(\beta \pm \Delta)}, \quad (2.22)$$

где *a*₁ и *a*₁' - проекции расстояний между световыми лучами 1, 1' и 2, 2' на плоскости анализа Р и Р' (отрезки A₁B₁ и A₁'B₁');

 $\delta_n - n_{0\lambda} - n$ – отклонение показателя преломления материала трубки; $n_{0\lambda}$ – показатель преломления, который был известен до измерения; n – вычисленный показатель преломления;

$$d = \frac{b_1 \cdot \cos 2\Delta}{2\sin(\alpha \pm \Delta)} = \frac{\dot{b}_1 \cdot \cos 2\Delta}{2\sin(\beta \pm \Delta)}, \qquad (2.23)$$

где b₁ и b₁' - проекции расстояния между световыми пучками 2, 2' и 3, 3' на плоскости анализа Р и Р' (отрезки B₁C₁ и B₁'C₁').

Выражение для расчета показателя преломления (2.15) при наклоне трубки примет следующий вид (2.24):

$$n = \sqrt{\frac{\dot{a}_1^2 \cdot \sin^2 2(\alpha \pm \Delta) \cdot \sin^2(\beta \pm \Delta) - \dot{a}_1^2 \cdot \sin^2 2(\beta \pm \Delta) \cdot \sin^2(\alpha \pm \Delta)}{\dot{a}_1^2 \cdot \sin^2 2(\alpha \pm \Delta) - a_1^2 \cdot \sin^2 2(\beta \pm \Delta)}}$$
(2.24)

В случае, если соблюдается условие β=90°-α, то выражение (2.24) приводится к следующему виду (2.25):

$$n = \sqrt{\frac{\dot{a}_{1}^{2} \cdot \cos^{2}(\alpha \pm \Delta) - a_{1}^{2} \cdot \sin^{2}(\alpha \pm \Delta)}{\dot{a}_{1}^{2} - a_{1}^{2}}}$$
(2.25)

Приведенный порядок измерений повышает точность контроля измерений прозрачных трубок. Это происходит за счет принятия во внимание погрешностей, которые вызваны угловыми наклонами трубки в процессе вытяжки и учета колебаний показателя преломления материала трубок. Такой план измерений может быть использован в качестве основы для бесконтактного контроля параметров прозрачных трубок, причем, в процессе вытяжки. Возможно создание устройства, которое будет обеспечивать контроль параметров вытяжной машины, и применяться с целью повышения качества выпускаемой продукции [44,58].

Для повышения точности и достоверности измерений заменяется линейный приемник двумерной плоскостью (экраном). Создание такой методики имеет важное научное и практическое значение, так как ее реализация позволит повысить точность измерения характеристик измерительных трубок [44].

2.1.5 Способ поперечного сечения

Способ поперечного сечения основан на использовании анализа оптического изображения конца трубки, которое образуется с помощью двухкоординатного видеодатчика. На рисунке 2.16 схематически показано устройство, фотографирующее поперечное сечение трубы. Оптическая ось объектива видеодатчика идеально совпадает с геометрической осью тубуса. При необходимости можно использовать дополнительное освещение для повышения контрастности изображения.



Рисунок 2.16 – Схематическое изображение устройства, фотографирующего поперечный разрез трубки: 1 - измеряемая трубка; 2 - поперечное сечение трубки; 3 — видеодатчик

В литературе рассмотрены программные средства и алгоритмы [56], позволяющие идентифицировать сечения труб на оцифрованных изображениях. Для повышения точности можно сделать снимок отдельного участка профиля трубы, а не всего профиля. Впоследствии, вращая трубку, можно отсканировать весь профиль и рассчитать его размеры.

Недостатком этого подхода является его высокая трудоемкость, длительное время измерения и проблемы с внедрением на производственных линиях [56].

2.2 Обнаружение дефектов поверхности стеклянной трубки

Обнаружение дефектов стекла требует использования соответствующей системы освещения и камеры для получения хорошего изображения. От системы освещения в значительной степени зависит оперативность и точность обнаружения дефектов. Источником света, обычно используемым в машинном зрении для обнаружения дефектов стекла, является светодиодная матрица [86].

В зависимости от распределения и расположения источника света системы освещения выделяют работу на светлом поле, темном поле, при контровой подсветке и при коаксиальном освещении [89,91].

На рисунке 2.17 (а) красный путь связан с интенсивным полевым светом, что приводит к высокому визуальному контрасту. Напротив, когда источник света

расположен вдоль синего пути, линза улавливает рассеянный отраженный свет, т.к. гладкая поверхность отражает свет наружу. Это позволяет получать изображения поверхностей с вогнуто-выпуклой текстурой [88]. На рисунке 2.17 (б) показано подсветки специально для прозрачных объектов. Контур использование полученного изображения четкий и позволяет обнаружить внутренние дефекты, хотя при этом возникают проблемы с выявлением поверхностных дефектов [106]. На рисунке 2.17 (в) изображен метод коаксиального освещения, при котором свет выводится непосредственно на объект с помощью спектроскопа [91]. Свет и линза расположены вдоль одной оси, что позволяет им эффективно противостоять внешним воздействиям.



Рисунок 2.17 – Схема освещения для обнаружения дефектов: (а) светло-темное поле; (б) подсветка сзади; (в) коаксиальный свет; (г) линейный задний свет; (д) многоракурсный; (е) структурированное поле

На рисунке 2.17 (г) изображена линейная подсветка, обладающая надежной защитой от шума [91]. На рисунке 2.17 (д) показано многоракурсное освещение, при котором свет направляется на поверхность объекта под несколькими углами. Способ подходит для работы с изогнутыми поверхностями [70].

На рисунке 2.17 (е) показано использование структурированного светового освещения, при котором свет проецируется на поверхность объекта с определенной структурой, например, точку, линию или поверхность [104]. Он подходит для измерения обширных трехмерных площадей, хотя и занимает значительный объем пространства.

Машинное зрение при промышленном контроле часто использует освещение, образующее яркое и темное поля [88]. Чанг [70] использовал темнопольное освещение для выявления дефектов поверхности стекла сенсорного экрана, что позволило достичь высокой скорости обнаружения царапин. Мартинез [90] разработал бинарную систему активного освещения. Пэнг [99] использовал красную светодиодную лампочку в качестве источника подсветки. Юань [105] использовал гибридный подход, включающий систему подсветки и камеру линейного сканирования, чтобы улучшить качество изображения и соотношение сигнал/шум. Кроме того, некоторые исследователи увеличили количество камер, чтобы улучшить качество изображения.

обычно Цветовые характеристики описываются посредством статистического анализа распределения цвета изображения. Однако цветовые слишком избыточной характеристики содержат информации много И представляют собой многоканальные данные. Чтобы эффективно снизить сложность вычислений, сохраняя при этом детали изображения, обычно используется преобразование изображения RGB в оттенки серого.

В работе [102] сравнена эффективность извлечения признаков компонентов в разных цветовых пространствах RGB, HSV, YcbC, NTSC и серому пространству и показано, что серое пространство является наиболее подходящим.

Но незначительные дефекты или изменения на поверхности стекла выявить труднее. Поскольку в сером пространстве отсутствует информация о цвете, оно

51

содержит только оттенки серого, что снижает визуальный контраст по сравнению с цветными изображениями.

Улучшение изображения заключается в улучшении или выделении некоторых функций без увеличения объема информации об изображении. Удаление шума изображения — это первый шаг предварительной обработки, поскольку шум и помехи при получении изображения могут повлиять на обнаружение дефектов в прозрачных компонентах. Традиционные способы включают повышение резкости деталей и удаление шума.

Усредняющие фильтры нечувствительны к дискретным точкам дефектов стекла, тогда как медианные ослабляют информацию о краях.

Для снижения уровня шума часто используется фильтр Гаусса. Фильтр работает как фильтр нижних частот, уменьшая влияние высокочастотных компонентов, таких как шум [21,63].

Сегментация изображения является важным этапом между предварительной обработкой изображения и его анализом [21,83]. Сегментация изображения фокусирует интересующую цель, снижает затраты на обнаружение и выделяет информацию о дефектах для извлечения признаков. Обычно используемые методы сегментации изображения для стекла включают пороговую сегментацию.

Основной принцип пороговой сегментации — выделить целевую область посредством статистического расчета уровня серого изображения и найти соответствующий порог для бинаризации изображения.

Бинаризация — это процесс преобразования изображения в черно-белый формат, где каждый пиксель принимает одно из двух значений (обычно 0 или 1). Этот метод используется для выделения объектов на фоне, что особенно важно при обнаружении дефектов, например, в трубках. При бинаризации ищутся пороги, которые разделяют пиксели на две категории: те, что принадлежат объекту (например, дефекту), и те, что принадлежат фону. Неправильный выбор порога может привести к пропуску дефектов или, наоборот, к ложным срабатываниям. Из-за упрощенного фона стеклянного компонента он проявляется как равномерная область, которая не содержит значительных изменений яркости. Концентрированные уровни серого — это участки изображения, где интенсивность серого цвета сосредоточена в определённых диапазонах, что может указывать на наличие дефектов или неоднородностей в материале[102].

На гистограмме по оси абсцисс обычно откладываются уровни яркости (интенсивности), а по оси ординат — количество пикселей, соответствующих каждому уровню яркости. Это позволяет визуализировать распределение яркости в изображении. Если на гистограмме наблюдаются два пика, это может указывать на наличие двух различных объектов или областей с разной яркостью, что может привести к некачественным результатам при бинаризации, так как алгоритм может не корректно разделить эти области, что затруднит обнаружение дефектов. Когда на гистограмме один пик, пороговое значение может быть легко выбрано. Тем не менее, иногда присутствие сильного, неравномерного или неоднородного света идентификации дефектов значительно снижает точность оптических на изображениях (в гистограмме два пика), приводит к некачественным результатам (рисунок 2.18 б).



Рисунок 2.18 – Гистограммы изображения стекла: а) – с одним пиком; б) с двумя пиками; в) при использовании метода Оцу [81]

Изображение высокого разрешения содержит значительное количество данных, а распределение значений серого на гистограмме неравномерно. Следовательно, более подходит подход Оцу, представляющий алгоритм, который автоматически определяет оптимальный порог для бинаризации изображения, минимизируя внутриклассовую дисперсию и максимизируя межклассовую

53

дисперсию. Это делает его более эффективным по сравнению с простыми способами, так как он учитывает статистику изображения и позволяет лучше выделять объекты на фоне. В контексте обнаружения дефектов, использование способа Оцу может значительно повысить точность, так как он адаптируется к различным условиям освещения и текстуре изображения, что критично для качественного анализа трубок [21].

Морфологические операции обычно используются и применяются к формам и структурам внутри изображений в двоичных изображениях, чтобы увеличить размер объектов на изображениях, а также для фильтрации в результате операций предварительной обработки.

Эти операции особенно полезны в задачах сегментации изображений, обнаружения объектов и удаления шума. К основным морфологическим операциям относятся [94]:

Эрозия: уменьшает размеры объектов, удаляя пиксели по краям. Это полезно для удаления мелких шумов и разделения соединённых объектов.

Дилатация: увеличивает размеры объектов, добавляя пиксели к краям. Это помогает соединять близко расположенные объекты и заполнять небольшие пробелы.

Морфологический процесс обнаружения дефектов требует больших вычислительных затрат, а также зависит от структурного элемента, используемого для обработки входного изображения, который является критическим элементом в процессах морфологического расширения и эрозии. Изменение количества пикселей в изображении зависит от его размера и состава [91].

Авторы [66,98] используют метод Собеля, для обнаружения дефектов в стекле. А также Кани и Лапласиан.

2.3 Выводы к главе 2

Контроль пороков трубного стекла и дефектов собственно трубок в настоящее время все-таки большей частью выполняется органолептическим методом. Оценка дефектов проводится оператором визуально, а на основании этой оценки принимается решение об отнесении продукции к браку на основании требований ГОСТа.

Естественно такой контроль не является надёжным, так как могут быть дефекты, невидимые при сколь угодно благоприятных условиях – это зависит от яркости, контраста, размеров объекта, условий освещенности. При слишком малой яркости или контрасте человеческий глаз не может различить некоторые объекты даже при продолжительном просматривании [69]. И, таким образом, неверное определение класса пороков и параметров дефектов может привести к попаданию негодных трубок в хорошую продукцию или, наоборот, годных трубок в брак.

Поэтому естественно появление работ по автоматизации контроля трубок, замене человеческого глаза техническим зрением. Анализ литературных источников, однако, показал, что в основном контролировались диаметры (внешний и внутренний) и толщина трубок. При этом в большинстве работ ограничивались точным измерением этих параметров трубки в одном сечении и, дефекты, образом, не контролировались таким такие возможные как разнотолщинность, эллипсность и др. Кроме того, большинство предложенных способов не было рассчитано на работу непосредственно при вытяжке трубы и в реальном времени.

Более того, анализ литературных источников показал, что разная природа дефектов и их проявлений не дает возможности использования одного алгоритма для их обнаружения и идентификации. В то же время не появилось сообщений о разработке комплексного алгоритма для контроля хотя бы часто возникающих дефектов. Проблема осложняется тем, что ряд параметров кварцевых трубок не имеет средств для измерения в производственных условиях.

Постановка задачи исследования

Анализ литературных источников, рассматривающих параметры и дефекты трубок из кварцевого стекла, свидетельствует о высокой актуальности разработки комплексного алгоритма, позволяющего эффективно выявлять различные поверхностные дефекты трубок в режиме реального времени. Предлагаемая диагностическая система должна обеспечивать стабильную работу в условиях реального производства, при наличии вибрации трубок при вытяжке.

Исследование существующих алгоритмов дефектоскопии стеклянных трубок показало, что большинство из них не ориентированы на функционирование в режиме реального времени и производят детектирование лишь отдельных видов дефектов. В связи с этим основная цель данной работы заключается в разработке методологического обоснования, структуры и алгоритмического обеспечения системы контроля и диагностики кварцевых трубок в процессе производства в реальном времени.

