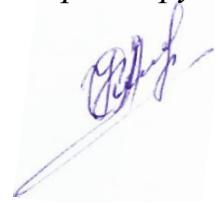


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

На правах рукописи

КЛИМАЧЕВ Сергей Александрович



**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА
ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА СО СРЕДСТВАМИ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЙ
ПО УСТРАНЕНИЮ ДЕФЕКТОВ**

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика
(технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Соловьев Николай Алексеевич

Оренбург – 2025

Оглавление

| | |
|--|----|
| Введение | 4 |
| 1 Системный анализ поддержки принятия решений в оптико-электронных системах контроля качества поверхности листового металлопроката | 10 |
| 1.1 Структура и характеристики оптико-электронной системы контроля качества поверхности листового металлопроката | 10 |
| 1.2 Обзор разработок оптико-электронных систем контроля качества поверхности листового металлопроката | 14 |
| 1.3 Использование средств поддержки принятия решений в системах контроля качества..... | 18 |
| 1.4 Особенности контроля качества листового металлопроката | 21 |
| 1.5 Основная проблема контроля качества поверхности листового металлопроката с использованием средств технического зрения | 27 |
| 1.6 Цель исследования и гипотеза ее достижения..... | 29 |
| Выводы по первой главе | 34 |
| 2 Разработка методики поддержки принятия решений по устранению дефектов поверхности листового материала при холодной обработке металла давлением.. | 35 |
| 2.1 Модель изображения области дефекта | 36 |
| 2.2 Оценка качества поверхности листового материала | 41 |
| 2.3 Модель изменения состояний поверхности листового материала в процессе прокатки..... | 46 |
| 2.4 Методика поддержки принятия решений | 48 |
| 2.5 Разработка алгоритмов поддержки принятия решений по устранению дефектов поверхности листового металлопроката | 50 |
| Выводы по второй главе | 63 |
| 3 Разработка прототипа программного средства интеллектуальной поддержки принятия решений по устранению дефектов листового металлопроката | 64 |
| 3.1 Разработка функционального назначения программного средства | 64 |
| 3.2 Разработка архитектуры программного средства..... | 65 |

| | |
|--|-----|
| 3.3 Разработка структуры оптико-электронной системы контроля качества со средствами поддержки принятия решений..... | 67 |
| 3.4 Разработка информационного обеспечения программного средства | 69 |
| 3.5 Разработка алгоритма программного средства..... | 77 |
| 3.6 Верификация разработанных программных компонент | 78 |
| Вывод по третьей главе | 82 |
| 4 Экспериментальное исследование средств поддержки принятия решений по устранению дефектов листового металлопроката..... | 83 |
| 4.1 Разработка имитационной модели исследования закономерностей устранения поверхностных дефектов листового металлопроката | 83 |
| 4.2 Планирование эксперимента и анализ результатов исследования | 92 |
| 4.3 Направления дальнейших исследований | 98 |
| Выводы по четвертой главе | 100 |
| Заключение | 101 |
| Список использованных источников | 102 |
| Приложение А (обязательное) Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ..... | 112 |
| Приложение Б (обязательное) Акты внедрения результатов работы | 113 |

Введение

Актуальность темы исследования. Цифровизация промышленного производства является одной из приоритетных задач отечественной экономики. Политика технологической независимости Российской Федерации, а также уход с российского рынка ряда зарубежных поставщиков программного обеспечения способствовали разработке новых цифровых решений и их внедрению в существующие технологические процессы, в частности, в процесс производства листового металлопроката.

Современное состояние технологии производства листового металлопроката характеризуется повышением требований к качеству готовой продукции при уменьшении прокатной толщины листа. В этих условиях возрастает влияние факторов внешней среды: случайного характера физико-механических свойств горячекатанной заготовки, технического состояния прокатного оборудования, влияния человеческого фактора. Все это определяет положительную динамику роста поверхностных дефектов проката. Поэтому технологические линии оснащены системами контроля качества продукции на основе средств компьютерного зрения, которые позволяют выявить дефекты в процессе производства. Подобные исследования представлены в работах отечественных и зарубежных авторов: Гарбара Е.А., Бугаева Д.П., Мазура И.П., Логуновой О.С., Трофимова В.Б., Кузьмина М.И., Тищенко Д.А., Привезенцева Д.Г., Wu G, Medina J. Li, Zhou S. и др.

Обобщая результаты исследований, можно сделать вывод о том, что в настоящее время сложилась система методов, моделей и средств обеспечения качества поверхности листового металлопроката, разработаны общеметодологические принципы их использования, которые позволяют решать задачу идентификации поверхностных дефектов проката с помощью оптико-электронных систем контроля качества (ОЭСКК).

Часть дефектов проката можно устранить в процессе производства посредством корректировки исходных технологических параметров прокатки. Однако задача изменения параметров полностью возложена на оператора прокатного ста-

на, работающего в условиях дефицита времени, и требует системного анализа влияния факторов воздействия внешней среды. Это способствует увеличению прогонов и, как следствие, приводит к снижению производительности прокатного стана.

Таким образом, возникает проблема, которая требует решения научной задачи развития знаний в области средств поддержки принятия решений (СППР) по изменению задающих технологических параметров прокатки для устранения поверхностных дефектов листового металлопроката. Отсюда, тема исследования является актуальной.

Работа выполнена в рамках госбюджетной НИР «Развитие цифровых технологий информационно-телекоммуникационных систем» (№ госрегистрации АААА-А18-118102690042-6).

Объект исследования – оптико-электронные системы контроля качества поверхности листовых материалов.

Предмет исследования – методы, модели и алгоритмы интеллектуальной обработки информации в ОЭСКК для принятия решений по устраниению дефектов поверхности листовых материалов.

Цель исследования – повышение эффективности ОЭСКК листовых материалов на основе внедрения средств интеллектуальной поддержки принятия решений по устраниению выявленных дефектов.

Задачи достижения цели исследования:

1) разработать концептуальную модель принятия решений по устраниению дефектов поверхности листового металлопроката на основе контура управления технической системой с ОЭСКК;

2) разработать методику, модели и алгоритм поддержки принятия решений по устраниению дефектов поверхности листового материала при холодной обработке металла давлением с учетом воздействия факторов внешней среды, оказывающих влияние на качество поверхности листа;

3) разработать прототип СППР по устраниению дефектов металлопроката в ОЭСКК поверхности листовых материалов;

4) выполнить экспериментальное исследование предложенных технических решений и оценить их эффективность.

Область исследования соответствует паспорту специальности 2.3.1. – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»: п. 2 – формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта; п. 3 – разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта; п. 4 – разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта; п. 5 – разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

Научная новизна положений, выносимых на защиту:

1) Концептуальная модель принятия решений по устранению дефектов поверхности листового металлопроката на основе контура управления технической системой с ОЭСКК, отличающаяся наличием научно-обоснованной взаимосвязи технологических параметров холодной обработки металла давлением с показателями качества поверхности листового материала в условиях воздействия внешней среды (п. 2, п. 3).

2) Методика поддержки принятия решений по устранению дефектов поверхности листового материала при холодной обработке металла давлением, отличающаяся наличием модели области дефектов проката с расширенным набором признаков и учетом воздействия факторов внешней среды, оказывающих влияние на качество поверхности проката и особенности дефекта (п. 5).

3) Модель изменения состояний поверхности листового металла в процессе прокатки, отличающаяся учетом воздействия факторов, оказывающих влияние на качество поверхности проката: качества заготовки, технического состояния прокатного оборудования, влияния человеческого фактора (п. 3).

4) Алгоритм поддержки принятия решений по устраниению дефектов поверхности листового металлопроката, отличающийся использованием множества Парето-оптимальных альтернатив устранения дефектов и выбором лучшей альтернативы по критерию уровня дефектности, оцениваемого на основе признаков изображения области дефекта по многопараметрической модели изменения состояний поверхности металлопроката (п. 4, п. 5).

Достоверность и обоснованность научных результатов. Достоверность научных положений работы основана на используемой методологической базе исследования и обеспечивается обоснованностью принятых ограничений при разработке математического аппарата, сходимостью результатов исследования с экспериментальными данными.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в разработке методики, моделей и алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия решений по управлению процессом устраниния дефектов листового металлопроката в условиях воздействия внешней среды.

Практическая ценность заключается в разработанной программной системе интеллектуальной поддержки принятия решений по управлению процессом устраниния дефектов листового металлопроката, являющейся развитием специального программного обеспечения оптико-электронной системы контроля качества готовой продукции, что подтверждено свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ (рисунок А.1).

Внедрение результатов работы. Материалы диссертации внедрены в практику ООО «ГЗОЦМ «Гайская медь» (рисунок Б.2) и учебный процесс ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» (рисунок Б.1).

Методы исследования. Исследования выполнены с использованием теории систем и системного анализа, теории автоматизированного управления, теории принятия решений, методов цифровой обработки изображений, искусственного интеллекта и исследования операций.

