УДК 004.415

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЦИФРОВОГО АНАЛИЗА В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ДВУТАВРОВ

Афонин С.П. – студент, 4 курс,
Гончаров М.А. – студент, 4 курс,
Симикова А.А. – научный руководитель, к.т.н, доцент каф. ИиАПС,
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
Россия, г. Кемерово

Качество поверхности горячекатаных двутавров является одним из ключевых параметров, определяющих их эксплуатационную надёжность и соответствие нормативным требованиям. Поверхностные дефекты — трещины, вмятины, включения, раковины и локальные неровности — могут приводить к снижению прочностных характеристик и возникновению скрытых зон концентрации напряжений. В условиях высокой скорости производственных линий традиционный ручной визуальный контроль оказывается недостаточно эффективным: оператор ограничен скоростью реакции, подвержен утомлению и не способен обеспечивать стабильность оценки на всём объёме выпускаемой продукции.

Использование линейных камер и методов цифровой обработки изображений позволяет автоматизировать процесс контроля и обеспечить детализированное представление поверхности профиля независимо от его длины. Линейное сканирование даёт возможность формировать равномерную развёртку поверхности, синхронизированную со скоростью движения изделия, что создаёт предпосылки для применения современных алгоритмов анализа текстуры и сегментации дефектов.

Целью работы является разработка программно-аппаратного комплекса автоматизированного визуального контроля горячекатаных двутавров, включающего высокоскоростной модуль получения изображений, методы фотометрической и геометрической нормализации и алгоритмы выявления и классификации поверхностных дефектов. Исследование направлено на повышение точности контроля и обеспечение объективной цифровой фиксации качества поверхности каждого изделия.

Линейное сканирование профильных изделий основано на формировании двумерной развёртки поверхности методом последовательной съёмки строк при движении детали. Изображение представляет собой дискретизацию отражательного поля поверхности, где каждая строка привязана к фактическому перемещению изделия по данным энкодера. Это позволяет получать метрически корректную развёртку и применять методы пространственного анализа дефектов.

Поверхность горячекатаного металла характеризуется значительной фоновой вариативностью, обусловленной микрорельефом, остаточной окалиной и неравномерностью термического воздействия. Для компенсирования этих факторов применяется фотометрическая нормализация, основанная на модели мультипликативных и аддитивных компонентов яркости. Flat-field коррекция устраняет низкочастотные вариации, а временная фильтрация подавляет пульсации и шумы сенсора. Геометрическая нормализация выполняется путём пересчёта строк в регулярную координатную сетку с фиксированным шагом, что устраняет искажения, возникающие при изменении скорости движения изделия.

Методология анализа опирается на текстурную модель нормальной поверхности, дефекты которой нарушают статистическую структуру текстуры, вызывая отклонения в распределении яркостных градаций и частотно-ориентационных характеристиках. Для их описания используется интеграция нескольких дескрипторов: матрицы совместной встречаемости градаций (характеризующие контраст, гомогенность и энтропию), локальные бинарные шаблоны, устойчивые к фотометрическим преобразованиям, а также Габор-фильтры, выделяющие анизотропные компоненты структуры. Такая комбинация обеспечивает чувствительность к различным типам дефектов при сложной природной фактуре металла. [1]

Вероятностное поле отклонений формируется посредством статистической модели на основе многомерного признакового пространства. На следующем этапе применяется геометрическая регуляризация методом уровневых сетов, обеспечивающая выделение связных областей с гладкими границами и подавление изолированных шумовых фрагментов. Геометрические и текстурные атрибуты выделенных областей — площадь, вытянутость, компактность, ориентация — позволяют проводить классификацию типов дефектов и формировать объективное заключение о состоянии поверхности.

Разрабатываемая система автоматизированного визуального контроля представляет собой интегрированный программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий непрерывный цикл получения, обработки и анализа изображения поверхности горячекатаного двутавра. Архитектура системы построена по модульному принципу и включает три взаимосвязанных уровня: сканирующий модуль, центр обработки данных и интерфейс оператора. Такая структура позволяет обеспечить устойчивость работы в условиях промышленного производства и разделить задачи захвата данных, вычислительной обработки и экспертной визуализации. [2]

Сканирующий модуль выполняет первичное формирование изображения поверхности и основан на использовании линейных камер с высокой частотой считывания строк. Камера синхронизирована с движением проката с помощью энкодера, что обеспечивает точную привязку каждой строки к координате поверхности изделия. Система освещения формирует стабильное поле яркости, минимизируя влияние внешних факторов. Поступающие строки объединяются в непрерывную развёртку и передаются на последующие этапы

обработки по высокоскоростному каналу связи. Конструкция сканирующего модуля предусматривает пылезащищённость, механическую жёсткость и стабильность оптической геометрии, что является критически важным для получения воспроизводимых данных.