Реализация поставленной цели требует решения следующих задач:

• Проанализировать технологический процесс производства кварцевых трубок и выявить возможные дефекты и сформулировать требования к диагностической системе.

• Оценить существующие способы обнаружения и идентификации дефектов кварцевых трубок с точки зрения их соответствия современным требованиям и возможности работы в реальном времени.

• Разработать частные алгоритмы обработки изображений, а также интегрированный комплексный алгоритм, обеспечивающий высокоточное выявление и идентификацию дефектов трубок из кварцевого стекла.

• Провести экспериментальные исследования с целью верификации эффективности предложенных алгоритмов и их программной реализации.

При этом, представляется целесообразным использование специализированных библиотек алгоритмических примитивов, включая OpenCV, а также стандартной библиотеки Python, а также интегрированной среды разработки PyCharm 2021.3.1 (Community Edition).

ГЛАВА З АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ И ДЕФЕКТОВ КВАРЦЕВЫХ ТРУБОК

3.1 Получение изображения трубки

Из материмала второй главы следует, что несмотря на высокий уровень автоматизации большинства этапов производства стеклянных трубок, заключительная стадия технологического процесса по-прежнему предполагает ручной контроль. На данном этапе осуществляется сортировка изделий по категориям, а также выявление и отбраковка трубок с дефектами поверхности, несоответствием толщины или отклонениями внутренних и внешних диаметров от нормативных значений.

Для обеспечения точного контроля толщины и выявления поверхностных дефектов в процессе вытягивания трубки необходимо правильно выбрать способ измерений и оптимизировать расположение зон контроля. Кроме того, важной задачей является минимизация влияния возможной вибрации трубки на точность измерений.

В настоящее время использование как аналоговых, так и цифровых цветных камер не вызывает значительных затруднений. Однако для получения качественных изображений трубки в реальном времени, позволяющих достоверно фиксировать дефекты, требуется создать соответствующие условия съёмки, в частности оптимизировать освещение контролируемой зоны трубки. Корректная организация светового потока играет ключевую роль в обеспечении эффективного обнаружения и измерения дефектов при использовании систем машинного зрения.

На основании анализа возможных источников освещения, в качестве основного варианта был выбран лазерный. Лазерное освещение обладает рядом преимуществ перед традиционными ламповыми или светодиодными источниками. Хотя лазеры имеют более высокую стоимость по сравнению со светодиодами, они обеспечивают высокую когерентность излучения и обладают значительно большей яркостью, что важно для получения чёткого изображения при диагностике кварцевых трубок.

Важным фактором при выборе аппаратных средств системы контроля является тип используемой камеры. В настоящее время применяются камеры, основанные на ССD- и СМОS-технологиях. В данной работе было принято решение использовать СМОS-камеру, поскольку такие устройства обладают более низкой стоимостью по сравнению с ССD-аналогами.

На рисунке 3.1 показан спектральный отклик CMOS - матрицы некоторой типовой камеры. Хорошее значение отклика CMOS - камеры наблюдалось в диапазоне длин волн 620-750 нм,, поэтому в качестве источника света выбран источник, излучающий в этом диапазоне длин волн. Тем более, что красный цвет хорошо контрастирует с фоном, окружающем вытягиваемую трубку.



Рисунок 3.1 – Спектральная чувствительность разных типов камер

Для получения изображений для надежной работы учитывалось ожидаемое значение минимально обнаруживаемого дефекта.

Процедуры первичной обработки изображений, используемых системой диагностики трубок из кварцевого стекла, в целом аналогичны стандартным методам обработки изображений, широко применяемым в различных областях. Данный этап, как правило, включает фильтрацию шумов, преобразование изображения в градации серого, обнаружение объектов и другие операции. Алгоритмы, реализующие эти процедуры, хорошо изучены и систематизированы в специализированных библиотеках. Поэтому было решено использовать алгоритмические примитивы из этих библиотек, а именно из: OpenCV, NumPy, Scikit-Image и Matplotlib (при этом в основном использовалась библиотека OpenCV).

3.2 Структура предлагаемого комплексного алгоритма контроля параметров трубки из кварцевого стекла

На рисунке 3.2 показана блок-схема алгоритма работы предлагаемой системы мониторинга состояния трубок из кварцевого стекла. В процессе мониторинга система производит измерение толщины трубки, обнаружение отклонений от круглой геометрии трубки и выявление потенциальных дефектов поверхности, описанных в первой главе. Поэтому система контроля (камера и освещение) расположена перед упаковочными машинами.

Фактически блок-схема алгоритма контроля, представленная на рисунке 3.2, содержит набор операций, необходимых для обработки изображений, образованных лучами, отраженными от внутренней и внешней стенок стеклянной трубки, а также изображений поперечного сечения трубки и изображений поверхности трубки. Эти операции объединены в три группы по типу процедур, используемых для их осуществления.

Прежде всего, после получения изображений и предварительной обработки каждого из них, выполняется комплекс процедур по измерению толщины трубки и определению соответствия геометрической формы трубки окружности и дефектов на поверхности трубки. Трубка, толщина которой не соответствует требованиям, отбраковывается. Алгоритм также обеспечивает возможность контроля внешнего и внутреннего диаметра трубки. Все эти операции, как будет показано ниже, выполняются в реальном времени без необходимости использования эталонных трубок[10,11].

3.3 Контроль толщины трубки

При типовом способе измерения толщины стенки прозрачной трубки используется освещение ее узконаправленным лучом. При этом за счет отражения света от внешней и внутренней стенок трубки, образуются два луча. Определить толщину стенки трубки можно по расстоянию Δ между ними (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Структурная схема предлагаемого комплексного алгоритма контроля трубок из кварцевого стекла

В главе 2 также было отмечено, что способ неустойчиво работает при вибрациях трубки, которые могут возникать в процессе волочения. Поэтому нами предложено для повышения робастности использовать соответствующую компьютерную обработку изображений этих отраженных лучей.

Оптическая конфигурация системы включает источник света (LED или лазер), положение которого можно перемещать в процессе настройки, и цифровую камеру. В работе использовался лазер с пиковой длиной волны 635нм и с мощностью 3мВт от Beijing Method Technology Co., Ltd.

Лазерный луч отражается от внутренней и внешней поверхностей передней

60

и задней стенок трубки, а изображение захватывается камерой и затем передается на компьютер для последующей обработки (рисунок 3.3). Важно, что расстояние от трубки до экрана должно быть не менее полуметра, так как температура в печи в процессе вытяжки может достигать 1000–1300 °C [4,9].



Рисунок 3.3 – Схема получения измерительной информации контроля толщины стенок трубки: а) при вертикальном вытягивании трубки; б) при горизонтальном вытягивании трубки

На рисунке 3.4 показана схема измерения толщины стенки трубки. Луч, вышедший из источника под углом і относительно образующей трубки, при встрече с поверхностями стенки трубки претерпевает преломление и отражение, в результате чего образуются два луча. Расстояние Δ между этими лучами прямо пропорционально толщине трубки β. При выборе угла падения луча необходимо учитывать безопасное расстояние и установочные размеры по оси трубки. С увеличением угла увеличиваются и установочные размеры.



Рисунок 3.4 – Иллюстрация работы способа

Как видно из рисунка 3.4, величина Δ равна: $\Delta = \alpha \cos i$. При этом $\alpha = 2\beta \operatorname{tg} j$, где j — угол преломления, который можно найти из выражения $n_{\mathrm{B}}\sin i/n_{\mathrm{C}}\sin j$, где n_{c} — показатель преломления кварца ($n_{c} \approx 1.46$ -1.53), а n_{B} — показатель преломления воздуха ($n_{\mathrm{B}} = 1,000278$). В результате для угла преломления получим: j = arcsin(sini/n_c) и, таким образом, для значения Δ получаем выражение (3.2):

$$\Delta = 2\beta \operatorname{tg}(\arcsin(n_{\rm B}\sin i/n_c))\cos i \tag{3.2}$$

Из выражения (3.2) следует, что величина Δ зависит от угла падения луча *i*, поэтому желательно задавать такой угол падения луча, чтобы величина Δ была бы как можно больше. Для расчета толщины стенки β из выражения (3.2) получим (3.3):

$$\beta = \frac{\Delta \sqrt{n_c^2 - (n_{\rm B} \sin i)^2}}{\sin 2i} \tag{3.3}$$

В таблице 3.1 и на графике (рисунок.3.5) показана зависимость $\Delta = f(i)$, полученная зависимость имеет максимум измеряемой величины Δ при угле падения луча $i \approx 50^{\circ}$, при этом скорость изменения Δ при приближении к максимуму заметно уменьшается [9].

Таблица 3.1 – Зависимость величины △ от угла падения по (3.2)

і град	cos i	sin i	$\sin i' = \frac{\sin i}{n_0}$	і' град	tg i'	Δ
30	0.87	0.5	0.34	20	0.36	0.63 β
35	0.82	0.57	0.39	23	0.42	0.69 β
40	0.77	0.64	0.44	26	0.49	0.75 β
45	0.71	0.71	0.49	29	0.55	0.78 β
50	0.64	0.77	0.53	32	0.58	0.79 β
55	0.58	0.82	0.56	33.8	0.67	0.78 β



Рисунок 3.5 – Расчётная зависимость измеряемой величины Δ от угла падения луча *i* при толщине трубки $\beta = 1$ мм

Хотя на графике представлен частный случай зависимости, а именно при фиксированной толщине стенки β =1мм, в общем случае профиль зависимости будет аналогичным при любой толщине стенки. Таким образом представленная зависимость будет полезна при выборе угла падения луча *i*, фиксируемого при юстировке установки (рисунок 3.6). Зафиксированный угол падения луча используется для решения задачи определения неизвестной величины толщины стенки трубки β по измеряемой величине расстояния Δ между отражёнными от внутренней и внешней стороны стенки трубки лучами.



Рисунок 3.6 – Связь толщины стенки β и измеряемой величины Δ при различных фиксированных углах падения луча *i*

Как видно из графика одной и той же толщине стенки трубки β соответствуют различные значения Δ в зависимости от выбираемого угла падения луча *i*. Таким образом при определении толщины стенки необходимо контролировать и жестко поддерживать постоянство угла падения луча *i*.

Рассмотрим более подробно работу блока алгоритма, обозначенного на блок-схеме комплексного алгоритма (рисунок 3.3) оператором «Определение толщины стенки трубки». Структурная схема этого блока алгоритма приведена на рисунке 3.7 [9].



Рисунок 3.7 – Блок-схема блока предлагаемого алгоритма для измерения толщины стенки трубок [9]

Алгоритм реализован на языке программирования Python 3.10 в интегрированной среде разработки PyCharm 2021.3.1 (Community Edition). Библиотека OpenCV, известная своими возможностями манипулирования цифровыми изображениями, использовалась вместе с другими библиотеками, специализирующимися на анализе изображений [55].

Чтобы определить толщину стенки трубки по описанному выше способу, необходимо произвести анализ изображений, спроецированных и образованных лучами лазера, отраженными как от внешней, так и от внутренней стороны стенки трубки (см. рисунок 3.4) и выделить изображения этих двух лучей. Тогда для определения Δ будет достаточно подсчитать количество пикселей между центрами каждого из лучей (как на рисунке 3.8), чтобы определить толщину трубки по (3.3). Однако это требует целого ряда операций. Рассмотрим их подробнее.



Интенсивность

Рисунок 3.8 – Значение интенсивности пикселей для изображения и расстояние в пикселях между центрами изображений двух лучей (∆=61 пиксель)

Так как рассматриваемый блок комплексного алгоритма, определяющий толщину стенки трубки, обычно работает первым при начале очередного цикла работы комплексного алгоритма, то при получении изображения производится первичная его обработка, включающая фильтрацию шума (медианный фильтр), переход в оттенки серого и бинаризацию с адаптивным порогом Оцу (рисунок 3.7) [63]. В результате мы получаем две белых полосы на черном фоне – изображения лучей, отраженных от внутренней и внешней сторон стенки трубки (рисунок 3.8).

Далее необходимо найти центры этих полос. Это производит функция medial_axis (импортирована из библиотеки Skimage.morphology), которая применяется к двоичному изображению, содержащему объекты, представленные белыми пикселями (255), и объекты фона, представленные черными пикселями (0) [101]. Функция проводит морфологическое прореживание, которое последовательно удаляет пиксели с границы, сохраняя при этом конечные точки сегментов линии до тех пор, пока прореживание становится невозможным, этот момент соответствует попаданию на центры объектов переднего плана (в нашем случае – полос, соответствующих изображениям лучей) [85,97,103,104].

Теперь остается измерить расстояния между найденными центрами этих полос. Для этого с помощью функции cv2.findContours() находятся контуры в двоичном изображении. В OpenCV предусмотрено 2 типа аппроксимации: сначала выполняется cv.CHAIN_APPROX_NONE, при котором все граничные точки сохраняются. Однако для прямого контура необходимы только две конечные точки. А второй тип — cv.CHAIN_APPROX_SIMPLE удаляет лишние точки, экономя память [71]. В данной работе принят второй тип.

В нашем случае было решено использовать режим RETR_EXTERNAL. В этом режиме извлекаются обнаруженные белые линии на изображении, гарантируя, что контур является независимым объектом [71,72].

Используя функцию cv2.fillPoly(), область, окруженная контуром, заполняется белыми пикселями. Расстояние между пикселями можно определить с помощью функции: dist = cv2. distanceTransform (Порог изображения, cv2.DIST_L2, 5) [76].

67

Однако важно признать, что эффективность этого способа зависит от чистоты анализируемых трубок. В тех случаях, когда трубки недостаточно чисты, различие между двумя лучами может быть нечетким.