Личный вклад автора. Все результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Направления исследований, формулировка проблем и

постановка задач, выдвижение гипотезы их решения обсуждались с научным руководителем – д.т.н., профессором Н.А. Соловьевым, что отражено в совместных публикациях. Системный анализ процессов обнаружения и устранения поверхностных дефектов на основе действующей ОЭСКК, анализ структуры исходной видеинформации, модель математического описания изображения металлопроката на основе признаков области дефекта, методика применения критерия выбора заданного уровня устранения дефектов, образующего множество Парето, информационное и программное обеспечение для обработки полученной информации оптико-электронного контроля качества готовой продукции в ходе имитационного эксперимента, основные результаты принадлежат автору.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 83-й Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2025 г.), II Всероссийской научно-практической конференции «Программное обеспечение для цифровизации предприятий и организаций» (г. Магнитогорск, 2024 г.), VII Всероссийской научной конференции с международным участием «Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения» (г. Тольятти, 2024 г.), 82-й Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2024 г.), XIX Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (г. Томск, 2023 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Современные научно-исследовательские и технологические аспекты программной инженерии» (г. Оренбург, 2023 г.), международной научно-технической конференции «Научная сессия ТУСУР-2022» (г. Томск, 2022 г.), всероссийской научно-практической конференции «Наука и образование – 2021» (г. Мурманск, 2021 г.), VI Всероссийской научно-практической конференции «Инженерные технологии: традиции, инновации, векторы развития» (г. Абакан, 2020 г.), всероссийской научно-практической конференции «Университетская наука: решения и инновации» (г. Оренбург, 2018 г.).

Публикации. По теме исследования опубликовано 14 печатных работ, в том числе 3 статьи в журнале из «Перечня...» ВАК. Получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 95 наименований, двух приложений и содержит 111 страниц текста, 47 рисунков и 11 таблиц.

1 Системный анализ поддержки принятия решений в оптико-электронных системах контроля качества поверхности листового металлопроката

1.1 Структура и характеристики оптико-электронной системы контроля качества поверхности листового металлопроката

При оптическом методе неразрушающего контроля [1] качества листового металлопроката с использованием систем технического зрения информация о состоянии поверхности проката выделяется из регистрируемых изображений и подвергается обработке и анализу [2, 3].

Согласно положениям ГОСТ Р 70652–2023, определяющим общие требования к оптико-электронным системам технического зрения, используемым при неразрушающем контроле, ОЭСКК предназначены «для автоматического анализа и регистрации изображения контролируемого объекта в оптическом диапазоне, с целью обнаружения и классификации имеющихся дефектов». Под обнаружением дефекта понимается установление факта его наличия. Классификация дефекта трактуется как отнесение обнаруженного дефекта к определенному классу на основе выделения признаков, характеризующих этот класс.

Таким образом, ОЭСКК обеспечивают автоматическое обнаружение и классификацию дефектов, их размеров и координат по изображениям поверхности проката. ОЭСКК можно разделить на две группы:

- 1) системы автоматического распознавания изображения, которые извлекают из изображения наиболее характерные признаки, позволяющие автоматически определить тип дефекта;
- 2) измерители и счетчики, которые используются для автоматического определения размеров и координат дефектов.

Системы первой группы позволяют обнаружить на изображении поверхности проката и классифицировать дефекты определенного типа. Системы второй

группы дополнительно определяют координаты дефектов и их геометрические характеристики. ОЭСКК, которые автоматически приспосабливаются к условиям контроля, называются адаптивными. В процессе контроля подобные системы могут переходить от режима обнаружения дефекта к режиму максимального разрешения и определения типа и размеров дефекта.

В настоящее время ОЭСКК используют цифровые видеокамеры высокого разрешения, позволяющие получать и обрабатывать изображения поверхности движущейся ленты проката в реальном режиме времени. Цифровые видеокамеры подразделяются на две группы: линейные (строчные), регистрирующие изображение поверхности с разверткой строки за строкой, и матричные, фиксирующих изображение площади поверхности.

В работе рассматривается ОЭСКК, использующая линейные высокочувствительные камеры, установленные на выходе из клети реверсивного стана холодной прокатки с обеих сторон поверхности ленты проката (рисунок 1) [4]. Камеры охватывают всю ширину поверхности ленты и позволяют выполнять съемку при высокой скорости прокатки.

Преимуществом линейного сканирования является отсутствие необходимости обеспечивать перекрытие последовательных кадров и затем выполнять их программное совмещение, поскольку изображение непрерывно формируется в памяти самой линейной камеры. Однако использование принципа построчного сканирования поверхности может привести к проблеме соотношения сторон отображаемого объекта. Поскольку линейная камера представляет собой одиночную линейную решетку оптических датчиков, ее влияние возможно только на те данные, которые расположены в горизонтальном направлении по отношению к полученному изображению. Т.е. ширина объекта на изображении зависит от фокусного расстояния оптического устройства и расстояния объекта до сканирующего датчика, при этом высота объекта определяется в процессе движения камеры и объекта относительно друг друга. Для формирования корректного изображения соотношение ширины объекта и его высоты должно быть равным единице. Если скорость движения объекта будет слишком высокой, изображение получит-

ся сжатым (ширина больше высоты), при замедленном движении – растянутым (ширина меньше высоты).

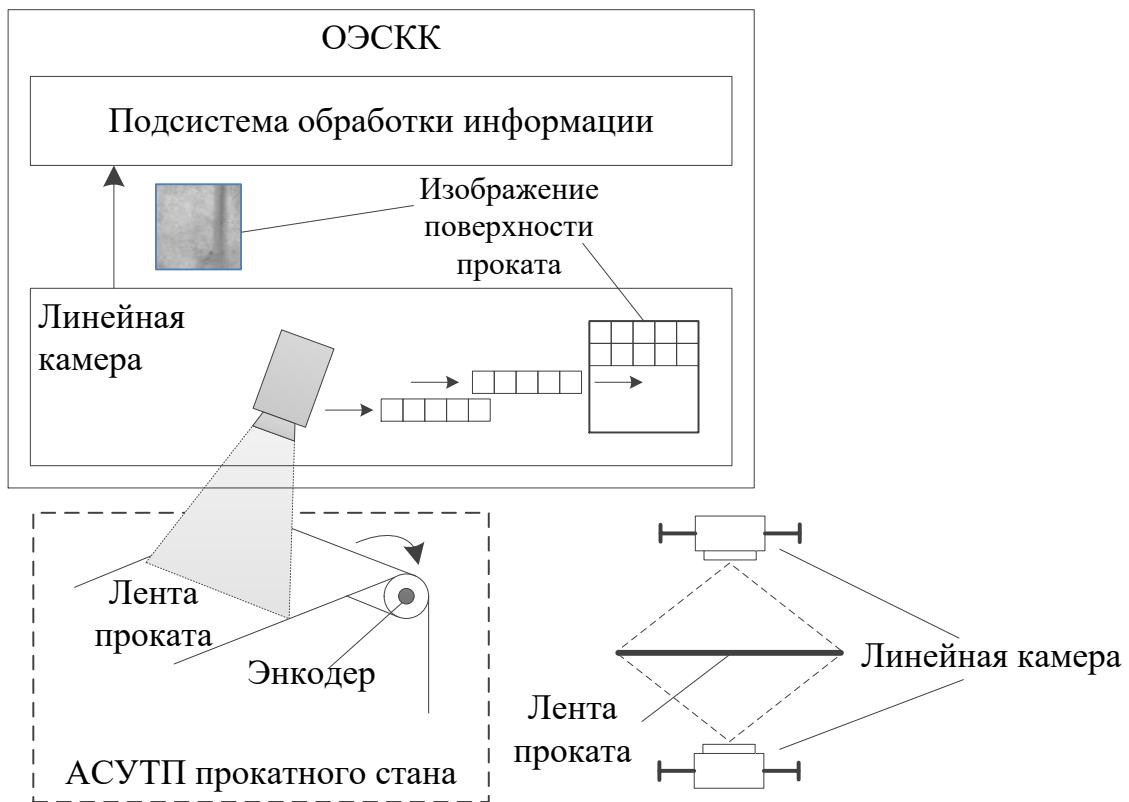


Рисунок 1 – Принцип формирования изображений поверхности ленты проката

Поскольку нельзя гарантировать постоянную и стабильную скорость движения ленты проката, возникающие колебания скорости будут приводить к изменению соотношения сторон результирующего отсканированного изображения. Для решения этой проблемы необходимо управлять подсистемой захвата изображения таким образом, чтобы камера отображала линию каждый раз, когда смещение ленты проката будет равно заданному – длине проецируемого пикселя. Такой подход обеспечивает постоянство соотношения размеров по всей длине отсканированного изображения.

Для получения информации о величине смещения в контур АСУТП прокатного стана включают измерительный преобразователь угловых перемещений (энкодер) [5, 6]. Основными определяемыми параметрами энкодера являются число оборотов, частота, скорость, расстояние, положение или направление. Обычно эн-

кодер устанавливается на оси (валу) и подает сигналы, соответствующие вращению. Когда захват линии пикселей синхронизируется со скоростью движения прокатной ленты, захват становится независимым от этой скорости. Более того, деформацию изображения не вызовет даже временная остановка прокатки.

Определение характеристик линейной камеры для захвата изображения ленты проката с заданными параметрами можно осуществить следующим образом. Пусть камера с разрешением 2048 пикселей охватывает всю ширину ленты проката ($w = 600$ мм), движущейся со скоростью $v = 9000$ мм/с. Тогда один пиксель изображения будет захватывать $\Delta x = 0,29$ мм ленты. Тогда минимальная частота линейной камеры, при которой будет выполняться соотношение 1:1 ширины и высоты пикселя захватываемого изображения ($\Delta x = \Delta y$), определяется соотношением:

$$f = \frac{v}{\Delta y} = \frac{9000}{0,29} = 30,727 \text{ kHz}.$$

Например, данных требованиям удовлетворяет линейная камера с разрешением 2k и частотой линейной развертки 51 kHz. При этом указанные характеристики предоставляют некоторый резерв производительности с возможностью увеличения скорости прокатки до 14, 79 м/с.

После регистрации изображения проката ОЭСКК выполняет его обработку с целью выделения значимой информации. Цифровая обработка изображения включает ряд стадий: улучшение, восстановление, сжатие, морфологическую обработку, сегментацию изображения, представление и описание, распознавание.