Центр обработки данных выполняет операции нормализации, анализа и классификации дефектов. На данном уровне применяются алгоритмы коррекции освещённости, компенсации неравномерности скорости движения изделия, формирования признаковых карт текстуры и статистической оценки отклонений. Вычислительная архитектура центра ориентирована на потоковый характер данных и предполагает независимость отдельных этапов обработки, что обеспечивает стабильное время реакции. Результаты анализа сохраняются в базе данных, где фиксируются параметры дефектов, фрагменты развёртки и служебная информация о скане. Такое разделение функций поддерживает масштабируемость системы и возможность интеграции в производственную инфраструктуру многолинейных прокатных цехов.

Интерфейс оператора предоставляет средства визуального анализа поверхности профиля на основе трёхмерной и двумерной реконструкции. Оператор может просматривать развёртку поверхности, анализировать локализацию дефектов, изучать их геометрические и текстурные характеристики, а также формировать отчёты. Интерактивная визуализация повышает удобство работы и обеспечивает наглядное представление результатов автоматического анализа, позволяя объединить вычислительные методы с экспертной оценкой специалиста.

Такое разделение функций и потоков данных формирует целостную архитектуру, способную обеспечивать высокоточный контроль качества в реальном времени, сохраняя при этом устойчивость к внешним воздействиям и требованиям промышленной эксплуатации.

Разработанная методология позволяет сформировать устойчивый к внешним воздействиям цикл анализа поверхности горячекатаных двутавров. На основе моделирования и анализа характеристик изображения можно отметить, что применяемые методы фотометрической и геометрической нормализации эффективно снижают вариативность фоновой текстуры и обеспечивают метрическую согласованность развёртки. Это является ключевым условием последующего корректного выделения локальных структурных аномалий.

Применение комбинированных текстурных дескрипторов — статистических, локально-структурных и частотно-ориентационных — обеспечивает чувствительность к дефектам различной природы: от мелких локальных нарушений до протяжённых неоднородностей. Вероятностная модель отклонений, дополненная геометрической регуляризацией границ, формирует сегментацию с выраженной структурной целостностью, что позволяет корректно выделять формы дефектов даже при сложной неустойчивой текстуре металла.

Использование геометрических атрибутов сегментированных областей — таких как вытянутость, компактность, ориентация и локальный контраст — создаёт основу для дифференциации типов дефектов и построения

формализованной модели их классификации. Это, в свою очередь, позволяет формировать структурированное цифровое описание состояния поверхности изделия и обеспечивает возможность сопоставления партий, анализа повторяющихся аномалий и выявления потенциальных причин технологических отклонений. [3]

Таким образом, анализ теоретических свойств алгоритмов и моделируемых характеристик изображений показывает, что предложенная архитектура и методический подход обладают потенциалом для реализации высокоточного автоматизированного контроля состояния поверхности горячекатаных двутавров и значительного повышения объективности оценки качества по сравнению с традиционным визуальным контролем.

В заключение хотелось бы отметить, что предложенный подход к автоматизированному визуальному контролю горячекатаных двутавров, основанный на линейном сканировании и анализе текстурных признаков, формирует методическую основу для надёжного выявления поверхностных дефектов. Применяемые процедуры нормализации, сегментации и классификации обеспечивают устойчивость к природной вариативности металлической поверхности и позволяют объективно описывать состояние изделия. Представленная система может служить базой для дальнейшего развития промышленных средств контроля качества и внедрения более сложных интеллектуальных алгоритмов анализа.

Список литературы:

1. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс; пер. с англ. — Москва: Техносфера, 2005. — 1072 с.

2. Советов, Б. Я. Моделирование систем: учебник для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва: Высшая школа, 2001. — 343 с.

3. Джейн, А. К. Статистические методы распознавания образов / А. К. Джейн, Р. П. В. Дуин, Дж. Мао // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. — 2000. — Т. 22, № 1. — С. 4–37.