В этой функции рассматриваются различные типы расстояний, используемые при измерении расстояний и показателей. Расстояние L2 (евклидово расстояние - Рисунок 3.9), представляет собой метрику, используемую для измерения расстояния между двумя точками в двумерном пространстве. Расстояние L2 между центрами полос рассчитывается по формуле [96] (3.5):

DIST_L2 =
$$\sqrt{[(x_{22} - x_{11})^2 + (y_{22} - y_{11})^2]}$$
 (3.5),

где:

 $[x_{11}, y_{11}]$: координаты точки центральной линии одной полосы;

[x_{22} , y_{22}]: координаты соответствующей точки центральной линии другой полосы;

DIST_L2: расстояние между [x_{11} , y_{11}]и [x_{22} , y_{22}].

При этом с помощью функции minMaxLoc() определяются точки на центральных линиях полос, соответствующие максимальному и минимальному расстояниям между ними.



Рисунок 3.9 – Иллюстрация измерения Евклидова расстояния

В разных точках вдоль центров полос на изображении из-за возможных помех значения Δ могут быть неодинаковыми, поэтому алгоритм рассчитывает Δ в нескольких точках и усредняет полученные значения. Толщина трубки далее рассчитывается по выражению (3.3).

Однако, программа контролирует также разности между максимальными и минимальными значениями Δ и β. Это позволяет контролировать разнотолщинность стенок трубок, хотя разнотолщинность проще определять

вторым блоком комплексного алгоритма, контролируя толщину стенки по контуру торца трубки в полярных координатах (п.3.4). Установив некоторое пороговое значение, можно, в случае необходимости, отбраковывать трубки с отклонениями разности толщин более этого порога.

3.4 Обнаружение отклонений формы кварцевых трубок от круговой и измерение диаметра

В этом параграфе рассматривается предлагаемый способ контроля отклонений формы трубки из кварцевого стекла от правильного круга по ее поперечному сечению. В этом случае камера снимает торец трубки с помощью зеркал, установленных под углом 45⁰ градусов, как показано на рисунке 3.10. При этом используется камера того же типа, что и для измерения толщины трубки, а в качестве источника света здесь могут быть использованы более дешевые светодиодные матрицы, при этом, как и в предыдущем случае, использовался красный диапазон излучения.



Рисунок 3.10 – Схема установки для контроля торцевых дефектов кварцевой трубки

При обработке изображений здесь целесообразно перейти от традиционных декартовых координат к полярным. В этом случае идеальный круг можно было бы

представить в виде прямой линии в полярных координатах. Тогда все отклонения от прямой будут характеризовать дефекты формы трубки (другими словами, трубка не круглая) [6].

Блок-схема разработанного алгоритма (второй блок комплексного алгоритма – рисунок 3.3) представлена на рисунке 3.11. Для обработки изображений использовалась библиотека OpenCV, а программа, реализующая обработку, была написана на Python 3.10.



Рисунок 3.11 – Структурная схема блока для определения отклонения формы трубки от круговой

После захвата изображения в пространстве RGB с цифровой цветной камеры его фильтрют от шума (медианный фильтр с окном 3х3), а затем преобразуют в пространство HSV. Чтобы цвета выглядели более реалистичными и точными[63].

В отличие от системы RGB, представляющей цвет как сумму основных цветов, система цветовых координат HSV сразу кодирует цветовой тон (Hue), насыщенность (Saturation) и яркость (Value) – Рисунок 3.12. В HSV, значения оттенка попадают в диапазон 0 - 360 (по оси х), значения насыщенности попадают в диапазон 0 – 255 (на рисунке показаны цвета с максимальной насыщенностью, условно обозначенной как S=1), значения интенсивности находятся в диапазоне 0-255 (на рисунке условно показан диапазон 0-1)[15]. Отраженные лучи (красный цвет) в HSV имеют значения оттенка примерно в диапазоне от 0 до 10 и от 160 до 180 (рисунок 3.12). Таким образом, выбранный нами для освещения трубки красный цвет имеет более высокую насыщенность, что делает его более ярким и легко отличимым от фона [6].



Рисунок 3.12 – Представление цветового пространства HSV

Следует отметить, что изображение в цветовом пространстве RGB сохраняется в формате BGR в OpenCV-Python, для отображения изображения в правильных цветах, сначала необходимо преобразовать изображение с помощью cv2.cvtColor (image, cv2.COLOR_BGR2RGB) и потом преобразовать в цвета изображения HSV.

Зная тон (цвет излучения) можно сравнительно легко выделить на изображении интересующую область, в нашем случае – торец трубки. При этом следует отметить, что когда дело доходит до обнаружения и выделения определенных цветов в изображениях, цветовое пространство HSV (оттенок, насыщенность, значение) также предпочтительнее цветового пространства RGB. Во-первых, цветовое пространство HSV более устойчиво к изменениям внешнего

освещения, чем цветовое пространство RGB. Во-вторых, работа со значениями HSV значительно упрощает выделение цветов. Это связано с тем, что представление цвета HSV позволяет применять несколько масок, каждая из которых имеет низкие и высокие пороговые значения для оттенка, насыщенности и интенсивности. Пикселям в пределах этих порогов присваивается значение 1, а остальным пикселям — ноль. Этот процесс позволяет относительно легко выделять определенные цвета на изображении.

В дальнейшем необходимо обозначить конкретную область в цветовом пространстве HSV на основе ее цвета и диапазона изменения значений интенсивности. Можно выбрать определенный цвет на карте цветов в библиотеке OpenCV. Далее выполняется определение диапазона изменения значений H и S в интересующей области, затем устанавливается диапазон V. Эти диапазоны используются для настройки функции cv2.inRange(), которая в результате возвращает бинарное (черно-белое) изображение торца трубки.

Полученное изображение состоит из двух отдельных частей, представленных белыми и черными пикселями. Белая область соответствует значениям интенсивности пикселей в желаемом диапазоне, а черная область соответствует значениям интенсивности пикселей за пределами этого диапазона [84]. Таким образом, получаем бинарное изображение: в нашем случае белый контур торца трубки на черном фоне. Блок-схема алгоритма показана на рисунке 3.13.

Преобразование в полярную систему координат осуществляется с помощью функции cv2.linearPolar() [78]. Для этого функции необходимо определить два параметра: координаты и диагональ охватывающей области. Результат перевода в полярную систему координат, т.е. вид результирующей кривой, будет зависеть от правильности определения координат, определяющих профиль поперечного сечения трубки.

72


Рисунок 3.13 – Блок-схема цветовой сегментации

Для идеального круга геометрический центр считается полюсом. Однако в отличие от традиционной круглой формы профиль поперечного сечения трубки является кольцевым, при этом внешний и внутренний контуры кольца, характеризующие наружную и внутреннюю поверхности стенки трубки, представляют собой два круга, которые в реальности могут быть не соосными, т.е. не иметь общего центра. Кроме того, профили поперечного сечения внешней и внутренней стенок могут отличаться от профиля идеального круга, например, иметь эллиптическую или граненную (со скосами) форму.

В данной работе в качестве полюса было решено использовать центр прямоугольника, описывающего профиль поперечного сечения трубки. Для этого в алгоритме применена функция cv2.BoundingRect(), где в качестве входных данных используется информация о внешнем контуре торца трубки. Эта функция

возвращает данные о центре и диагонали изображения, которые используются для преобразования в полярную систему координат.

Результатом перевода в полярную систему координат является изображение, на котором вертикальная ось соответствует полярному углу, а горизонтальная ось соответствует полярному радиусу (рисунок 3.14).

Далее выделяется контур наружной и внутренней поверхностей стенки трубки на профиле поперечного ее сечения в полярных координатах. Их удобно выразить в виде графиков функций полярного угла.

Для преобразования декартовых координат в полярные мы используем следующие выражения (3.6):



$$r^2 = x^2 + y^2, \quad \tan \theta = \frac{y}{x} \tag{3.6}$$

Рисунок 3.14 – Иллюстрация перевода в полярную систему координат а) исходное цифровое изображение в декартовых координатах; б) обработка цифрового изображения в полярных координатах

При выборе значения θ необходимо учитывать, в каком квадранте находится точка, так как для любого заданного числа *a* существует два угла с tang $\theta = a$ в интервале $0 \le \theta \le 2\pi$. Чтобы правильно определить угол, нужно:

- если х>0 и у≥0 (1-й квадрант), θ рассчитывается по (3.6);

- если x<0 (2-й и 3-й квадранты), к θ добавляется π;

- если x>0 и y<0 (4-й квадрант), к θ добавляется 2π (если нужен положительный угол).

С помощью функций OpenCV (minMaxLoc()) и DistanceTransform() можно определить овальность трубки, определяя максимальное и минимальное расстояние между контурами внешней и внутренней стенки трубки и осуществляя поиск по всему диапазону изменения полярного угла (0-360°). Местоположения максимальной и минимальной толщины обозначены красными и зелеными горизонтальными линиями на соответствующих значениях полярного угла – см. рисунок 4.8 в главе 4.

Для вычисления отклонения от прямолинейности в изображениях с использованием OpenCV, необходимо определить идеальную линию и измерить расстояние между точками обнаруженной линии и этой идеальной линией. Для этого мы использовали функцию cv.FindContours() обнаружения краев на изображении. Далее для обнаружения линий на изображении использовалось преобразование Xaфa (Hough Transform). Эта техника эффективна для определения прямых линий даже при наличии шума.

В библиотеке OpenCV реализация преобразования Хафа осуществляется с помощью функции cv2.HoughLinesP(). Эта функция является оптимизированной версией стандартного преобразования Хафа, известной как вероятностное преобразование Хафа (3.7):

lines = cv2.HoughLinesP(edges, 1, np.pi/180, threshold=100, (3.7) minLineLength=100, maxLineGap=10)

rho: разрешение расстояния аккумулятора в пикселях (обычно 1)

theta: разрешение угла аккумулятора в радианах (обычно np.pi/180)

threshold: минимальное количество пересечений для обнаружения линии

minLineLength: минимальная длина линии

maxLineGap: максимально допустимый разрыв между точками на одной линии

Функция cv2.HoughLinesP() возвращает массив обнаруженных линий, где каждая линия представлена координатами её конечных точек (x1, y1, x2, y2).

Начальная координата, представляющая центр, может быть определена по углу 0. Для визуализации обнаруженных линий используется функция cv2.line(). Это позволяет нарисовать каждую обнаруженную линию на исходном изображении, что полезно для визуальной проверки результатов [95].

3.5 Обнаружение дефектов на поверхности трубки из кварцевого стекла

Из возможных поверхностных дефектов кварцевых трубок наиболее серьезными являются трещины и царапины, которые могут повлиять на прочностные свойства трубок и создать проблемы при их использовании. Так как предполагается контроль трубки непосредственно в процессе ее вытягивания, то возникает проблема просмотра ее периметра, т.к. трещины и царапины могут возникнуть в любом месте на поверхности трубки.

Ввиду того, что при вытягивании трубка движется только поступательно, в одном направлении и ее нельзя вращать, т.е. она будет повернута к камере одной стороной и дефект может оказаться вне зоны видимости камеры, то предлагается использовать систему из трех пар камера-источник света (рисунок 3.15) [5,68].



Рисунок 3.15 – Обнаружении поверхностных дефектов трубки из кварцевого стекла с системой освещения поперечного сечения трубки и 3 камерами вокруг

трубки

Система из трёх камер позволяет охватить контролем всю окружность трубки. Сканирование трубки по длине обеспечивается перемещением ее

относительно камер в процессе волочения. Это сохраняет неподвижность оптической системы и не нарушает ее юстировку.

Блок-схема блока комплексного алгоритма, производящего обнаружение дефектов на поверхности трубки, приведена на рисунке 3.16. Т.к. этот алгоритм является одним из блоков, входящих в комплексный алгоритм обработки (рисунок 3.3), то операции предварительной обработки фактически являются общими для всех трех блоков комплексного алгоритма и приведены на блок-схеме для целостности, их описание дано выше, а обоснование проведения такой предобработки приводится ниже.



Рисунок 3.16 – Блок-схема алгоритма для обнаружения поверхностных дефектов трубки

Качество изображения в первую очередь зависит от освещения, что может привести к разному цветовому изображению одного и того же объекта в

зависимости от условий освещения. Однако для системы, которая обнаруживает дефекты, решающей информацией является характеристика градиента, а не цвет изображения. Отсюда и следует целесообразность работы в оттенках серого. Этот способ обработки также имеет потенциал для сокращения количества вычислений на последующих этапах обработки изображения и повышения его эффективности[85]. При этом для преобразования цветных изображений в изображения в оттенках серого используется функция (3.8) [5]:

 $cepoe = cv2.cvtColor(изображения, cv2.COLOR_BGR2GRAY)$ (3.8)

Фильтрация, как уже говорилось выше, также производится медианным фильтром с окном 3х3. Фактически, если рассматриваемый блок не запускается автономно, а в составе комплексного алгоритма, то эти операции до его запуска уже будут выполнены в работе предыдущих блоков и здесь просто пропускаются.

Сказанное также относится и к операции сегментации, проведение которой здесь объясняется целью улучшения условий обнаружения дефектов трубки. Сегментация изображения здесь также сводится к бинаризации его проведением пороговой обработки по Оцу. При этом пиксель, если его интенсивность не достигает определенного порога, становится черным (устанавливается в ноль), в ином случае - белым. Если операция проводится при работе предыдущего блока, то повторно она здесь не проводится, а сразу используется полученный ранее результат.

Для классификации дефектов используется контурная аппроксимация, это алгоритм, уменьшающий количество точек на кривой с помощью сокращенного набора точек. Он также известен как алгоритм Рамера-Дугласа-Пейкера или алгоритм разделения и слияния. Он предполагает, что кривую можно аппроксимировать короткими отрезками линии, что приводит к подмножеству кривой. OpenCV определенных исходной реализует точек, контурную аппроксимацию с помощью метода cv2.approxPolyDP. Чтобы использовать контурную аппроксимацию, мы должны сначала найти контур. При этом функция поиска контуров (cv2.findContours) применяется для выделения области, которую занимает дефект [73].