В рассматриваемой ОЭСКК регистрируемые изображения в подсистеме обработки информации описываются моделью случайного двумерного поля в виде суммы двух компонент [7-9]:

$$I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y),$$

где $I(x, y)$ – поле яркости изображения; (x, y) – координаты изображения; $I_1(x, y)$ – яркость стационарного поля (текстурная компонента); $I_2(x, y)$ – яркость меняющегося поля дефектов.

Данная модель представляется в виде вейвлет-преобразования изображения [10, 11] $I(x, y)$:

$$I(x, y) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{j,k} \varphi \varphi(x, y) + \\ + \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} (w_{1j,k}^{(i)} \varphi \psi_{j,k}^{(i)}(x, y) + w_{2j,k}^{(i)} \psi \varphi_{j,k}^{(i)}(x, y) + w_{3j,k}^{(i)} \psi \psi_{j,k}^{(i)}(x, y))$$

где $\varphi \varphi(x, y) = \varphi(x)\varphi(y)$, $\varphi \psi(x, y) = \varphi(x)\psi(y)$, $\psi \varphi(x, y) = \psi(x)\varphi(y)$, $\psi \psi(x, y) = \psi(x)\psi(y)$ – расширение вейвлет-преобразования с одномерного случая на двумерный, $c_{j,k}$ – вейвлет-коэффициенты текстурной компоненты, $w_{1j,k}^{(i)}$, $w_{2j,k}^{(i)}$, $w_{3j,k}^{(i)}$ – детализирующие вейвлет-коэффициенты i -го уровня разложения.

Таким образом, рассмотрено определение ОЭСКК поверхности листового металлопроката в разрезе оптического метода неразрушающего контроля качества с использованием систем технического зрения, рассмотрена структура исследуемой ОЭСКК, ее характеристики и используемая модель представления изображений.

1.2 Обзор разработок оптико-электронных систем контроля качества поверхности листового металлопроката

Одной из причин возникновения поверхностных дефектов является различие физико-механических свойств входной полосы, прокатываемой на высоких скоростях, которое вызывает скачкообразное изменение амплитуды толщины полосы на выходе клети, соизмеримое с прокатной толщиной. Для устранения подобных дефектов в [12] предложено решение, предполагающее включение в схему АСУТП прокатного стана цепи компенсации динамической ошибки системы управления гидронажимным устройством и программно-аппаратной системы (ПАС) идентификации поверхностных дефектов. Внедрение ПАС в контур управления скоростью движения ленты проката позволило устраниить при реверсном

режиме прокатки до 65% царапин, 78% дефектов типа «волна» и «мятость» и обнаружить в процессе производства дефекты типа «окалина» и «пленка». Совершенствование алгоритмов обнаружения и классификации дефектов на основе метода окрестностей в оптико-электронной информационно-измерительной системе анализа изображений поверхности проката [13] способствовало улучшению достигнутых в [12] результатов: погрешность распознавания дефектов типа «отверстие», «пленка», «мятость», «царапина» снизилась от 9 до 25 процентов при среднем времени распознавания до 20 мс и скорости прокатки до 8 м/с.

Представленная в [14] ОЭСКК горячекатаного проката позволяет обеспечивать контроль верхней и нижней стороны поверхности проката за счет двух цифровых строчных видеокамер (рисунок 2). Разрешающая способность видеокамер составляет $0,5 \times 1,0$ мм, что определяет минимальный размер фиксируемого поверхностного дефекта. Обработка изображений дефектов поверхности включает предварительную корректировку изображения, обнаружение, сегментацию и классификацию. К полученному изображению применяются параллельно несколько алгоритмов обнаружения дефектов (для вертикального, горизонтального и диагонального контраста, тонких и протяженных, темных и светлых дефектов).

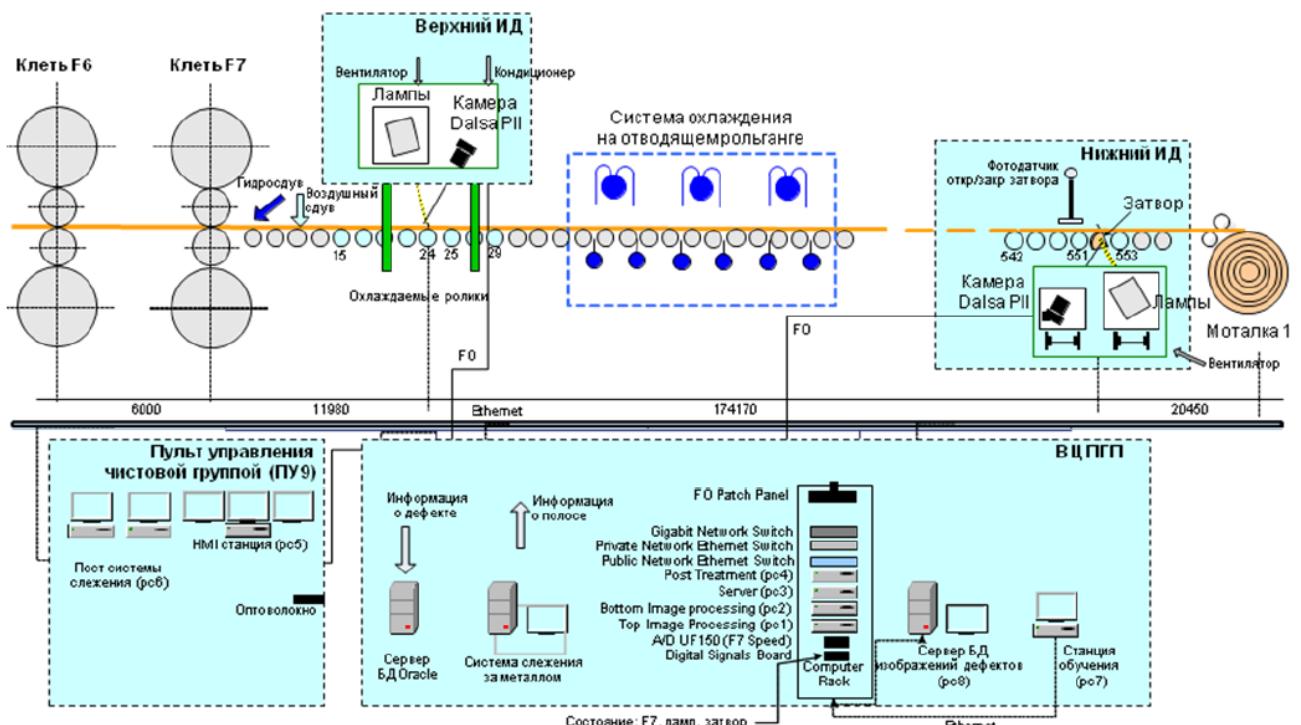
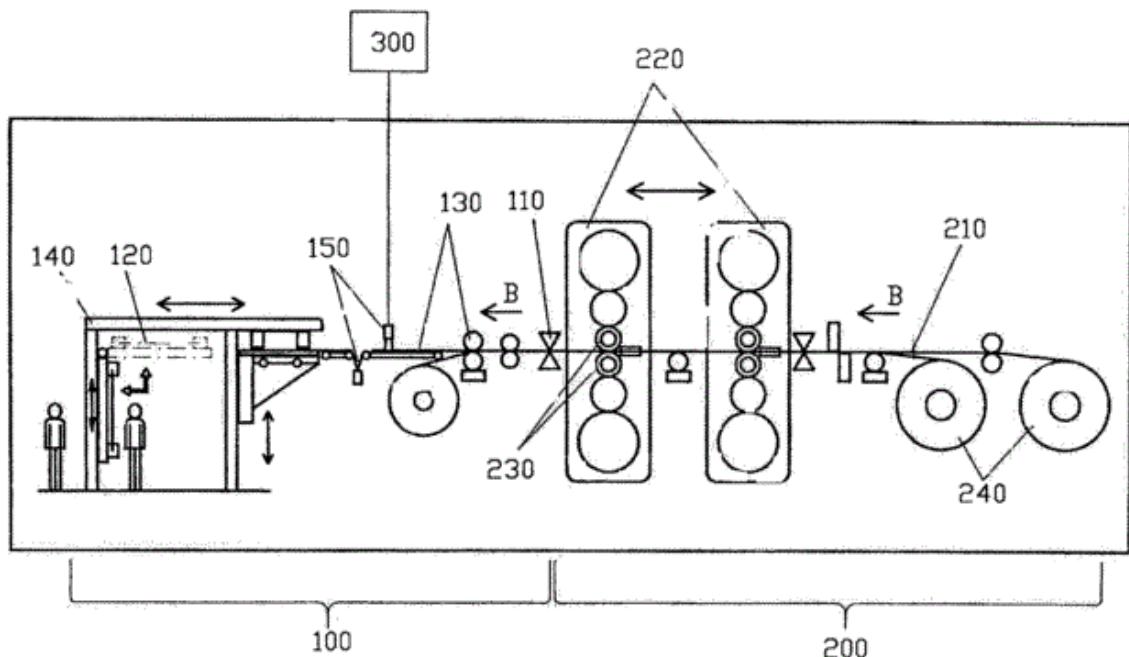


Рисунок 2 – ОЭСКК горячекатаного проката

Затем осуществляется морфологическое группирование полученных признаков для получения информации, требуемой для классификации. Классификация дефектов основана на методе классификационных сфер. Предложенный подход позволяет определять и классифицировать дефекта типа «плена», «раковина» и «вкат» с точностью 94% и выше.