Имеется возможность реализации вариантов этой функции в режиме (mode) с учетом иерархии обнаруженных контуров, определяя таким образом характер возвращаемого результата. Всю иерархию идентифицировать нет необходимости, так как главной задачей является выделение внешнего контура дефекта, тогда используется режим cv2.RETR_EXTERNAL.

Характер аппроксимации контуров определяется вторым параметром функции, для чего применяется метод cv2.CHAIN_APPROX_NONE, учитывающий все точки вдоль отрезков линии контура, для корректного отображения которых применяется функция cv.drawContours(). Для аппроксимации контура используется функция (3.9):

approx = $\underline{cv2.approxPolyDP}($ контур, эпсилон ε , True) (3.9)

Значение є является ключевым фактором в функции cv2.approxPolyDP() OpenCV, которая определяет точность аппроксимации формы контура. Оно представляет собой максимальное расстояние между исходным контуром и аппроксимацией, контролируя уровень детализации в аппроксимации. Меньшее значение є приводит к более точному приближению. Значение є часто определяется как доля от периметра контура, обеспечивая нахождение приближения в пределах определенного процента от длины контура (который будет выступать в качестве порогового значения для измерения вершин) (3.10):

 $\varepsilon = периметр \times коэффициент$ (3.10)

Это обеспечивает приближение аппроксимации контура к границам дефекта, позволяя ему адаптироваться к различным формам и размерам. Это уменьшает количество вершин в аппроксимированной форме, что приводит к более быстрому времени обработки в последующих анализах.

На практике, когда коэффициент принят равным 0,01 или 0,02, это гарантирует, чтобы аппроксимация не была ни слишком свободной, ни слишком жесткой.

В библиотеке OpenCV функция cv2.arcLength() эффективно измеряет периметр контура. Тогда є будет (3.11):

 $\varepsilon = 0.01 * \underline{\text{cv.arcLength}}(\kappa \text{онтур}, \text{True})$ (3.11)

OpenCV использует True в качестве второго аргумента при работе с замкнутыми контурами, указывая, что последняя точка контура соединяется с первой точкой, образуя полный цикл. Это обеспечивает точный расчет периметра, так как False будет рассматривать контур как открытую кривую, что приведет к неверным измерениям.

Полученный контур состоит из списка вершин. Количество записей в этом списке проверяется, чтобы определить, как выглядит дефект.

Например, если контур не имеет вершин, он вероятнее всего круглый, и поэтому дефект можно классифицировать как мошка/пузыри (рисунок 3.176). Если контур содержит более одной вершины, дефект должен быть либо трещина/царапина (рисунок 3.17)



Рисунок 3.17 – а) Фигура, имеющая вершины б) Фигура, не имеющая вершин

Чтобы вычислить такие параметры дефекта как периметр и площадь, определяемые по его контуру, применяют функции cv2.contourArea() и cv2.arcLength().

Для поиска прямоугольника с минимальной площадью, повернутого на угол (в случае протяженных дефектов, например, трещин), применяют функцию cv2.minAreaRect(). Выходными параметрами в таком случае будут координаты центра (x,y), ширина и высота прямоугольника, а также его угол поворота [71,72].

Чтобы найти круг, охватывающий весь объект, используется функция cv2.minEnclosingCircle. Выходными параметрами в этом случае будут центр (x,y) и радиус этого круга. [71,72].

3.6 Выводы к главе 3

1. Предложены способ и алгоритм обработки изображений для контроля толщины кварцевых трубок в процессе изготовления. Также при использовании трех лазерных блоков, расположенных под углом 120 градусов по окружности трубки, становится возможным при необходимости контролировать изменение толщины трубки по ее длине по мере ее перемещения во время волочения.

2. Разработан способ и алгоритм обнаружения дефектов в поперечном сечении стеклянной трубки (со скосом, со сколом) с использованием цветового пространства HSV и преобразованием в полярные координаты. Этот метод позволил измерить толщину, наружный и внутренний диаметр в плоскости поперечного сечения трубки в режиме реального времени.

3. Предложен онлайновый алгоритм обнаружения отклонений формы кварцевых трубок от круговой (овальность) в условиях производства.

4. Разработан алгоритм контроля поверхностных дефектов, в частности, трещин и царапин, кварцевых трубок в процессе производства, работающий в реальном времени. Площадь, периметр и другие параметры дефектов извлекаются в виде векторов признаков. По соотношениям этих параметров контуров, описывающих дефекты, можно определить вид дефекта и, соответственно, необходимость отбраковки трубки.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ АЛГОРИТМОВ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ТРУБОК ИЗ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА

Разработанный способ контроля дефектов кварцевых трубок был протестирован на образцах различной толщины. Обработка данных осуществлялась на персональном компьютере, оснащённом процессором Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 с тактовой частотой 2,40 ГГц.

Для реализации алгоритма использовался язык программирования Python 3.10, а в качестве среды разработки - PyCharm 2021.3.1 (Community Edition).

Для экспериментального подтверждения работоспособности способа и алгоритма была собрана исследовательская установка. В её состав входил лазерный источник света производства Beijing Meide Technology Co. с мощностью 3 мВт и пиковой длиной волны 635 нм, а также камера Area Array компании Lumenera (модель Lu075C) с электронным затвором, интерфейсом USB 2.0 (480 Mбит/c), размером изображения 5,8 × 4,9 мм, разрешением 640 × 480 эффективных пикселей, размером пикселя 7,4 × 7,4 мкм, частотой кадров 60 кадров в секунду и динамическим диапазоном 60 дБ. Создание объекта и захват изображений осуществлялись с использованием функций CV2.VideoCapture() и read(), после чего снимки сохранялись в формате JPG для дальнейшей обработки.

Экспериментальное исследование проводилось на наборах кварцевых трубок различной толщины, предоставленных компанией «Оптический центр Аль-Равафид» (Ирак). В ходе испытаний анализировались как образцы без дефектов поверхности, так и трубки с заранее созданными искусственными дефектами.

4.1 Экспериментальная проверка алгоритма определения толщины кварцевой трубки

Экспериментальное исследование работы алгоритма измерения толщины (см. рисунок 3.7) стенки трубки проводилось на трубках с номинальной толщиной стенки от 1мм до 4мм. Компания «Оптический центр Аль-Равафид» (Ирак), предоставившая трубки для эксперимента, выдала сертификат на эти трубки, где было сказано, что их толщина измерялась микрометром (разрушающий контроль, трубки предварительно разбивались) с погрешностью 0,1-0,5%. Углы падения луча варьировались от 30° до 50° через 5°, варьировался также угол отклонения трубки от нормального положения: 0°, 5°. Измерения проводились при каждой установке исходных данных по 5 раз и вычислялось среднее значение толщины трубки β и относительная погрешность δ,%. Полученные результаты приведены в таблице 4.1.

На рисунке 4.1 показано изображение лазерных лучей, отраженных от стенок трубки. Когда лазерный луч падает на цилиндрическую поверхность, такую как стеклянная трубка, отражённый луч проявляется как прямолинейная полоса, ширина которой определяется шириной луча по вертикали. Центры этих полос соответствуют расстоянию Δ, которое и нужно измерить для определения толщины стенки трубки β.



Рисунок 4.1 – Изображение отраженных от внутренней и внешней сторон стенки трубки лучей

Используя язык Python и библиотеку OpenCV, изображение преобразуется из пространства RGB в пространство HSV, с помощью функции cv2.cvtColor(BGR — изображение, cv2.COLOR_BGR2HSV (в библиотеке OpenCV изображения RGB читаются в формате BGR). Такое выполнение операции зарекомендовало себя достаточно хорошо, поэтому дополнительных исследований с другими способами не проводилось.

А затем изображение преобразуется в бинарное изображение (бинаризация по Оцу), где белый представляет часть в указанном диапазоне. Черный представляет часть, находящуюся за пределами этого диапазона. Рисунок (4.2).



Рисунок 4.2 – Бинарное изображение

Далее, как было сказано в п.3.3 с помощью запрограммированной функции Medial Axis Transform находятся центры изображений лучей, отраженных от стенок трубки (центры полос - рисунок 4.3) и их координаты (функция CV.findcontours).



Рисунок 4.3 – Линии центров полос

Далее программа, используя функцию cv2.fillPoly() (библиотека OpenCV), заполняет промежуток между этими линиями белым пикселями (рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – Обработанное изображение

Теперь программа, используя cv.distanceTransform(), измеряет расстояние, соответствующее ширине полученной белой полосы, которая и является искомым

расстоянием Δ между лучами. С помощью функции CV.minMaxLoc() определяются максимальное и минимальное значения Δ (рисунок 4.5), по которым находится среднее значение толщины стенки трубки β .



Рисунок 4.5 – Определение максимального значения расстояния

В таблице 4.1 показаны параметры эксперимента (угол смещения трубки, номинальная толщина стенки трубки, угол падения луча, расчетная толщина стенки трубки) и приведены относительные погрешности измерений. В эксперименте было использовано нормальное положение трубки и положение с отклонением, имитирующим возможное отклонение трубки при ее вибрациях во время волочения. Относительная погрешность измерений определялась по стандартной формуле (4.2):

$$\delta = (\mathbf{x} - \mathbf{x}_2) / \mathbf{x}_2) \times 100\%, \tag{4.2}$$

где x – результат измерения, x₂ – номинальное значение.

По мере увеличения угла смещения трубки, что соответствует возможной ее вибрации во время волочения, погрешность измерения толщины стенки трубки также имеет тенденцию к увеличению. Однако, она остается в допуске. Что касается угла падения луча, то наилучшие результаты получаются при углах падения луча порядка 35-45°.

В эксперименте использовались трубки с толщиной стенки 1 мм, 1,5мм, 2,0 мм и 4,0мм, углы падения луча варьировались от 30° до 50° через 5°, варьировался также угол отклонения трубки от нормального положения: 0°, 5°. Измерения проводились при каждом векторе исходных данных по 5 раз и вычислялось среднее значение толщины трубки β и относительная погрешность δ ,%. Полученные результаты и приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Влияние угла смещения трубки на точность измерения толщины стенки трубки

Угол смещения трубки, град	Номинальная толщина стенки трубки, мм	Угол падения луча, град	Δ	Расчет толщины стенки трубки β, мм	Относительная Погрешность (%)
		30	0.61	0.994	0.6
		35	0.7	1.00	0
	1	40	0.72	0.991	0.9
		45	0.75	0.991	0.9
		50	0.76	0.992	0.8
		30	0.92	1.503	-0.2
		35	1.02	1.504	-0.3
0	1.5	40	1.09	1.500	0
		45	1.14	1.508	-0.5
		50	1.2	1.517	-1.1
	2	30	1.22	1.99	0.5
		35	1.36	2.006	-0.3
		40	1.45	1.99	0.5
		45	1.53	2.02	-1
		50	1.55	2.02	-1
		30	1.84	2.99	0.3
	3	35	2.05	3.02	-0.6
		40	2.2	3.02	-0.6
		45	2.26	2.99	0.3
0		50	2.28	2.98	0.6
		30	2.44	4.03	-0.75
	4	35	2.84	4.00	0
		40	2.9	3.99	0.25
		45	3	3.97	0.75
		50	3.22	4.05	-1.25

Продолжение таблицы 4.1

		30	0.65	0.99	1
		35	0.67	0.98	2
	1	40	0.72	0.99	1
		45	0.75	0.99	1
		50	0.80	1.04	-4
		30	0.95	1.55	-3.3
		35	1	1.47	2
	1.5	40	1.1	1.51	-0.6
		45	1.19	1.56	-4
5		50	1.20	1.57	-4.6
5		30	1.30	2.04	-2
	2	35	1.35	1.99	0.5
		40	1.5	2.06	-3
		45	1.59	2.07	-3.5
		50	1.64	2.07	-3.5
	3	30	1.8	2.93	2.33
		35	2	2.94	2
		40	2.2	3.02	-0.66
		45	2.3	3.04	-1.33
		50	2.3	3.01	-0.33
5	4	30	2.45	4.06	-1.5
		35	2.7	3.98	0.5
		40	2.9	3.99	0.25
		45	3.05	4.03	-0.75
		50	3.1	3.95	1.25

Как и следовало было ожидать, погрешность измерения, в основном, зависит от качества выделения лучей на экране и определения их центров и не превышает 5% при времени на обработку изображений менее 30 мс, что позволяет контролировать толщину по длине трубки при ее продвижении в процессе вытяжки. При этом, располагая три лазерных установки через 120° по окружности

трубки, можно контролировать дефекты разнотолщинности трубки, если технологи подозревают возможность ее изменении по длине трубки в процессе волочения.

Что касается требований к точности измерения и поддержания угла падения луча, то анализ выражения (3.3) показал, что при работе с углами 45-55° вклад в погрешность оценки толщины трубки β при ошибке задания угла в 10° составляет 0,2-0,7% и при уменьшении угла до 35-45° увеличивается до 1-1.5%. Это еще раз подтверждает целесообразность работы с углами падения луча в районе 35-45°.

Таким образом, предложен высокоскоростной способ и алгоритм обработки изображений для определения толщины кварцевых трубок в реальном времени в процессе их изготовления. Важным достоинством способа является возможность измерения толщины трубки при возможных ее колебаниях и вибрации при вытяжке. При использовании трех лазерных установок, расположенных через 120 ° по окружности трубки, появляется возможность контроля разнотолщинности трубки и поверхностных дефектов (рассмотрены далее) по длине при ее продвижении при вытяжке. Алгоритм обеспечивает работу в реальном времени (время обработки одного изображения трубки не превышает 30 мс) с погрешностью не более 3-5%.

4.2 Обнаружение отклонений геометрии поперечного сечения трубки от

круговой

В этом пункте приводится описание и результаты экспериментального исследования предложенного алгоритма (п.3.4 рисунок 3.11) определения отклонений от круговой формы и дефектов по поперечному сечению трубки (рисунок 3.14). Изображение поперечного сечения трубки фиксируется в формате RGB после того, как световой луч известного цвета направляется на торец трубки рисунок 4.6.