Другой причиной возникновения поверхностных дефектов, не исследованной в [12-14], является износ оборудования прокатного стана: нажимных валков и тянувших роликов. Подобные дефекты проката имеют периодический характер и повторяются по всей длине полосы. Способ и устройство (рисунок 3) выявления периодических дефектов отрезков полосы проката предложены в [15]. Автоматический контроль верхней и/или нижней стороны отделенных отрезков полосы осуществляют с помощью системы камер и устройства оценки в отношении возможно имеющихся, обусловленных рабочим валком периодических типов дефектов.



100 – устройство контроля, 110 – устройство отделения отрезков полосы, 120 – отрезки полосы, 130 – транспортирующее приспособление, 140 – блок контроля полосы, 150 – камеры, 200 – прокатный стан, 210 – полоса металла, 220 – прокатная клеть, 230 – рабочий валок, 240 – рулон металла, 300 – устройство оценки поверхности металла

Рисунок 3 – Устройство контроля поверхности отрезков полосы проката

Однако обнаружение непериодических дефектов осуществляется с помощью контролирующего персонала, без применения систем технического зрения.

К решениям, сочетающим функции обнаружения, классификации поверхностных дефектов и контроля состояния оборудования, можно отнести Vmx Dequs [16] – программное обеспечение для промышленной высокоточной видеоаналитики на базе искусственного интеллекта и компьютерного зрения. Vmx Dequs является базовой частью автоматизированного рабочего места для инспекции стальных листов (АРМИЛ) [17]. Данный программно-аппаратный комплекс осуществляет поиск мельчайших дефектов на металлических листах и предназначен для решения задач строгого контроля качества авиационной коррозионностойкой стали ВНС-9-Ш, используемой для изготовления компонентов несущей системы вертолетов. Возможности системы позволяют распознавать 97% более 20 видов дефектов размером от 0,3 мм. Система сравнивает поверхность стали с существующим эталоном и на основании заданных характеристик выполняет обнаружение и классификацию дефектов с помощью метода алгоритмической детекции в комплексе с детектирующими и классифицирующими нейронными сетями [18]. Комплекс предназначен для контроля готовой продукции.

С целью снижения количества бракованной продукции авторы автоматизированной системы диагностирования поверхностных дефектов [19] предлагают комбинацию методов классификации дефектов и регулирования параметров процесса прокатки (скорости движения полосы, ее натяжения, величины межвалкового зазора и интенсивности обдува поверхности проката).

В настоящее время для контроля качества металлопроката широкое распространение нашло применение методов машинного обучения и нейросетевого анализа. Использование технологий машинного зрения в системе ML SENSE МЕТАЛЛОПРОКАТ [20] позволило повысить точность распознавания дефектов до 98% при величине дефекта от 0,1 мм и скорости прокатки до 10 м/с.

Таким образом, рассмотренные устройства и программно-аппаратные комплексы оптического контроля поверхности листового металлопроката обеспечивают высокую достоверность распознавания и классификации поверхностных де-

фектов различных типов. При этом некоторые системы предоставляют возможность мониторинга состояния прокатного оборудования и регулирования параметров процесса прокатки с целью сокращения дефектов. Однако комплексный подход по устранению дефектов листового металлопроката на основе контроля качества поверхности с применением средств технического зрения и изменения задающих параметров прокатки с учетом причин возникновения дефектов отсутствует.

1.3 Использование средств поддержки принятия решений в системах контроля качества

1.3.1 Концептуальные основы поддержки принятия решений в системах с управлением

Теория принятия решений – область научных знаний, использующая понятия и методы математики, статистики, экономики и менеджмента, которая изучает закономерности выбора людьми способов решений задач и достижения желаемого результата на основе поиска наиболее выгодной альтернативы из множества возможных [21].

Задача принятия решений заключается в формировании множества альтернатив, которые обеспечивают разрешение проблемной ситуации, сложившейся в условиях ограничений, и выделении из этого множества наилучшей альтернативы, удовлетворяющей заданным требованиям. Формальная постановка задачи принятия решений включает следующие пункты [22]:

- 1) Формулировка задачи – содержательное описание исследуемой проблемы, включающее ее модельное представление и определяющее целевую функцию поддержки принятия решений и требования к выходному результату.
- 2) Множество альтернатив – совокупность вариантов в виде способов достижения поставленной цели.

3) Множество признаков, описывающих альтернативы и их отличительные особенности. Признаками могут выступать показатели, характеризующие свойства альтернатив, либо оценки на основе критериев, значимых для лица, принимающего решения (ЛПР).

4) Множество ограничений, которое накладывается на множество альтернатив, описываемое содержательным образом или в виде формальных требований.

5) Предпочтения лица, принимающего решения (ЛПР). Используются для оценки вариантов решения проблемы и выбора наилучшей альтернативы.

Для анализа альтернатив на предмет соответствия целевой функции принятия решений используются различные методы: информационный поиск, интеллектуальный анализ, имитационное моделирование, машинное обучение, ситуационный анализ, генетические алгоритмы и др.

Таким образом, теория принятия решений позволяет решать задачи выбора альтернатив $X^*(t)$ на основе количественной оценки информации, которая характеризует в системе с управлением текущее состояние $Y(t)$ объекта управления и задающее воздействие $X(t)$, определяющее цель управления. Используя полученную по каналу обратной связи информацию $Z(t)$, система вырабатывает управляющее воздействие для возвращения объекта управления в требуемое состояние с учетом влияния $V(t)$ внешней среды [23]. Типовая схема системы с управлением представлена на рисунке 4.

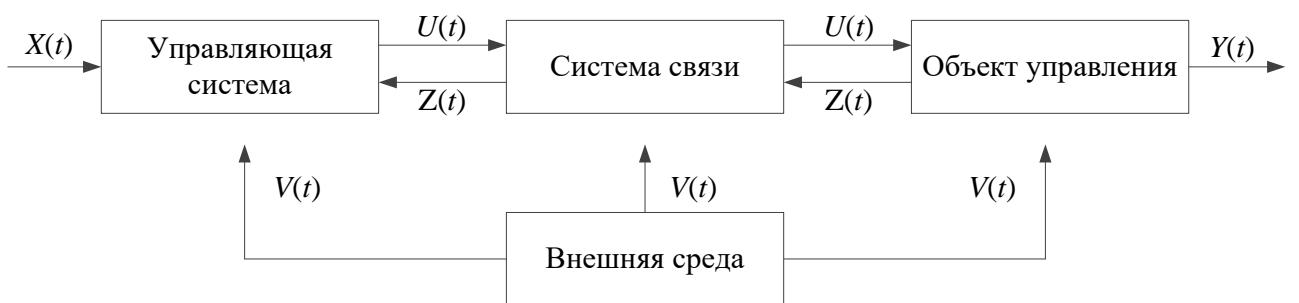


Рисунок 4 – Типовая схема системы с управлением

Современная схема систем с управлением (рисунок 5) предполагает наличие средств поддержки принятия решений (СППР), которая адаптирует контур

управления к воздействию факторов внешней среды, носящих случайный характер, нарушающих законы управления объектом.

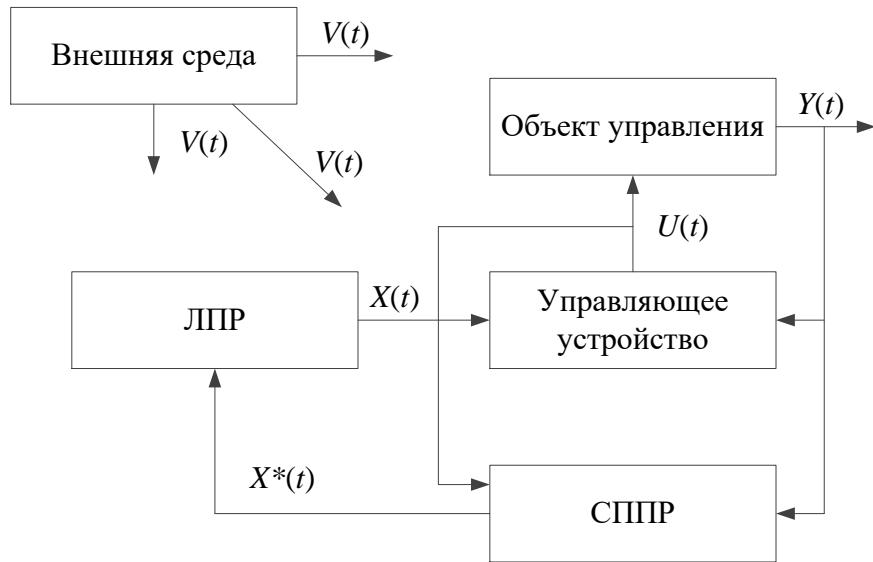


Рисунок 5 – Современная система с управлением со средствами поддержки принятия решений

Таким образом, рассмотрены ключевые элементы системы управления со средствами поддержки принятия решений и определены основные информационные потоки между ними.

1.3.2 Развитие методов поддержки принятия решений в системах контроля качества

Развитие методов поддержки принятия решений в системах контроля качества нашло отражение в работах Маркевича А. В., Микова А.Ю., Логуновой О. С., Гарбара Е. А., Игнатьева А. А., Гаврилова А. В., Фатхинуровой И. Ф., Смирнова В. А., Горбунова А. В. и др.

Так использование экспертной системы позволило повысить эффективность контроля динамического качества шлифовальных станков [24], применение информационной поддержки принятия решений при контроле качества продукции на основе онтологии показало положительный результат по обнаружению скрытых дефектов [25]. Разработка интеллектуальных систем поддержки принятия

решений осуществляется и для приемочного контроля бортовой аппаратуры летательных аппаратов [26]. Особо следует отметить широкое применение методов поддержки принятия решений при управлении качеством металлопроката [27-29].

Однако, не смотря на значительный вклад ученых, решение многих научных вопросов в данной области знаний по-прежнему актуально.