Алгоритм был протестирован с использованием камеры размером 12 мегапикселей IP-камера Reolink RLC-1212A и автофокусом. Обработку проводили на персональном компьютере, оснащенном процессором Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 с тактовой частотой 2,40 ГГц.







Рисунок 4.6 – Исходное изображение торца трубок без дефектов (а) и с различными дефектами: скосом (б), сколом (в) и овальностью (г)

В этой части порог для нахождения контура торца трубки будет найден с помощью функции cv2:inRange. Функция основана на концепции цветового порога. Функция используется в цветовом пространстве HSV (оттенок, насыщенность и значение). Это, как было показано в главе 3, оказалось эффективным для поиска порога и сегментации объектов по их цвету. Область интереса выделяется на изображении, которое возвращает бинарную маску торца трубки (бинарное изображение на Рисунке 4.7).

Для определения разнотолщинности необходимо оценить выход за пороговые значения толщины стенки, полученной как разность значений графиков контуров внешней и внутренней поверхности стенки при соответствующих значениях полярного угла (рисунок 4.8).



Рисунок 4.7 – Изображение-маска торца трубок (бинарное изображение), показанных на рисунке (4.6)

Требуемый по алгоритму переход в полярную систему координат осуществляется с помощью функции cv2.linearPolar (входное изображение, выход, центр, maxRadius, cv2.WARP_POLAR_LINEAR) (рисунок 4.8). Далее, как было указано в п.3.4 с помощью функций OpenCV (minMaxLoc()) и DistanceTransform() определялась овальность трубки и осуществлялся поиск по всему диапазону изменения полярного угла (0-360°).



Рисунок 4.8 – Изображение торца трубок рисунка (4.6) в полярной системе координат (красная линия соответствует максимальной толщине стенки трубки, зеленая линия – минимальной)

С помощью cv2.findContours() находим две контурные линии в бинарном изображении для внутренней и внешней стенок трубки. Для нахождения индивидуального контура, для первого и второго контуров отдельно, используется функция: cv.drawContours(). Затем через начальную точку каждого контура с помощью функции Hough LinesP() проводится линия Хафа и находятся максимальные отклоненния линии контура от нее, характеризующие отклонения формы трубки от круговой.



Рисунок 4.9 –(а) Изображение для тестирования; (б) Контурные линии; (в) и (г) Отклонения от круговой формы внутренней и наружной стенок в поперечном сечении трубки соответственно

Для определения разнотолщинности в этом случае необходимо оценить выход за пороговые значения толщины стенки, полученной как разность значений линий контуров внешней и внутренней поверхности стенки при соответствующих значениях полярного угла. Так как важно определить максимальные отклонения толщины по окружности сечения трубки, то, пробегая все значения полярного угла в пределах одного периода и определяя разности координат белых пикселей на изображении, которые соответствуют толщине трубки в данном сечении, программа контроля дефектов на концах трубок находит максимальное и минимальное значение толщины стенки и сравнивает с пороговыми значениями.

Предложенный способ контроля торцевых дефектов кварцевой трубки тестировался на трубках толщины 2, 3 и 4 мм с различными торцевыми дефектами (разнотолщинностью, наличием скола, овальностью).

Как следует из данных таблицы 4.2 алгоритм продемонстрировал свою работоспособность: все предъявленные при тестировании способа торцевые дефекты были определены. При этом среднее время, затраченное на обработку изображения размером 700 × 700 пикселей с разрешением 300 dpi, составило 125 мс.

Таблица 4.2 – Результаты обнаружения дефектов формы поперечного сечения трубки

Тип лефекта	Правильные обнаружения				
	Количество	Процент			
Скос	7	100%			
Скол	12	100%			
Овальность	4	100%			

4.3 Обнаружение дефектов на поверхности трубки из кварцевого стекла

Алгоритм обнаружения поверхностных дефектов (п.3.5 рисунок 3.16) был протестирован для трубок из кварцевого стекла с различными дефектами поверхности, в том числе с легкими дефектами, которые плохо проявляются на полученных изображениях и, главное, с дефектами типа царапин и трещин, часть из которых создавалась искусственно.

После захвата изображения осуществлялся, согласно алгоритму, его перевод в оттенки серого, фильтрация и бинаризация по Оцу. В результате получали изображение вида, показанного на рисунке 4.10 а. В таблицах 4.3 и 4.4 приведены результаты обнаружения этих дефектов.



Рисунок 4.10 – (а) Необработанное изображение (трещина / царапина) ; (б) Бинарное изображение) трещина/царапина) ; (в) Необработанное изображение (мошка /пузыри); г) Бинарное изображение (мошка /пузыри).

Предложенный алгоритм использовался также с нетиповыми дефектами, например, с пересекающимися, которые воспринимаются алгоритмом как один дефект (рисунок 4.10). Тем не менее, рядом расположенные дефекты могут быть различимы, если между ними есть какое-то расстояние (рисунки 4.11 - 4.14)



Рисунок 4.11 – Распознавание пересекающихся дефектов как единого дефекта:
а) полученное изображение (дефект - пересекающиеся царапины);
б) обработанное изображение; в) определение области дефекта на изображении



Рисунок 4.12 – Распознавание рядом расположенных дефектов (рядом с трещиной и царапиной расположены мелкие пузырьки) а) полученное изображение (дефекты: царапина - трещина - пузырьки); б) обработанное изображение; в) определение областей дефектов на изображении



Рисунок 4.13 – Распознавание рядом расположенных дефектов (рядом с большим пузырем расположены царапин и мелкие пузырьки)

а) Полученное изображение (дефекты: пузырь – царапина – мошка);

 б) Обработанное изображение; в) Определение областей дефекта на изображении



Рисунок 4.14-Распознавание мошки

а) Полученное изображение (дефект: мошка (множественные пузырьки); б)Обработанное изображение; в) Определение областей дефекта на изображении

E	Размер	Результаты обнаружения дефектов				
1 ип дефекта	дефекта, (мкм) *	Общее количество	Количество обнаруженных	Процент		
	15~20	6	5	83%		
	21~30	5	4	80%		
	31~40	7	6	85%		
Мошка, вмятины, пузырьки	41~50	8	7	88%		
	51~60	12	11	91%		
	61~100	4	4	100%		
	101~200	4	4	100%		
	201~300	3	3	100%		
	301~400	2	2	100%		
	401~500	1	1	100%		
	501~600	6	6	100%		
		58	53	91%		

Таблица 4.3 – Результаты обнаружения дефектов типа мошки, вмятин и пузырьков

*Приведен радиус дефекта в предположении, что наколы и мушки имеют круглую форму

** Дефект состоит из нескольких наколов и мушек (до10)

Таблица	4.4	—	Результаты	обнар	ужения	дефектов	типа	трещин,	царапин,
капилляро	OB								

Tuu		Правильные обнаружения					
дефекта*	Размер дефекта	Общее	Количество	Процент			
		количество	обнаруженных				
	0,3 мм x7(мм)	3	2	66%			
	2 (мм) x21 (мм)	4	3	75%			
	4(мм) x25 (мм)***	1	1	100%			
	5(mm) x31 (mm)***	2	2	100%			
	10(мм) х45(мм)	5	4	80%			
Трещины,	15(мм) х190 (мм)	3	3	100%			
царапины, капилляры	20(мм) x130(мм)	8	8	100%			
	30(мм) х70 (мм)	5	5	100%			
	30(мм) х40(мм)	3	3	100%			
	30(мм) х130(мм)	5	5	100%			
	16 (мм) х140(мм)	2	2	100%			
	21(мм) х210 (мм)	2	2	100%			
		41	38	95%			
*Приведены ширина и длина прямоугольника, описывающего фигуру дефекта.							
***Для зигзагообразных и криволинейных царапин указывается общая длина.							
L- Длина контролируемого края трубы на захваченном изображении (100 или							

200 мм)

С помощью встроенной в программу функции поиска контуров cv2.findContours выделалась область, которую занимает возможный дефект. Если факт наличия дефекта обнаружен, то далее производилась оценка его параметров.

Характер аппроксимации контуров определяется вторым параметром функции, для чего применяется метод cv2.CHAIN_APPROX_NONE, учитывающий все точки вдоль отрезков линии контура, для корректного отображения которых применяется функция cv.drawContours() (рисунок 4.14 б).

Чтобы вычислить такие параметры дефекта как периметр и площадь, определяют его контур и применяют функции cv2.contourArea() и cv2.arcLength(), для определения площади и периметра, соответственно. Также при помощи функции cv2.boundingRect() можно выделить на объекте область интереса, получив на выходе ширину и высоту описываемого прямоугольника.

Внешний контур, охватывающий найденный дефект, корректировался (функция cv.drawContours) и определялась его площадь и соотношение сторон (функции cv2.contourArea(), cv2.arcLength() и cv2.minAreaRect()). При этом контур МОГ аппроксимироваться либо прямоугольникам, либо кругом (функция cv.minEnclosingCircle()). После оценки площади, занимаемой контуром, принимался контур с меньшей площадью, т.е. теснее охватывающий объект. Например, на рисунке 4.11 рабочим будет признан прямоугольный контур рисунка 4.11 в.

В случае протяжённых дефектов, например, трещин, программа с помощью функции cv2.minAreaRect() строит прямоугольник с минимальной площадью, повернутый на некоторый угол (рисунки 4.11в, 4.12в). Выходными параметрами в таком случае будут координаты центра (х,у), ширина и высота прямоугольника, а также его угол поворота. Пересекающиеся дефекты алгоритм распознает как один дефект (рисунок 4.11). К сожалению, в этом случае идентификация дефекта может быть ошибочна (например, показанный на рисунке 4.11 дефект в виде двух пересекающихся царапин не будет распознан, а программа выдаст площадь минимального прямоугольного контура, охватывающего эти царапины) На рисунке 4.13 показано обнаружение сразу трех дефектов, а именно пузыря, царапины (прямо над пузырем) и мошки (маленького пузырька справа от большого). Расстояние между дефектами в этом случае было более 1мм. В результате каждый из обнаруженных дефектов был программой охвачен отдельным контуром. По параметрам контуров программа правильно определила их тип. Таким образом, эксперимент показал, что разработанный алгоритм обнаружения способен одновременно обнаруживать отдельные и разные дефекты, такие как царапины и пузырьки, но при условии все-таки наличия некоторого минимального расстояния порядка 0,5-1мм. Это подтверждено и экспериментом с множественными пузырьками (рисунок 4.14). Но здесь близко расположенные пузырьки программа восприняла как один дефект, хотя, что важно, все равно зафиксировала его.

Учитывая, что трубка из кварцевого стекла имеет ряд дефектов, существенно влияющих на ее прочность, а именно, пузыри и трещины или царапины, были проведены замеры типовых дефектов. В результате опасными считались размеры диаметров пузырьков свыше 50мкм, хотя в эксперименте участвовали трубки с пузырьками от 35 до 60 мкм.

Трещины отличаются удлиненными часто изогнутыми линиями, которые обычно располагаются на расстоянии от края трубки. Измерения ширины и длины находятся в диапазоне от 7 мкм до 210 мкм и от 0.3 мм до 30 мм соответственно. Естественно, что в большинстве применений такие трубки должны быть забракованы.

Эксперимент показал, что разработанный алгоритм обнаружения способен одновременно обнаруживать отдельные и разные дефекты, такие как царапины и пузырьки. Однако рядом расположенные дефекты, как и ожидалось, воспринимались алгоритмом как единый дефект, что, в принципе, может увеличить количество брака, т.к. критерии классификации дефектов основываются не только на типе, но и на величине и расположении обнаруженных дефектов. Дефекты считаются дискретными, если расстояние между объектами составляет не менее 0,5-1мм и зависит от настройки (коэффициентов увеличения и усиления в системе).

На основе эксперименнта можно сделать следующие выводы:

Предлагаемая система обнаружения поверхностных дефектов имеет ошибку классификации менее 5%, без необходимости использования эталонных изображений. Для выделения и аппроксимации контуров применяется метод cv2.CHAIN_APPROX_NONE, учитывающий все точки вдоль отрезков линии контура, и функция cv.drawContours() (рисунок 4.15 б).

Чтобы вычислить такие параметры дефекта как периметр и площадь, определяется его контур и применяются функции cv2.contourArea() и cv2.arcLength(), для определения площади и периметра, соответственно. Также при помощи функции cv2.boundingRect() можно выделить на объекте область интереса, получив на выходе ширину и высоту описываемого прямоугольника (рисунок 4.15 в).



Рисунок 4.15 – (а) Оригинальное изображение; (б) Изображение с cv2.findContours(); (в) Изображение с cv2.boundingRect(); (г)Изображение с cv.minAreaRect(); (д) Изображение с cv.minEnclosingCircle()

Для поиска прямоугольника с минимальной площадью, повернутого на угол (в случае протяженных дефектов, например, трещин), используется функция cv2.minAreaRect() (рисунок 4.15 г). Выходными параметрами в таком случае будут координаты центра (x,y), ширина и высота прямоугольника, а также его угол поворота.

О виде и размере дефектов, а, главное, о необходимости отбраковки трубки можно судить, сравнивая параметры фигур, описывающих дефекты. Напомним, что данные обрабатывались с использованием библиотеки с открытым исходным кодом OpenCV, а программа, осуществляющая обработку, была написана на Python 3.7, запускалась в рабочей среде PyCharm 2021.3.1 (community edition). Минимальные системные требования для использованного компьютера включают процессор Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 с тактовой частотой 2,40ГГц.

Если отношение длин соседних сторон прямоугольного контура составляет менее, чем 1:3, то принималось решение, что дефект является трещиной. Если при этом еще и ширина контура составляет менее 20 пикселей, то скорей всего это царапина. Но эти цифры могут быть изменены в зависимости от конкретной ситуации.