1.4 Особенности контроля качества листового металлопроката

1.4.1 Обзор дефектов холоднокатанных листов и полос

Согласно [30], дефектом называется каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям. Применительно к листовому металлопрокату дефекты можно классифицировать по ряду признаков [31, 32]:

1) по наличию правил, методов и средств выявления

- явные, для выявления которых предусмотрены правила, методы и средства, закрепленные в нормативной документации;
- скрытые, для которых не предусмотрены соответствующие правила и методы обнаружения;

2) по степени опасности

- критические, при наличии которых использование продукции по назначению невозможно или недопустимо;
- значительные, которые оказывают существенное влияние на использование продукции по назначению и ее долговечность;
- малозначительные, которые не оказывают существенного влияния на использование продукции по назначению и ее долговечность;

3) по возможности устранения

- устранимые дефекты, устранение которых технически возможно и экономически целесообразно;
- неустранимые дефекты, устранение которых технически невозможно и экономически нецелесообразно;

4) по стадии возникновения

- производственно-технические (металлургические), возникающие при прокатке;
- производственно-технологические, возникающие в процессе изготовления, сборки и ремонта;
- эксплуатационные, возникающие в процессе хранения, транспортировки и использования.

Описание основных дефектов поверхности листового проката [33-35] с указанием причин их возникновения [36, 37] приведено в таблице 1.

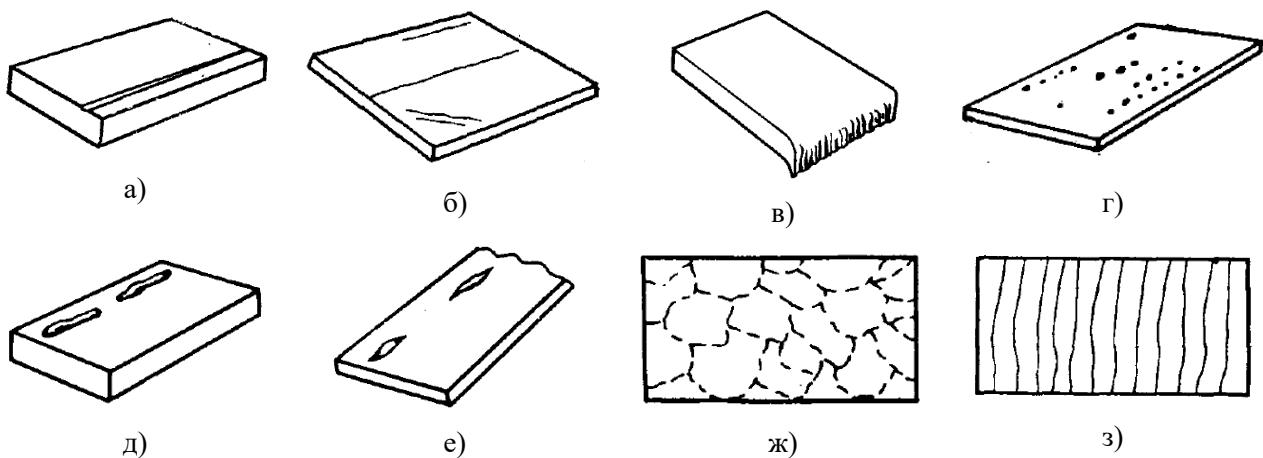
Таблица 1 – Дефекты поверхности листового проката

| Дефект | Описание | Причина образования |
|-----------|---|---|
| Риска | Механическое повреждение листа в виде канавки без выступа кромок. | Царапание поверхности изношенной прокатной арматурой. |
| Царапина | Углубление неправильной формы и произвольного направления. | Механическое повреждение выступающими частями оборудования, застрявшими обрывками металла. |
| Навар | Отпечатки на поверхности листа или полосы разной формы и размеров в виде пятен или продольных полос. | Налипание металлических частей на роликах. |
| Заусенец | Небольшой выступ металла по длине и ширине на кромках листов или полос под прямым углом к поверхности. | Попадание шлака на поверхность листа; неправильная настройка раствора валков. |
| Накол | Механические повреждения на поверхности полос или листов в виде мелких острых углублений, отпечатков или рисок. | Попадание на полосу мелких металлических или инородных частиц от тянувших роликов при заправке. |
| Отпечатки | Углубления или выступы, расположенные по всей поверхности или на отдельных ее участках. | Выступы и углубления на прокатных валках или роликах. |

Продолжение таблицы 1

| Дефект | Описание | Причина образования |
|-----------------------|---|--|
| Раскатанные отпечатки | Светлые пятна или матовые полоски. | Отпечатки, раковины-вдавы, продиры подката. |
| Сетка отпечатков | Периодически повторяющиеся, имеющие форму сетки выступы. | Вдавливание прокатываемого листа или ленты в трещины изношенных валков. |
| Полосы нагартовки | Параллельные светлые полосы, расположенные поперек направления прокатки. | Повышенная неравномерность деформации, обусловленная автоколебаниями валков. |
| Матовая поверхность | Отсутствие глянца на поверхности холоднокатанных и полированных листов и лент. | Неравномерная выработка поверхности валков. |
| Прокатная пленка | Отслоение металла языкообразной формы, которое соединено с поверхностью одной стороной. | Раскатка рванин, подрезов, сильная выработка валков. |

Схематичные изображения дефектов представлены на рисунке 6.



а) – риска; б) – царапина; в) – заусенец; г) – накол; д) – отпечатки;
е) – раскатанные отпечатки; ж) – сетка отпечатков; з) – полосы нагартовки

Рисунок 6 – Дефекты поверхности листового проката

К наиболее часто встречающимся дефектам поверхности листового проката цветных металлов относятся «царапина», «риска», «отпечатки» (рисунок 7).



Рисунок 7 – Дефекты поверхности листового проката цветных металлов

Таким образом, выполнен обзор дефектов холоднокатанных листов и полос, определены причины их образования, выявлены наиболее часто встречающиеся дефекты поверхности листового проката цветных металлов.

1.4.2 Анализ причин возникновения поверхностных дефектов листового проката

В большинстве случаев возникновение поверхностных дефектов проката обусловлено физико-механическими свойствами металла [38], влиянием эксплуатационных характеристик прокатного оборудования [39, 40] и человеческим фактором [41]. В результате прокатки происходит пластическая деформация металла, которая характеризует устойчивость деформируемого тела к разрушению и сопровождается остаточным изменением формы деформированного объема [42]. Значительное влияние на качество холоднокатаного листового проката оказывает и контактное взаимодействие с рабочими валками. В процессе прокатки валки подвергаются значительным воздействиям со стороны стана и прокатываемого металла, которые в конечном итоге приводят к выходу из строя оборудования. Выход из строя валков станов холодной прокатки может быть обусловлен разрушением поверхностного слоя рабочей части валка в результате контактной усталости, износом, производственными или эксплуатационными дефектами. При

этом основной причиной выхода валков из строя являются поверхностные дефекты рабочей части валка (рисунок 8) [43].

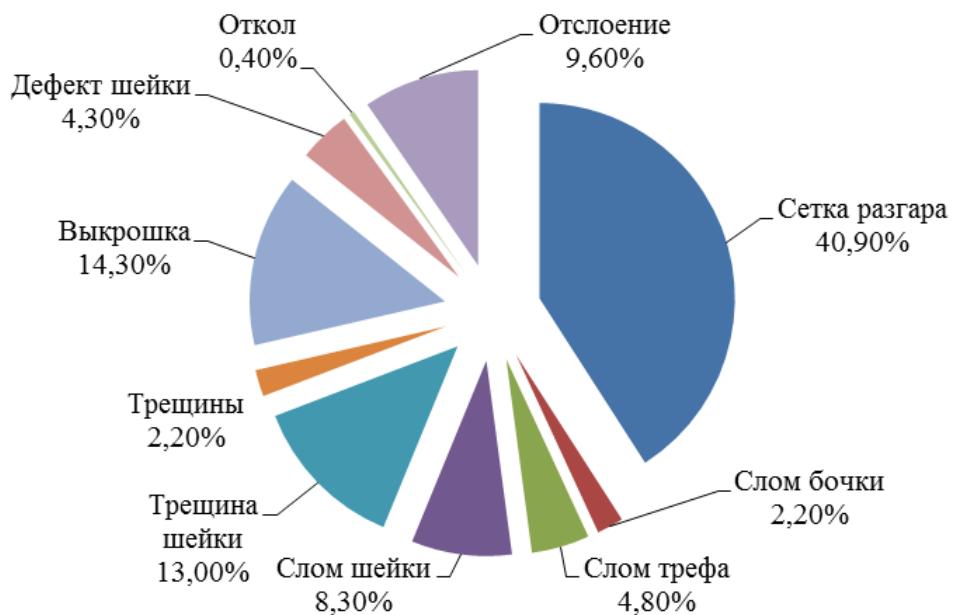


Рисунок 8 – Причины вывода из эксплуатации рабочих валков

Неудовлетворительное состояние рабочих валков приводит к возникновению таких поверхностных дефектов листового проката, как прокатная пленка, отпечатки, сетка отпечатков, полосы нагартовки и матовая поверхность. Ниже рассмотрены основные поверхностные дефекты рабочих валков станов холодной прокатки, возникающих в процессе эксплуатации.

Сетка трещин. Образуется в результате совместного действия внутренних и контактных напряжений, возникающих в процессе эксплуатации, и структурных превращений в результате прокатки. К появлению сетки трещин приводят навары, надавы, которые созданию местные концентрации напряжений.

Отслоение. Возникновение дефекта связано с образованием очагов усталостного разрушения. Причиной отслоения могут быть навары и надавы, способствующие появлению микротрещин, которые влекут за собой развитие очагов усталостных разрушений.

Лампас. Представляет собой полосу вдоль рабочей части валка в результате проскальзывания одного валка (рабочего) относительно другого (опорного).

Продольные и поперечные трещины. Трещины возникают в результате превышения максимально допустимых предельных давлений при прокатке и длительного пребывания под давлением.

Вмятина. Является следствием повышения местного (локального) давления в очаге деформации в результате образования складок полосы при обрывах, задаче и выдаче концов полосы из клетей.

Выкрашивание поверхности валка. Является результатом развития трещин.

Скол. Представляет собой выкрашивание поверхности валка более 6 мм.

Учитывая широту спектра дефектов рабочих валков прокатного стана, следует заключить, что своевременное выявление дефектов позволит выполнить оперативную настройку либо замену оборудования и избежать экономических потерь.

К факторам, влияющим на возникновение поверхностных дефектов листового проката, необходимо отнести и изменение требований заказчика к толщине готовой продукции: при переходе к тонколистовому прокату требуемая толщина ленты проката может не соответствовать проектным возможностям прокатного стана, что в значительной степени скажется на процессе прокатки и качестве поверхности проката.

Систематизируя вышеперечисленные причины возникновения дефектов, можно выделить следующие группы факторов, оказывающих влияние на качество поверхности листового проката в процессе холодной обработки металла давлением: качество заготовки $V_1(t)$, техническое состояние оборудования прокатного стана $V_2(t)$, человеческий фактор $V_3(t)$:

$$V(t) = (V_1(t), V_2(t), V_3(t)), \quad (1)$$

где $V(t)$ – комплексное влияние внешних факторов на процесс прокатки металла.

Таким образом, выполнена систематизация причин возникновения поверхностных дефектов листового металлопроката и выделены группы внешних факторов, оказывающих влияние на процесс холодной обработки металла давлением и способствующих образованию дефектов.

1.5 Основная проблема контроля качества поверхности листового металлопроката с использованием средств технического зрения

Согласно Указу Президента РФ от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года», обеспечение технологической независимости в области средств производства и автоматизации является одной из национальных целей развития Российской Федерации. Внедрение новых решений и модернизация на базе цифровых технологий существующих производственных процессов обусловлены как необходимостью повышения экономического потенциала, так и складывающейся геополитической обстановкой. Политика технологической независимости Российской Федерации [44] повысила актуальность разработки цифровых решений и их внедрения в различные отрасли промышленности [45, 46], в частности, в процесс производства листового металлопроката.

Использование листового проката цветных металлов в различных отраслях промышленности, в том числе высокотехнологичном и критически-важном производстве, способствовало тому, что современное состояние технологии производства листового металлопроката стало характеризоваться повышением требований к качеству готовой продукции при уменьшении толщины проката. В этих условиях значительно возросло воздействие на процесс холодной обработки металла давлением факторов внешней среды: случайного характера физико-механических свойств заготовки, технического состояния прокатного оборудования, влияния человеческого фактора. Все это определило положительную динамику роста поверхностных дефектов проката. В настоящее время сложилась система методов, моделей и средств обеспечения качества поверхности листового металлопроката, разработаны общеметодологические принципы их использования, которые позволяют решать задачу идентификации поверхностных дефектов проката с помощью ОЭСКК. Часть дефектов проката можно устраниć в процессе производства посредством корректировки исходных технологических параметров при реверсивном режиме прокатки. Однако задача изменения параметров полно-

стью возлагается на оператора прокатного стана, работающего в условиях дефицита времени, и требует системного анализа влияния факторов воздействия внешней среды. Это способствует увеличению прогонов и, как следствие, приводит к снижению производительности прокатного стана.

Анализ требований практики и состояния теории [47] процесса холодной обработки металла давлением с применением ОЭСКК поверхности листовых материалов показал, что существует проблема между динамикой роста поверхностных дефектов листового металлопроката под воздействием внешних факторов и отсутствием в ОЭСКК СППР по устранению выявленных дефектов (рисунок 9). Для устранения выявленной проблемы необходимо развитие знаний в области поддержки принятия решений по изменению задающих технологических параметров прокатки.

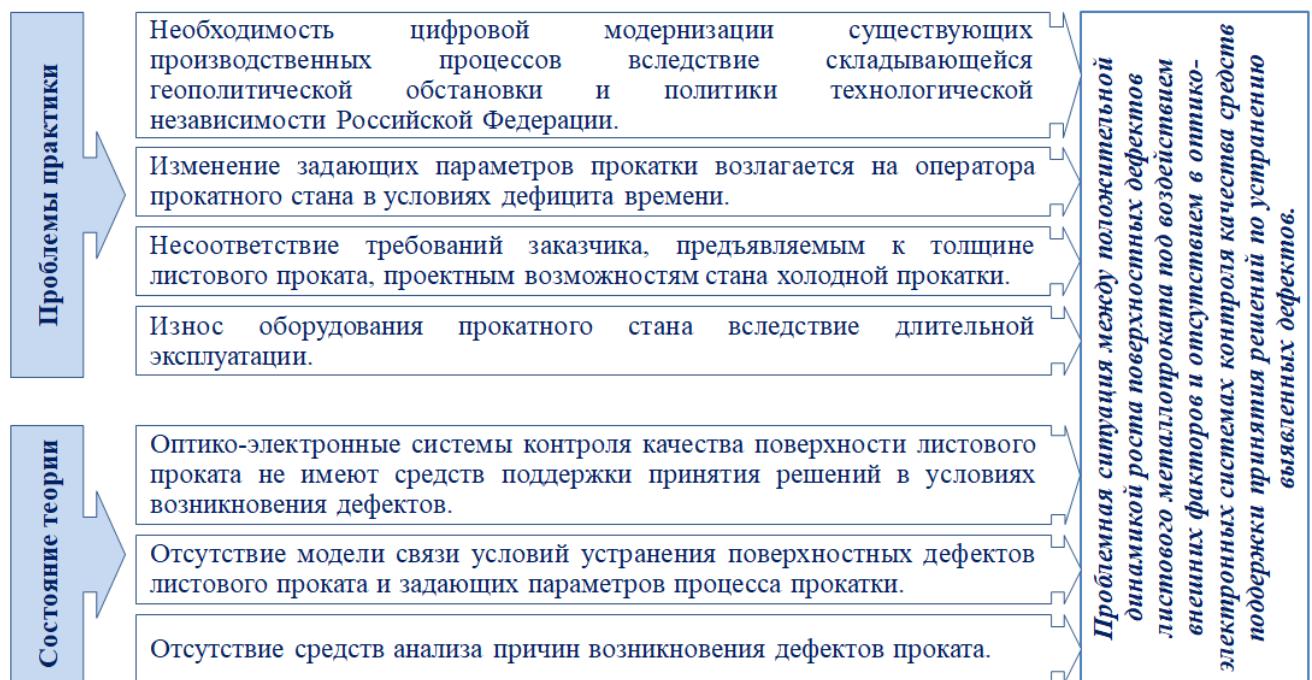


Рисунок 9 – Обоснование проблемной ситуации оптико-электронного контроля качества холодной обработки металлов давлением

Таким образом, выявлена основная проблема контроля качества поверхности листовых материалов с применением средств технического зрения в области холодной обработки металла давлением и определены пути ее решения.

1.6 Цель исследования и гипотеза ее достижения

С целью разрешения выявленной проблемной ситуации выдвинута гипотеза, согласно которой внедрение СППР по устранению поверхностных дефектов (рисунок 9), возникающих в результате воздействия внешних факторов (1), позволит повысить эффективность ОЭСКК поверхности листовых материалов в области холодной обработки металла давлением.

В соответствии с гипотезой разработана концептуальная модель поддержки принятия решений по устранению дефектов поверхности листового металлопроката. Модель представлена в графической нотации IDEF0 [48] на рисунках 10-11.