Что касается таких дефектов, как мошка, вмятины, пузырьки, то для них чаще контуром является окружность (функция cv2.minEnclosingCircle) и определяется общая площадь, занимаемая дефектом. По ее размеру и судят о допустимости наличия такого дефекта или отбраковки трубки.

4.4 Оценка времени работы блоков комплексного алгоритма

Время выполнения операций алгоритма зависит от многих факторов, в частности, от размера изображения и быстродействия процессора. Как отмечалось выше, в работе использовался компьютер с процессором Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 (тактовая частота 2,40ГГц); программа была написана на Python 3.10 с использованием алгоритмических примитивов из OpenCV и других библиотек.

Измеренные во время эксперимента средние значения времени на выполнение операций первого блока алгоритма (измерение толщины трубки из кварцевого стекла в середине трубки) составило 30мс для изображений размером 640 x 480 пикселей. Время работы второго блока алгоритма (выявление круговой геометрии, выявление дефектов поперечного сечения, измерение внешнего и внутреннего диаметра) для изображения размером 700×700 пикселей составило 125мс.

Сравнение с литературными данными, например, с данными источника [74,75] показало, что время обнаружения поверхностных дефектов предлагаемыми алгоритмами значительно (на 25-30мс) быстрее, чем в упомянутом источнике.

При производстве трубок из кварцевого стекла волочильная машина контролирует скорость стеклянной трубки, и (в зависимости от диаметра трубки) скорость находится в диапазоне 0,5–4 м/с. Для трубки длиной, например, 10см время прохода ее перед камерой при максимальной скорости займет 25мс, т.е. захваченное изображение должно быть за это время обработано. Как видно, здесь граничный случай. Поэтому, для того, чтобы осуществить работу в реальном времени всего комплексного алгоритма (170-200мс) скорость волочения должна быть не выше 0,5м/с.

Область дефекта занимает очень небольшую часть изображения по сравнению со всем изображением стеклянной трубки. Система была протестирована, чтобы доказать ее устойчивость к тому разнообразию дефектов и их типоразмеров, которые нашлись у предприятия. Система оказалась достаточно нечувствительной к различиям в типах дефектов из-за единообразия системы освещения и подхода к определению дефекта.

Проведенные эксперименты доказывают, что предложенный способ эффективен для выявления дефектов трубок из стекла. Предварительная оптимизация освещения и непосредственная реализация алгоритмов обработки могут значительно повысить эффективность всего алгоритма.

4.5 Выводы к главе 4

1. Для экспериментального подтверждения способа и алгоритма контроля трубок из кварцевого стекла была собрана установка, включающая лазерный источник света производства Beijing Meide Technology Co. мощностью 3мВт с пиковой длиной волны 635нм и камеру Area Array производства компании

Lumenera (модель Lu075C, электронный затвор, интерфейс USB2.0, 480 Мбит/с). Обработка велась на компьютере с процессором Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 с тактовой частотой 2,40ГГц; программа была написана на языке Python 3.10 с использованием библиотеки алгоритмов OpenCV с привлечением других библиотек, которые применяются для анализа 2D-изображений.

2. Экспериментальное исследование работы алгоритма измерения толщины (см. рисунок 3.7) стенки трубки проводилось на трубках с толщиной стенки от 1мм до 4мм. Углы падения луча варьировались от 30° до 50° через 5°, варьировался также угол отклонения трубки от нормального положения: 0°, 5°. Измерения проводились при каждой установке исходных данных по 5 раз и вычислялось среднее значение толщины трубки β и относительная погрешность, которая не превысила δ =3-5%. При этом алгоритм показал достаточную устойчивость: при работе с углами падения луча в диапазоне 45-55°, т.е. при изменении угла на 10°, вклад в погрешность оценки толщины трубки β составил 0,2-0,7%. Алгоритм обеспечивает работу в реальном времени (время обработки одного изображения трубки не превышало 30мс)

3. При исследовании алгоритма обнаружения дефектов и отклонений геометрии поперечного сечения трубки от круговой изображение переводилось в цветовое пространство HSV, строилась маска торца трубки и далее осуществлялся переход в полярные координаты. Это позволяло определить максимальное и минимальное значение толщины стенки и, сравнив с пороговыми значениями, оценить допустимость отклонений по толщине стенки трубки. Кроме того, отклонения изображения торца трубки в полярных координатах от прямой линии позволило уверенно обнаружить такие дефекты, как овальности, скосы и сколы. Время работы этого блок алгоритма составило 125 мс.

4. Алгоритм обнаружения поверхностных дефектов был протестирован для трубок из кварцевого стекла с различными дефектами поверхности, в том числе и с искусственно созданными. Здесь согласно алгоритму, осуществлялся перевод изображения в оттенки серого, фильтрация и бинаризация по Оцу. Далее по градиенту программа находила контур, охватывающий найденный дефект и определялась его площадь и соотношение сторон. Если отношение длин соседних сторон прямоугольного контура составляет менее, чем 1:3, то принималось решение, что дефект является трещиной. Если при этом еще и ширина контура составляла менее 20 пикселей, то скорей всего это царапина. Эти цифры могут быть изменены в зависимости от конкретной ситуации.

5. При исследовании алгоритма обнаружения дефектов типа мошки, вмятин, пузырьков, пересекающихся царапин, определялась общая площадь оконтуренной области, занимаемая этими дефектами. Таким образом, алгоритм распознавал пересекающиеся дефекты, группы тесно расположенных дефектов как один дефект. Для индивидуального распознавания дефектов внутри группы требовалось, чтобы расстояние между ними было не менее 0,5-1 мм.

6. Время, необходимое для обработки изображения, естественно, зависит от его размера. В эксперименте время работы первого блока комплексного алгоритма составило 25-30 мс для изображений размером 640х480 пикселей. Время работы в тех же условиях второго и третьего блоков комплексного алгоритма составило 125 мс и 25-30 мс соответственно. Таким образом общее время контроля одной трубки составляет 175-185 мс. Это накладывает ограничения на скорость волочения, например, при типовой длине трубки в 10 см допустимая скорость волочения будет примерно 0,5 м/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с целью и задачами диссертации получены следующие основные результаты работы:

1. Обоснован способ и разработаны алгоритм и программа для измерения толщины стенок трубок из кварцевого стекла проекционным способом в реальном времени (25-30 мс) непосредственно во время процесса вытягивания с погрешностью не более 5%, и выработаны рекомендации по выбору параметров для обеспечения инвариантности к возможным вибрациям контролируемых трубок.

2. Обоснован и предложен способ обнаружения отклонений от круглой геометрической формы трубки на базе преобразования изображения торца трубки из декартовых координат в полярные, что позволило обнаруживать такие дефекты, как овальности, скосы и сколы, при затратах времени на эти операции в среднем 125 мс.

3. Разработан и исследован алгоритм обнаружения поверхностных дефектов трубки, таких как трещины, царапины, пузыри и др. позволяющий обнаруживать до 95% указанных дефектов, не требующий использования эталонных изображений и морфологических преобразований.

4. Разработан и исследован комплексный алгоритм и программное обеспечение для автоматического измерения геометрических параметров и обнаружения и идентификации дефектов трубок из кварцевого стекла проекционным способом в реальном времени, объединяющий алгоритмы, перечисленные выше, модульная структура которого позволяет легко адаптироваться к конкретным условиям производства. Программное обеспечение (регистрационный номер 2024681180) было написано на Python 3.10 с использованием библиотек с открытым исходным кодом OpenCV, scikit-image и Numby, а также других библиотек, используемых для анализа 2D-изображений.

5. Таким образом, были разработаны комплексный алгоритм и программное обеспечение для автоматического измерения и контроля параметров и дефектов в прозрачных кварцевых стеклянных трубках с использованием

оптических методов в реальном времени, включая модули измерения толщины, отклонения от круговой геометрии и обнаружения поверхностных дефектов. Однако некоторые трубки из кварцевого стекла непрозрачны, а некоторые имеют некруглую (ребристую) форму, что полезно для некоторых применений. Важно разработать методы обнаружения и мониторинга таких труб. Этот вопрос пока не решен и является предметом будущей работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамов, А.А. Модифицированный триангуляционноинтерферометрический метод измерения толщин тонких прозрачных слабопоглощающих биологических тканей, неорганических плёнок и покрытий. / А.А.Адамов // Волгоград: Волгоградский государственный университет, 2022, 164 с.

2. Айсин, Т.М. Способ измерения расстояния между оптически прозрачными поверхностями и электронно-оптическое устройство (его варианты) для реализации способа / Т.М.Айсин, А.В.Подобрянский и др.// А.с. 903701, СССР, МКИ G01 B11/08, - Опубл. 1982, Бюл. № 5

3. Алексеев, К.В. Упаковка лекарственных форм для парентерального применения. / К.В. Алексеев, Е.В. Блынская, С.В. Тишков // М.: «Миттель пресс», 2021. – 259 с.

4. Аль-Гурайбави, А. Автоматизация измерения диаметров и толщин трубки из кварцевого стекла оптическими методами / А. Аль-Гурайбави //Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова, Санкт-Петербург, 2023, С.41-43.

5. Аль-Гурайбави, А. Автоматизация обнаружения дефектов поверхности трубок из кварцевого стекла / А. Аль-Гурайбави, Л.А. Русинов // V Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах (ПУТС-2023), СПб, ЛЭТИ, 2023- С.180-183.

6. Аль-Гурайбави, А. Автоматическое обнаружение дефектов толщины круглых кварцевых трубок оптическим методом / А. Аль-Гурайбави, Н.В.Воробьев, М.Х.Кадим, Л.А.Русинов // Южно-Сибирский Научный Вестник, 2023. – № 3 (49). – С. 186–191

7. Аль-Гурайбави, А. Диагностика нарушений в производстве кварцевого стекла/ А. Аль-Гурайбави // Научная конференция «Традиции и инновации», посвященная 191 - летию СПбГТИ (ТУ), СПб, 2019, С.230.

8. Аль-Гурайбави, А. Диагностика Системы Управления Формованием Кварцевого Стекла/ А. Аль-Гурайбави, В.Г.Харазов // XI Научная конференция

«Традиции и инновации», посвященная 192 - летию СПбГТИ (ТУ), СПб, 2020, С.177.

9. **Аль-Гурайбави, А.** Измерение и контроль толщины кварцевых трубок оптическим методом/ А. Аль-Гурайбави, Н.В. Воробьев, Л.А.Русинов // Контроль. Диагностика. – 2023. – Т. 26. – № 9 (303). – С. 50–57.

10. Аль-Гурайбави, А. Контроль разнотолщиности кварцевых труб в процессе их производства/ А. Аль-Гурайбави // XIII Научная конференция «Традиции и Инновации», посвященная 194-й годовщине образования СПбГТИ (ТУ), 2022, С.182.

11. Аль-Гурайбави, А. Онлайн измерение толщины кварцевой трубки/ А. Аль-Гурайбави, Н.В. Воробьева // XIII Научная конференция «Традиции и Инновации», посвященная 194-й годовщине образования СПбГТИ (ТУ), 2022, С.183.

Бах, Х. Виды брака в производстве стекла. / Х.Бах, Ф.Г.К.Баукке,
 Р.Брюкнер и др.; Под ред. Г.Иебсена-Марведеля и Р.Брюкнера. // М.: Стройиздат,
 1986. – 648 с.

13. Белкин, А.М. Способ измерения внутреннего диаметра прозрачных трубок / А.М.Белкин, И.П.Дмитриев и др. // А.с. 555279, СССР, МКИ G01 B11/08. Опубл. 1977, Бюл. №15

14. Богомолов, Е.Н. Установка контроля геометрических параметров кварцевых труб / Е.Н.Богомолов, В.Н.Вязаницин, Н.И.Евсеенко // Автометрия, 1990, № 5, С.50 – 56.

15. Богуш, Р.П. Цифровая обработка изображений / Р.П.Богуш, С.А.Игнатьева // Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой. - Новополоцк: ПГУ, 2022. - 92 с.

16. Бондарев, А.А. Способ измерения геометрических размеров прозрачных трубок / А.А.Бондарев, Б.Ф.Васьков и др// А.С. 1384938 АІ, СССР, МКИ G01 B11/02. - Опубл. 1988, Бюл. № 127

17. Власова, С. Г. Основы химической технологии стекла / С.Г. Власова// – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 108 с.
18. Венедиктов, А.З. Влияние нестабильности мощности излучения лазера на точность в теневом методе измерений с ПЗС-линейкой / А.З. Венедиктов, В.Н. Демкин, Д.С. Доков // Лазеры. Измерения. Информация. Тезисы докладов конференции 5-6 июня 2002 г. Санкт-Петербург, 2002, С.84

19. Венедиктов, А. 3. Измерение размеров шейки оси колесной пары теневым лазерным методом / А.3. Венедиктов, В.Н. Демкин, Д.С. Доков, А.В. Комаров / Лазеры для медицины, биологии и экологии. Тезисы докладов конференции 21-22 ноября 2001 г. Санкт-Петербург, 2001. С.44

20. Гольдштейн, С.Ш. Дистанционное измерение толщины прозрачных трубок сканируемым лазерным пучком / С.Ш.Гольдштейн, А.Г. Колесников, А.В.Хайдаров // Оптико- механическая промышленность. 1988, №2, С.48-50.

21. Гонсалес, Р., Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс //
- М.: Техносфера, 2005. 1072 с.

22. ГОСТ 111-2014. Стекло листовое бесцветное. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2015

23. ГОСТ 15130—86 Стекло кварцевое оптическое общие технические условия. // М.: ИПК издательство стандартов, 1988. – 30 с.

24. ГОСТ 15177—70 Трубы из прозрачного кварцевого стекла для источников света и электровакуумных приборов // М.: Издательство стандартов, 1970. – 12с

25. ГОСТ 15467–79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. // М.: Издательство стандартов, 1979. — 21 с.