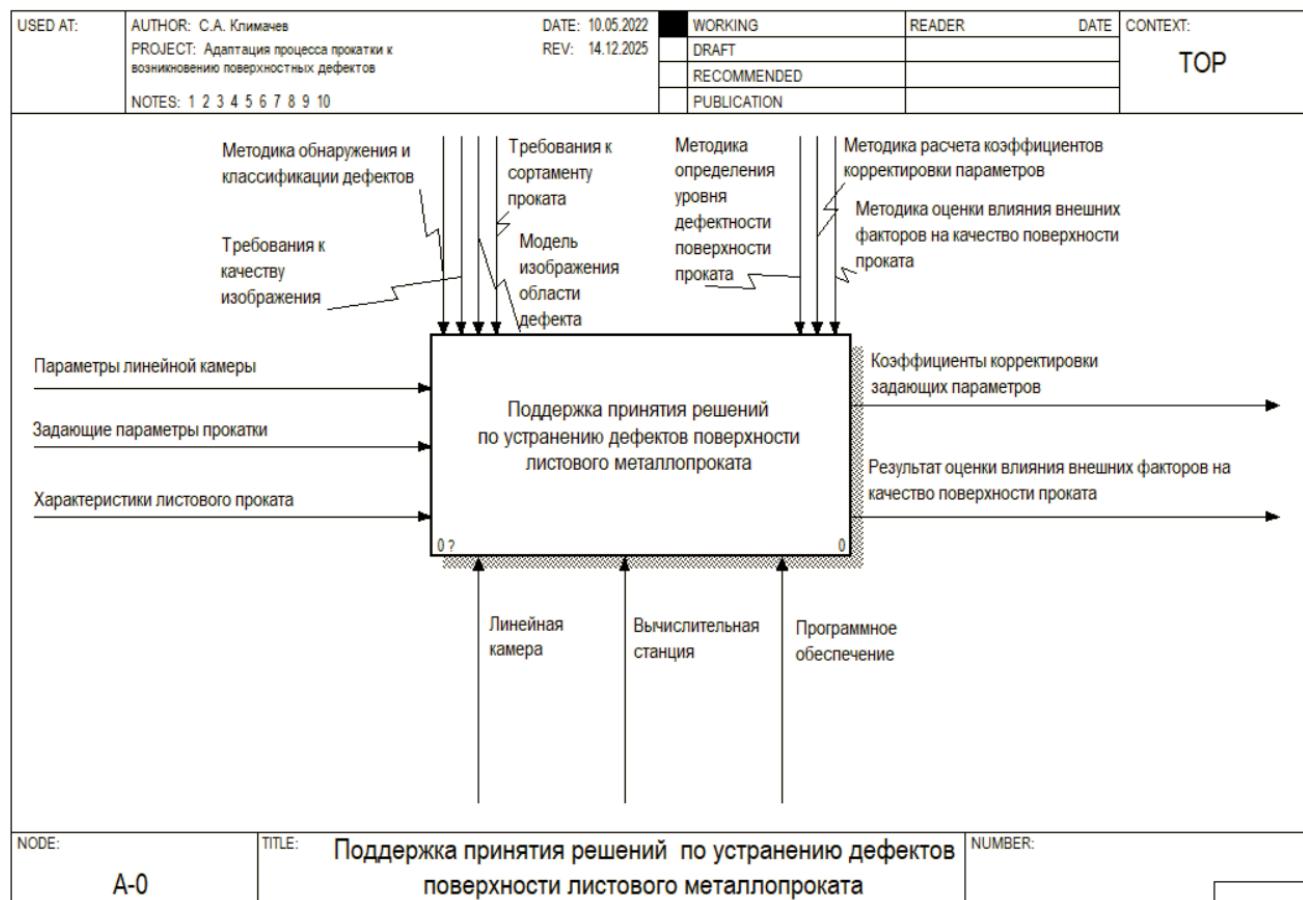


Рисунок 10 – Концептуальная модель поддержки принятия решений

Используя ресурсы программно-аппаратного обеспечения и средств технического зрения, на основе характеристик листового проката и значений задающих параметров прокатки модель позволяет выполнять подбор коэффициентов кор-

ректировки задающих параметров и оценку влияния внешних факторов на качество поверхности проката.

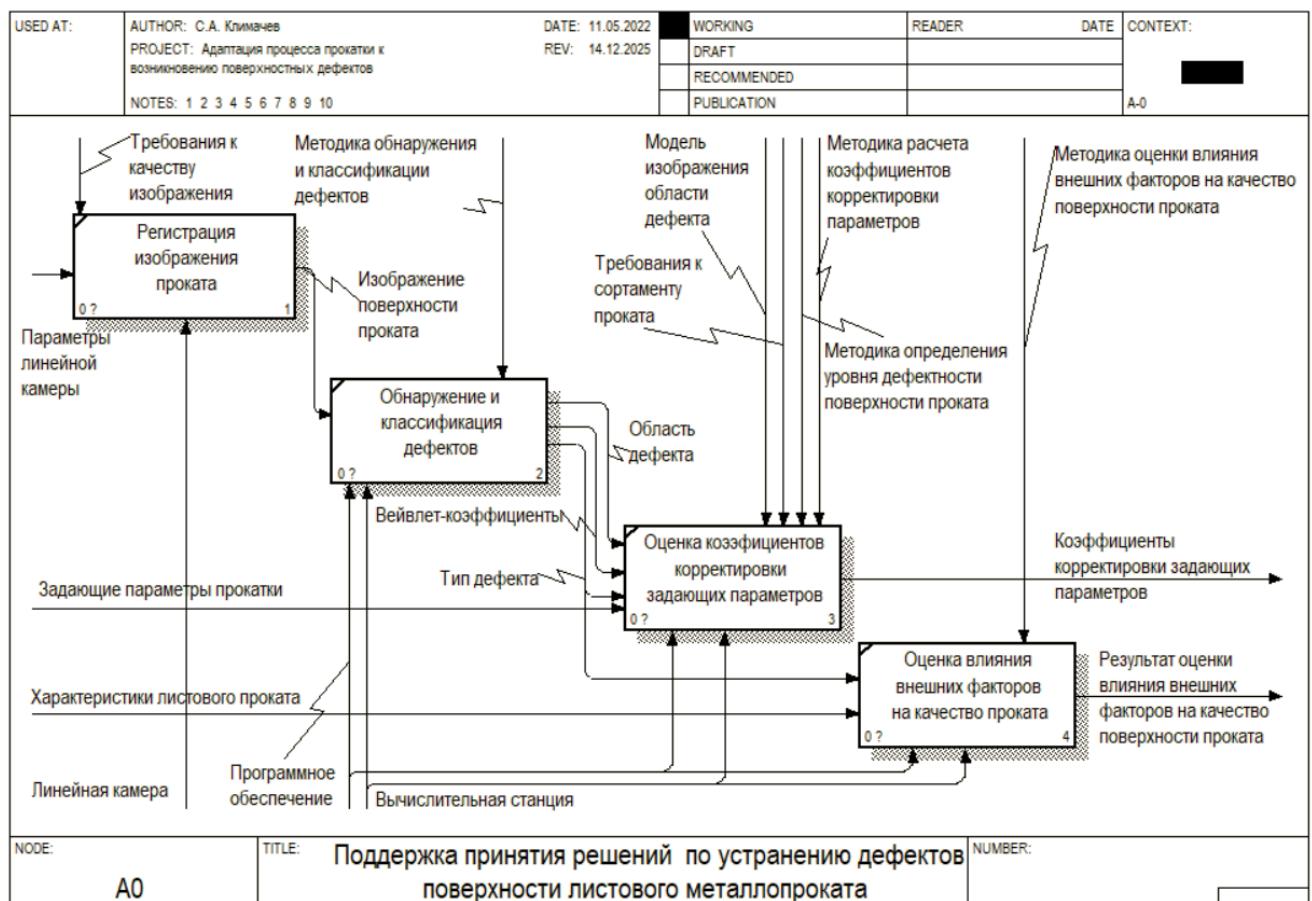


Рисунок 11 – Декомпозиция концептуальной модели поддержки принятия решений

Процессы «Регистрация изображения проката», «Обнаружение и классификация дефектов» уже существуют в рамках автоматизированного контроля качества прокатной продукции с применением ОЭСКК. Процессы «Оценка коэффициентов корректировки задающих параметров», «Оценка влияния факторов на качество проката» относятся к разрабатываемым средствам поддержки принятия решений. Процесс «Оценка коэффициентов корректировки задающих параметров» включает процессы второго уровня: «Формирование модельного описания области дефекта», «Оценка уровня дефектности», «Расчет коэффициентов корректировки задающих параметров» (рисунок 12).

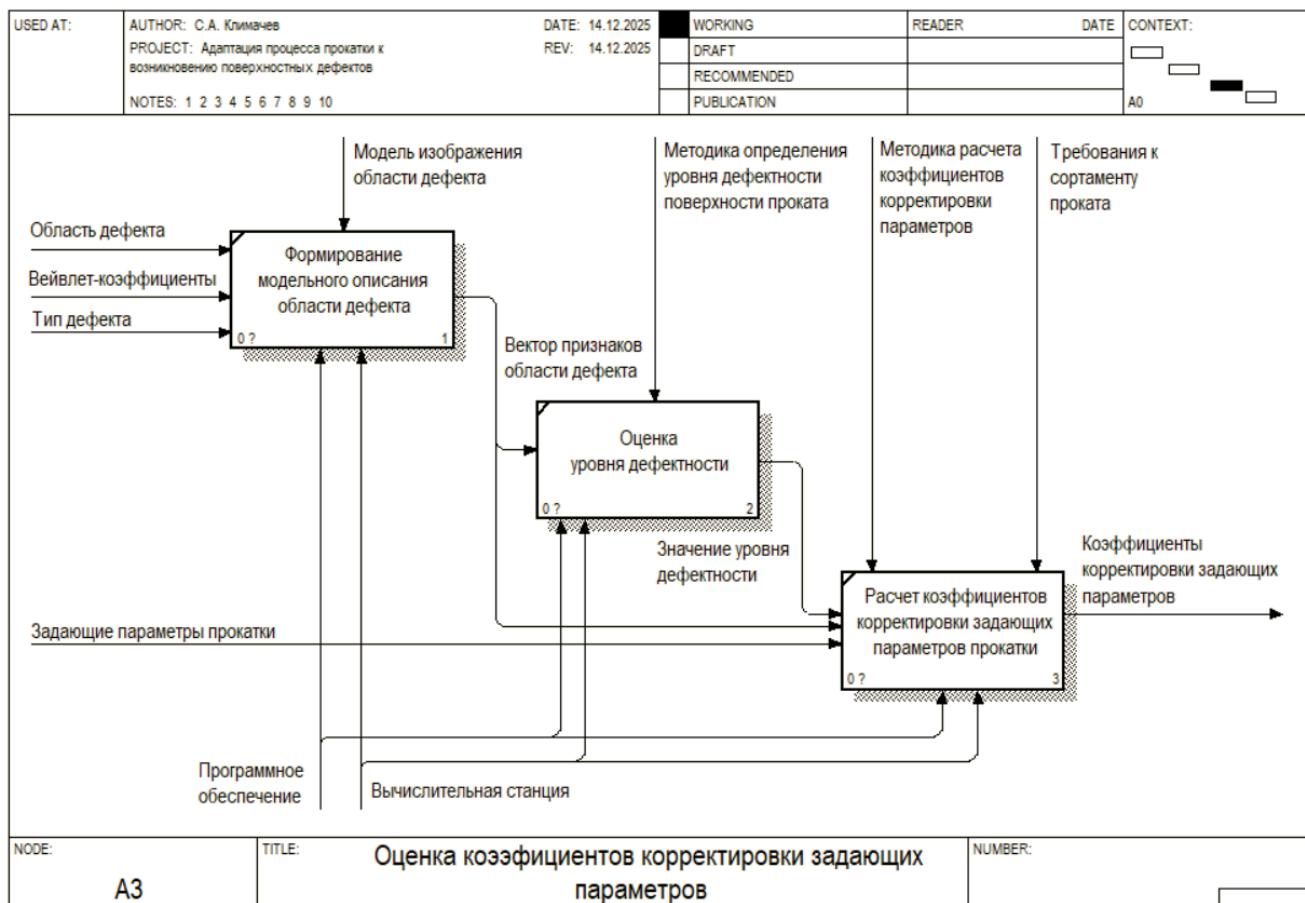


Рисунок 12 – Модель оценки коэффициентов корректировки задающих параметров прокатки

Процесс «Оценка влияния факторов на качество проката» состоит из процессов «Формирование начальных матриц расчета», «Сравнительный анализ факторов воздействия», «Расчет оценки влияния факторов» (рисунок 13).