26. ГОСТ 16548-80. СТЕКЛО КВАРЦЕВОЕ И ИЗДЕЛИЯ ИЗ НЕГО Термины и определения // М.: Стандартинформ, 2006, -18 с

27. ГОСТ 27.002–2015. Надёжность техники. Основные понятия. Термины и определения. // М: Стандартинформ, 2016. – 28 с.

28. ГОСТ3521-81. Стекло оптическое метод определения бессвильности.
 // М: Изд. стандартов, 1986. – 6 с.

29. ГОСТ 32361-2013. Стекло и изделия из него. Пороки. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2014. — 8 с.

30. ГОСТ 5727-88 Стекло безопасное для наземного транспорта. // М.: Стандартинформ, 2006. – 18 с.

31. ГОСТ Р 54170-2010 Стекло листовое. Технические условия. Введ. 2012-01-01. М.: Стандартинформ, 2010. – 35 с.

32. ГОСТ Р ИСО 9000–2011. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – Введ. 2013-01-01. – М. : Стандартинформ, 2012. – 32 с

33. Гришко, В.Ф. Устройство неразрушающего контроля параметров стеклянных труб в процессе изготовления / В.Ф.Гришко, В.А.Скаржепа, С.Д.Хомук // Оптический, радиоволновой и тепловой методы неразрушающего контроля. - Могилев, 1989. С.77-78.

34. Гришко, В.Ф. Способ измерения геометрических размеров прозрачных труб / В.Ф.Гришко, О.Н.Паламарчук, А.В.Шишевский// А.С. 1408210 АІ, СССР, МКИ G01 B11/08. - Опубл. 1988, Бюл. №25

35. Гуреева, О. Датчики изображения. Часть 1. / О. Гуреева // Современная электроника, 2007, .№3. С.8-11.

36. Зверев, В.А. Оптические материалы. Часть 2. / В.А.Зверев, Е.В.Кривопустова, Т.В.Точилина // Учебное пособие для конструкторов оптических систем и приборов. –СПб: ИТМО, 2013. – 248 с

37. Клюев, В.В. Неразрушающий контроль и диагностика. / В.В. Клюев,
Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др.; Под ред. В.В. Клюева. // М.: Машиностроение,
2005.-665 с.

38. Криворученко, А. Емкостные промышленные датчики уровня. Проблемы выбора и практика применения/ А. Криворученко //. Компоненты и Технологии, № 1, (78),2008, 68-70 с.

39. Линденбург, Г.А. Устройстводля измерения толщины стенок прозрачных труб / Г.А.Линденбург, М.П.Пиконов, М.М.Хейфец// А.С. 1348638 AI, СССР, МКИ G01 B11/06, - Опубл. 1987, Бюл. №40.

40. Лопатин, В.М. Высокотемпературная вакуумно-компрессионная плавильная установка / В.М.Лопатин, Р.Ш.Насыров // Наука ЮУрГУ: материалы 67-й научной конференции Секции технических наук. – 2013. – № 4. – С. 1680–1684.

41. Мацкевич, О.Н.Устройство для измерения геометрических размеров стеклянной трубки / О.Н.Мацкевич, С.Д.Старов, Т.А.Туманова// А.с. 511519, СССР, МПК G01 В 11/08. - Опубл. 1976, Бюл. №15

42. Мировицкая, С.Д. Прибор для теневого контроля оптических капилляров / С.Д.Мировицкая, В.Н. Тихомиров // Светотехника. 1985 № 11, С.12-13

43. Михайлов, И.О. Оптико-электронное устройство для контроля поперечного размера стержней повышенной точности / И.О.Михайлов // Вестник СГГА, 2002 №7.

44. Михайлович, С.Е. Разработка и исследование новых методов цифровой обработки оптических изображений прозрачных трубок / С.Е. Михайлович // Московский энергетический институт (технический университет)", Москва, 2009, 137с.

45. Науменко, А. П. Введение в техническую диагностику и неразрушающий контроль : учеб. пособие / А. П. Науменко // Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск :Изд-во ОмГТУ, 2019. – 152 с.

46. Немилов, С.В. Оптическое материаловедение: Оптические стекла/ С.В. Немилов // СПб: ИТМО, 2011 г. - 175 стр.

47. Однороженко, В.Б. Способ измерения геометрических размеров прозрачных труб / В.Б.Однороженко, А.И.Сабокар, А.Н.Кузнецов// А.с. 815487, СССР, МПК G01 B 11/08 - Опубл. 1981, Бюл. №11.

48. Однороженко, В.Б. Способ измерения геометрических размеров прозрачных труб / В.Б.Однореженко, А.И.Денисенко // А.с. 945648, СССР, МГЖ G01 B 11/08. Опубл. 1982, Бюл. №27

49. Патент 2178140 С1, РФ, МПК G01 В 11/02. Устройство для бесконтактного измерения геометрических параметров цилиндрических изделий. / Н.К.Абиралов, Ю.А.Жуков, Е.В.Лифановская, А.Г.Лях и др. Опубл. 10.01.2002.

50. Патент 2262660 С1, РФ, МПК G01 В 11/02. Способ и устройство бесконтактного оптического измерения размеров объектов. / А.З.Венедиктов, В.Н.Демкин, Д.С. Доков - Опубл. 20.10.2005.

51. Патент США 4648718, МКИ G01 B11/08, 1987. Optical measuring system/Nishihara Sadamitsu, Kawahara- Опубл. 10.03.1987.

52. Пилипович, В.А. Методика бесконтактного оптического измерения внутреннего диаметра прозрачных труб / В.А.Пилипович, А.К.Есман, В.К.Кулешов, В.П.Дубровский // Измерительная техника. 1990, № 6, С. 13-14.

53. Постников, В.С. Оптическое материаловедение / В.С. Постников. // Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 280 с.

54. Самойленко, В.М. Роль методов неразрушающего контроля изделий при анализе причин отказов и особенности их выбора при применении в конкретных условиях / В.М.Самойленко, Д.Н.Кочкин, О.Е.Зубов // Электротехнические и инфомрационные комплексы и системы. 2015, т. 11, №2, С.73-76.

55. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Документ RU № 2024618180. Измерение толщины трубки из кварцевого стекла на основе технического зрения: заявл. 2024616863 дата поступления 25 Марта 2024: опубл. 09.04.2024 / Л.А.Русинов, **А.О.К.Аль-Гурайбави** / Бюл. № 4. – 1 с.

56. Старостин, Е.М. Разработка и исследование новых методов цифровой обработки оптических изображений прозрачных трубок. Диссертация. / Е.М.Старостин // Московский Энергетический Институт (технический университет), 2008, 138с.

57. Старостин, Е.М. Теневое устройство для контроля диаметра стеклянных трубок-колб в электроламповом производстве / Е.М. Старостин, И.В. Алещенков, Г.В. Мартыненко // Техника и технология. 2006, № 6, С.19-22

58. Фотиев, Ю.А. Оптические методы и средства производственного контроля прозрачных трубок, капилляров и шестигранных световодов / Ю.А. Фотиев // Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва - 2000, 105с.

59. Харазов, В.Г. Управление высокотемпературными процессами с помощью ЭВМ в промышленности строительных материалов / В.Г.Харазов // Л.: Стройиздат, Ленин. отд-ние, 1983. 320 с.

60. Харазов, В.Г. Информационная система диагностики нарушений в производстве кварцевого стекла / А.Аль-Гурайбави, В.Г.Харазов // Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» - ММТТ 32, СПб, 2019, т.6. С.61-65

61. Харазов, В.Г. Информационная система диагностики нарушений кварцевого стекла наблюдаемых с помощью фотоэлектронных оптических устройств / В.Г.Харазов, **А.Аль-Гурайбави** // Материалы XII научной конференции «Традиции и Инновации», посвященной 193-й годовщине образования СПбГТИ(ТУ), 2021, С.217.

62. Храмков, В.П. Материалы для производства и обработки стекла и стеклоизделий / В.П. Храмков, Е.А. Чугунов // М: "Высшая школа", - 99с.

63. Хуанг Т. Обработка изображений и цифровая фильтрация / Т. Хуанг // М.: Мир 1979.-318 с.

64. Шаранова, Д. А. Бесконтактные методы контроля толщины стенки изделия в процессе коррозии / Д.А. Шаранова. // Актуальные вопросы технических наук: материалы IV Междунар. науч. конф. (г. Краснодар, февраль 2017 г.). — Краснодар: Новация, 2017, С.19-28

65. Adamo, F. Calibration of an inspection system for online quality control of satin glass / F. Adamo, F. Attivissimo, A.Di Nisio // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2010, 59(5), P. 1035–1046.

66. Adamo, F.An online defects inspection system for satin glass based on machine vision/ F. Adamo, F. Attivissimo, A.Di Nisio, M. Savino //IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2009, P. 288-293.

67. **AL-Ghurabawi, A.** Influence of quartz glass tube manufacturing process parameters on tube forming / A. AL-Ghurabawi // Science and Technology: XXI Century Advances, Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Saint Petersburg, 2023, P.14

68. AL-Ghuraibawi, A.O. Automated Detection of Defects on the Surface of Quartz Glass Tubes / A.O. AL-Ghuraibawi, L. A. Rusinov// IEEE/2023 V International Conference on Control in Technical Systems (CTS). – 2023. – P. 143-146.

69. Cabral, J. D. D. An intelligent vision system for detecting defects in glass products for packaging and domestic use / J.D. D. Cabral, S.A. de Araújo// International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, V. 77, P. 485–494,

70. Chang, M. Development of an optical inspection platform for surface defect detection in touch panel glass / M.Chang, B.-C.Chen, J.L.Gabayno, M.-F. Chen // Int. J. Optomech. 2016, 10(2), P. 63–72.

71. Contour Features // URL: https://docs.opencv.org/3.4/dd/d49/tutorial_py_ contour_features.html (дата обращения 12.12.2023г.)

72. Contour Features // URL https://docs.opencv.org/3.4/dd/d49/tutorial_py_ contour_features.html?loclr=blogmap (дата обращения 01.07.2023г.).

73. cv2.findContours() function // URL: <u>https://www.programmersought.</u> <u>com/article/82015048356/</u> (дата обращения 01.6.2023г.).

74. De Vitis, G.A. A pre-processing technique to decrease inspection time in glass tube production lines / G.A. De Vitis, P. Foglia, C.A. Prete // *IET Image Process*. 15 ,2021, P. 2179-2191.

75. De Vitis, G.A. A technique to reduce the processing time of defect detection in glass tubes/ G.A. De Vitis, P.Foglia, C.A. Prete //. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 997, , 2019, P. 165–178

76. Distance Transform of a Binary Image // https://www.mathworks.com/ help/images/distance-transform-of-a-binary-image.html (дата обращения 01.6.2023г.).

Foglia, P. Inspection system for pharmaceutical glass tubes / P. Foglia, C.
Prete, M. Zanda //. WSEAS transactions on systems archive, 2015, 14, P. 123 – 136.

78. GeometricImageTransformationshttps://docs.opencv.org/4.x/da/d54/group_imgproc_transform.html, (дата обращения15.8.2023г.).

79. Glass tube / https://en.wikipedia.org/wiki/Glass_tube (дата обращения 01.06.2024г.).

80. Greenman, M. Energy and Environmental Profile of the U.S. Glass Industry
/ M. Greenman, M. Gridley, C.P. Ross, D. Wishnick, J. Shell, D.J. McCracken // U.S.
Department of Energy, Office of Industrial Technologies, Energetics, 2002, P.90

81. Gonzalez, R.C. Digital image processing / R.C.Gonzalez, E.Richard // New York, 2018. 1019 pp.

82. Guerra, C.P. Study of bubbles elimination in silica glass produced by flame fusion from brazilian natural quartz powder / C.P. Guerra, E. Ono, M.F. Santos, C.K. Suzuki // Materials Science ISSN: 1662-9752, V. 798-799, P. 375-380

83. Guo, Y. An effective color image segmentation approach using neutrosophic adaptive mean shift clustering / Y.Guo, A.Sengvr, Y.Akbulut, A.Shipley // Measurement 2018, 119, P.28–40

84. How to detect specific colors from an image using OpenCV? https://www.projectpro.io/recipes/detect-specific-colors-from-image-opencv (дата обращения 01.08.2023г.)

85. Kanan, C. Color-to-Grayscale: Does the Method Matter in Image Recognition/ C. Kanan, G.W. Cottrell // PLoS ONE 7(1): e29740, 2012, P. 1-7.

86. Lin, W.K. LED strobe lighting for machine vision inspection / W.K. Lin, C.M. Uang, P.C. Wang, Z.S.Ho // International Symposium on Next-Generation Electronics, Kaohsiung, Taiwan, 2013, P. 345-346.

87. Luo, J. Bubble formation in additive manufacturing of glass / J.Luo, L.J.Gilbert, D.C. Peters, D.A. Bristow, R.G. Landers, J.T. Goldstein, A.M.Urbas, E.C.Kinzel // Proc. SPIE 9822, Advanced Optics for Defense Applications: UV through LWIR, 98220D, 2016, P.998-1003

88. Malamasa, E.N. A survey on industrial vision systems, applications and tools / N.E. Malamasa, G.M.P. Euripides, Z. Michalis, P. Laurent, J.-D. Legat // Image Vis. Comput. 2003, 21(2), P.171–188

89. Martin, D. Multi-modal defect detection of residual oxide scale on a cold stainless steel strip / D. Martin, M. GarciaAlegre, C. Villanueva // Mach. Vision Appl. 2010, 21(5), P.653–666.

90. Martinez, S.S. A machine vision system for defect characterization on transparent parts with non-plane surfaces / S.S. Martinez, J.G. Ortega, J.G. Garcia // Mach. Vis. Appl. 2010, 23(1), P. 1–13.

91. Ming, W. A comprehensive review of defect detection in 3C glass components / W. Ming, F. Shen, X. Li, Z. Zhang, J. Du , Z.Chen, Y.Cao // Measurement 2020, Vol.158. P.1-20

92. Murad, G. Robust control of a glass tube production process / G. Murad, I. Postlethwaite, D.-W Gu, J. Whidborne // Improvements in Furnace Control: Current Developments and New Technologies (Digest No. 1994/018), IEE Colloquium on At: London, United Kingdo, 1994. P. 7/1 - 7/4.

93. Nasyrov, R. Sh. Microgranular heterogeneity of quartz glass, / R. Sh. Nasyrov B. P. Bodunov, D. A. Artem'ev1 // Glass and Ceramics, 2019. V. 75, N.11 – 12 P. 471 - 474.

94. Ningning, QI. Glass defects inspection based on machine vision / QI. Ningning, M. CHANG, Y. LIU //. Optical Instruments, 2020, 42(1): P.25-31

95. OpenCV, Hough Line Transform, https://docs.opencv.org/4.x/d6/d10/tutorial_py_houghlines.html (дата обращения 01.02.2023г.)

96. OpenCV, Miscellaneous Image Transformations, Image Processing https://docs.opencv.org/4.x/d7/d1b/group_imgproc_misc.html (дата обращения 01.02.2023г.)

97. Morphological-skeleton // <u>https://felix.abecassis.me/2011/09/opencv-</u>morphological-skeleton/ (дата обращения 01.02.2023г.)

98. Ozturk, S.ë/ S. Ozturk, B. Akdemir // Proc. - Soc. Behav. Sci. 2015, 195(1),
P.2675–2682.

99. Peng, X. An online defects inspection method for float glass fabrication based on machine vision / X. Peng, Y. Chen, W. Yu, Z. Zhou, G. Sun // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2007, 39(11–12), P. 1180–1189.

100. Samuel, R. Glass Defect Detection Techniques using Digital Image Processing –A Review/ Samuel R., Groth Ren Zhongfei // IP Multimedia Communications A Special Issue from IJCA - www.ijcaonline.org, International Journal of Digital Application, 2013. V.1, Issue 10. 101. Sharma, S. Medial Axis Transformation based Skeletonzation of Image Patterns using Image Processing Techniques S.i Sharma, M. Kaur // IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE), 2013, V.13, Issue 4, P.07-10

102. Singh, T. Detection of defects in glass sheet using C.S.C based segmentation method / T. Singh, R.L. Dua, S. Agrawal, A. Acharya // Int. J. Comput. Appl. 2013, 68(7), P. 627–634.

103. Skeletonize // https://scikit-image.org/docs/stable/auto_examples/edges/ plot_skeleton.html (дата обращения 01.07.2023г.)

104. Skimage.morphology // https://scikit-image.org/docs/stable/api/skimage. morphology#skimage.morphology.medial_axis (дата обращения 01.02.2024г.)

105. Yuan, Z.-C. Vision-based defect detection for mobile phone cover glass using deep neural networks / Z.-C. Yuan, Z.-T. Zhang, H. Su, L. Zhang, F. Shen, F. Zhang // Int. J. Precis. Eng. Manuf. 2018, 19 (6), P. 801–810.

106. Zhan, S. Structured light system with accuracy improved by the use of LCD pattern for calibration / S. Zhan, C. ChiKit // Hkie Trans. 2008, 15(4), P.7-11.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акты внедрения

Republic of Iraq Ministry of Higher Education & Scientific Research AL SALAM UNIVERSITY COLLEGE

التاريخ: ٢٩٥٩



ACT OF IMPLEMENTATION

Dissertation developments of Al-Ghuraibawi Azhar Owaid Kadhim

On the topic: "CONTROL OF PARAMETERS AND DEFECTS OF QUARTZ TUBES DURING THE PRODUCTION PROCESS BASED ON TECHNICAL VISION".

The team working in the "Department of Optics and Department of Computer Technologies •in Al Salam University College " reviewed the program used to detect defects in quartz glass tube and it's results of scientific and practical research obtained by Al-Ghuraibawi Azhar Owaid Kadhim, under supervisor Prof. Dr. Sc. Rusinov L.A. as part of the dissertation work, and notes the relevance, scientific and practical significance of the research for our organization.

Based on the examination of the thesis and in recognition of the valuable results and recommendations proposed, the thesis highlighted the importance of integrating technical vision systems in identifying and monitoring quartz tube features and defects during the production process to ensure real-time monitoring and analysis.

The programs created in the thesis will be focused on enhancing the skills of the production team in effectively using technical vision systems to inspect, measure and verify quartz tube parameters in advanced stages of the production process by The optical methods and Using computer tools (Python program) based on open source libraries for image processing. The methods and algorithms were characterized by accuracy a high probability of detecting defects, and achieving a high detection speed, which ensures its use in real time, which is dictated by the need to ensure high performance, which reduces effort and at the lowest costs.

This act of implementation demonstrates the organization's commitment to translate the research findings and thesis recommendations into concrete actions that will enhance the control of parameters and defects in quartz tubes during the production process. Implementing these measures is essential to improve the quality and efficiency of the production process, ultimately contributing to organizations' competitiveness and reputation in the industry.



معترف بها من قبل وزارة التعليم العالي والبحث العلمي بكتابها المرقم (١٦٦) في ٢٠٠٥/١/٢٤ وقرار مجلس الوزراء (٣٦٥) نسنة ٢٠١٢ مندوق بريد / ١٠١٥/ بغداد ـ مكتب بريد البياع C7819992233 E-mail:alsalamuniversity@alsalam.edu.lq - مندوق بريد /

Перевод с английского и арабского языков на русский язык

Республика Ирак Министерство высшего образования и научных исследований Колледж университета Аль-Салам Номер: 945 Дата: 03.06.2024

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

Диссертационных разработок Аль-Гурайбави Азхар Овайд Кадим По месту требования На тему «КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ И ДЕФЕКТОВ КВАРЦЕВЫХ ТРУБОК В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ»

Группа, работающая на «Кафедре оптики и кафедре компьютерных технологий в университетском колледже Аль-Салам», рассмотрела программу, используемую для обнаружения дефектов в кварцевой стеклянной трубке, и результаты ее научно-практических исследований, полученные Аль-Гурайбави Азхар Овайд Кадим под руководством доктора наук профессора Русинова Л.А. в рамках диссертационной работы, и отмечает актуальность, научную и практическую значимость исследования для нашей организации.

На основании изучения диссертации и признания ценных результатов и предложенных рекомендаций в диссертации, подчеркивается важность интеграции систем технического зрения для выявления и мониторинга характеристик и дефектов кварцевых трубок в процессе производства для обеспечения мониторинга и анализа в режиме реального времени.

Программы, созданные в диссертации, будут направлены на повышение навыков производственной группы в эффективном использовании систем технического зрения для осмотра, измерения и проверки параметров кварцевых трубок на продвинутых стадиях производственного процесса с помощью оптических методов и использования компьютерных инструментов (программа Python) на основе открытых библиотек для обработки изображений. Методы и алгоритмы характеризовались точностью, высокой вероятностью обнаружения дефектов и достижением высокой скорости обнаружения, что обеспечивает их использование в режиме реального времени, что обосновывается необходимостью обеспечения высокой производительности, что снижает усилия при минимальных затратах.

Этот акт о внедрении демонстрирует готовность организации к переводу результатов исследований и рекомендаций диссертации в конкретные действия, которые улучшат контроль параметров и дефектов в кварцевых трубках в процессе производства. Внедрение этих мер имеет важное значение для повышения качества и эффективности производственного процесса, в итоге способствуя конкурентоспособности и репутации организаций в отрасли.

Проф. Абдельсалам Бдеви Юсф /подпись/

Декан 03.06.2024 Печать: Колледж университета Аль-Салам – Декан

Колледж признан министерством высшего образования и научных исследований приказом (№122) от 24.01.2005 и решением Совета министров (№325) 2012 г.

07819992233 - 07719992233 Эл.почта: alsalamuniversity@alsalam.edu.iq Почтовый ящик / 51019 / Багдад — почтовое отделение г. Байяа

---Конец перевода документа-----

Я, переводчик Абдул Рахман Али, владеющий русским, английским и арабским языками, подтверждаю, что выполненный мною перевод приложенного документа является правильным, точным и полным.

Переводчик Абдул Рахман Али

Санкт-

Петербург

Российская Федерация Санкт-Петербург Четырнадцатого ноября две тысячи двадцать четвёртого года

Я, Ульянова Елена Сергеевна, нотариус нотариального округа Санкт-Петербург, свидетельствую подлинность подписи переводчика Абдул Рахман Али.

Подпись сделана в моем присутствии.

Личность подписавшего документ установлена. Зарегистрировано в реестре: № 78/266-н/78-2024-16-568.

Уплачено за совершение нотариального действия: 600 руб.



Е.С. Ульянова



ИТОГО В НАСТОЯЩЕМ ДОКУМЕН ГЕ 3 (ТРИ) ЛИСТА НОТАРИУС





ACT OF IMPLEMENTATION Dissertation developments of Al-Ghurabawi Azhar Owaid Kadhim To whom it may concern

On the topic: "CONTROL OF PARAMETERS AND DEFECTS OF QUARTZ TUBES DURING THE PRODUCTION PROCESS BASED ON TECHNICAL VISION"

The engineering team working in the "AI Rawafid Center" reviewed the program used to detect defects in quartz glass tube and it's results of scientific and practical research obtained by Al-Ghurabawi Azhar Owaid Kadhim. under the guidance of Prof. Dr. Sc. Rusinov L.A. as part of the dissertation work, and notes the relevance, scientific and practical significance of the research for our organization.

A scientific and practical method for reducing delays in detecting defects, based on reducing the significant load on the operators' vision and ensuring the required control quality using computer tools (python program) based on open source libraries of image processing, allows you to automatically create a set of measures to compensate for delays.

Advantages of using the proposed algorithm to Detection surface defects, geometry shape of tube, thickness measurement and thickness defect of quartz glass:

- Having a high probability of detecting defects, and achieving high detection speed, ensuring its use in real time, which is dictated by the need to ensure high performance, also it which does not require the presentation of reference images, . In addition to quartz glass tube in the shortest possible time, thus reducing the effort and at the lowest costs.

The results of scientific and practical research were used to detect defects in quartz glass tube and monitor the quality of glass tube. Thanks to the application of the results of this thesis, sound conclusions with high accuracy and speed were obtained.

Head of Complex

Rafid owaid

03.06.2024

E-mail: rafid.allu57@gmail.com

phone number: +9647702760144 **Center Manager** nd Medica, Irad Baghdad 0964770296014 Manage Owaid &



Mob. : 009647702960144 E-mail: rafid.allu57@gmail.com Iraq- Baghdad – Al-Saidya city Перевод с английского и арабского языков на русский язык

Аль-Равафид Учебный центр

Номер: 178 Дата: 03.06.2024

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

Диссертационных разработок Аль-Гурайбави Азхар Овайд Кадим По месту требования На тему «КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ И ДЕФЕКТОВ КВАРЦЕВЫХ ТРУБОК В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ»

Инженерная группа, работающая в центре «Аль-Равафид», рассмотрела программу, используемую для обнаружения дефектов в кварцевой стеклянной трубке, и результаты ее научнопрактических исследований, полученные Аль-Гурайбави Азхар Овайд Кадим под руководством доктора наук профессора Русинова Л.А. в рамках диссертационной работы, и отмечает актуальность, научную и практическую значимость исследования для нашей организации.

Научно-практический метод по снижению задержек при выявлении дефектов, основанный на снижении значительной нагрузки на зрение операторов и обеспечении требуемого контроля качества с использованием компьютерных средств (программа Python) на базе открытых библиотек обработки изображений, позволяет автоматически формировать комплекс мер по компенсации задержек.

Преимущества использования предлагаемого алгоритма для обнаружения дефектов поверхности, геометрии формы трубки, измерения толщины и дефектов толщины кварцевого стекла:

 Имея высокую вероятность обнаружения дефектов, и достигая высокой скорости обнаружения, обеспечивая его использование в режиме реального времени, что определяется необходимостью обеспечения высокой производительности, также он не требует представления образцов-изображений. В дополнение к кварцевой стеклянной трубке в кратчайшие сроки, тем самым сокращая усилия при наименьших затратах.

Результаты научно-практических исследований были использованы для обнаружения дефектов в кварцевых стеклянных трубках и контроля качества стеклянных трубок. Благодаря применению результатов данной диссертации, обоснованные выводы были получены с высокой точностью и скоростью.

Глава комплекса,

Рафид Овайд 03.06.2024 Эл.почта: <u>rafid.allu57@gmail.com</u> Номер телефона: +9647702960144

Управляющий центра /подпись/ Печать: Медицинский центр Аль-Равафид – Рафид Овайд Кадим – Багдад, Ирак – Управляющий 009647702960144

Учебный центр Аль-Рафавид Печать: Учебный центр Аль-Равафид Штамп: Оптометрист – Рафид Овайд Кадим – Диагностика и лечение зрения /подпись/

> Моб. Телефон: 009647702960144 Эл.почта: <u>rafid.allu57@gmail.com</u> Ирак – Багдад – Город Аль-Сайдия

Я, переводчик Абдул Рахман Али, владеющий русским, английским и арабским языками, подтверждаю, что выполненный мною перевод приложенного документа является правильным, точным и полным.

Переводчик Абдул Рахман Али

Санкт-

Петербург

Российская Федерация Санкт-Петербург Четырнадцатого ноября две тысячи двадцать четвёртого года

Я, Ульянова Елена Сергеевна, нотариус нотариального округа Санкт-Петербург, свидетельствую подлинность подписи переводчика Абдул Рахман Али.

Подпись сделана в моем присутствии. Личность подписавшего документ установлена. Зарегистрировано в реестре: № 78/266-н/78-2024-16-567.





ИТОГО В НАСТОЯЩЕМ ДОКУМЕНТЕ 4 (ЧЕТЫРЕ) ЛИСТА НОТАРИУС