На основе информации о типе дефекта и характеристиках листового проката модель осуществляет оценку влияния внешних факторов на возникновение обнаруженного дефекта. Комплексное влияние факторов принимается за 100%. Модель оценивает долевой вклад каждого из факторов – качества заготовки, технического состояния оборудования прокатного стана, человеческого фактора – в общее значение.

В соответствии с моделью поддержки принятия решений разработана схема совершенствования контура управления технической системой с ОЭСКК на основе внедрения СППР (рисунок 14).

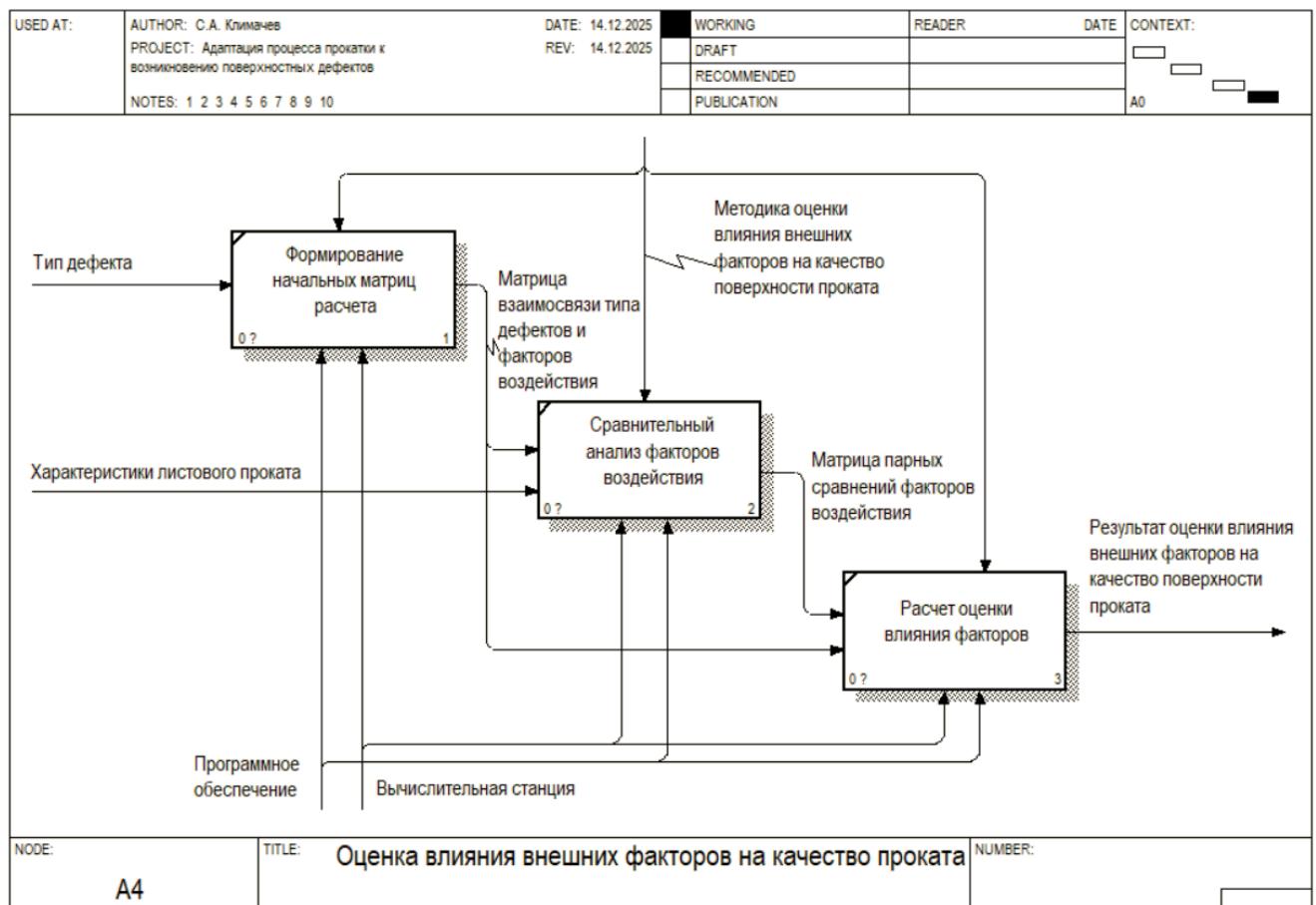


Рисунок 13 – Модель оценки влияния внешних факторов на качество проката

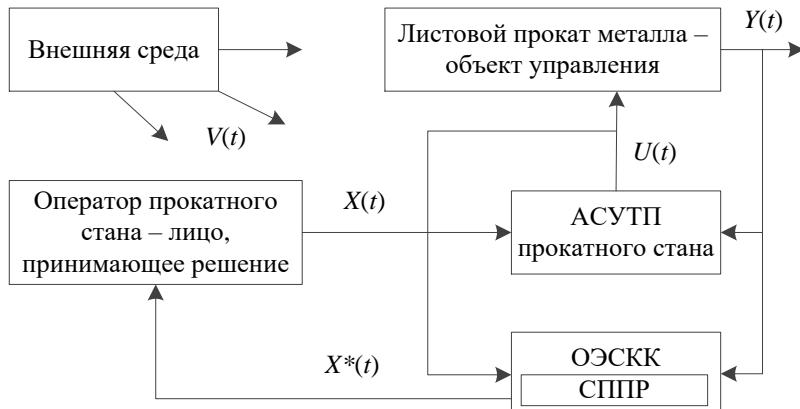


Рисунок 14 – Схема совершенствования контура управления технической системой с ОЭСКК

Схема реализации концептуальной модели представлена на рисунке 15. ОЭСКК регистрирует изображения $I(x,y)$ листового проката, на основе которых выполняется оценка данных о показателях Y_j качества поверхности. В слу-

чае отличия Y_j от модельного представления Y^* выполняется построение набора альтернатив A_i по формированию воздействия $U(t)$ на объект управления, из которого ЛПР рекомендуются наилучшие варианты в соответствии с критерием выбора $K(a_i)$. При этом воздействие $U(t)$, рекомендованное с учетом влияния внешних факторов (1), будет приближать значения показателей качества поверхности проката к наилучшим (квазиоптимальным).

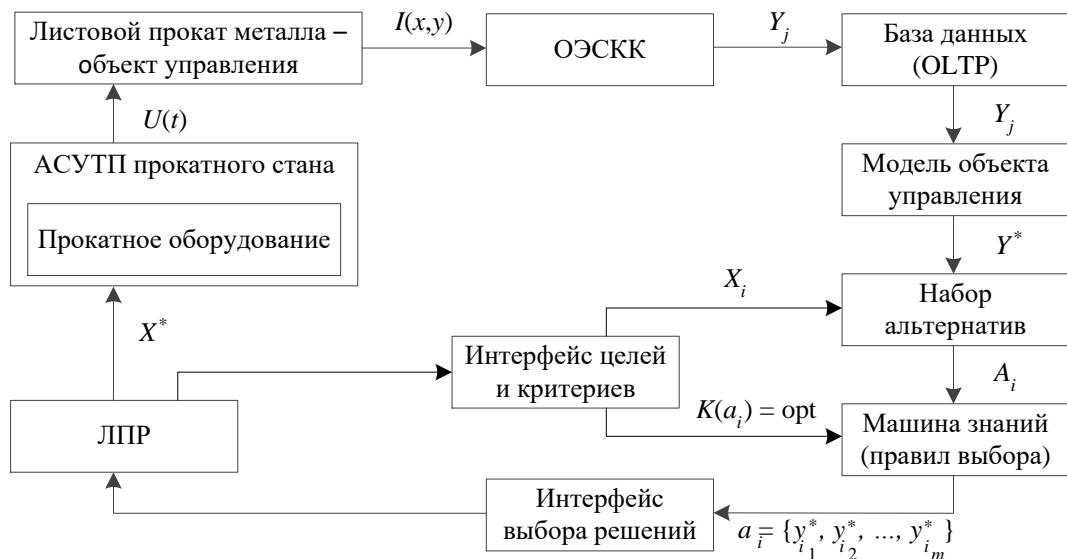


Рисунок 15 – Схема реализации модели поддержки принятия решений

На основе разработанных инструментальных средств [49, 50] исследования закономерностей устранения поверхностных дефектов листового металлопроката выполнено научное обоснование гипотезы.

Таким образом, решена задача № 1, разработана концептуальная модель принятия решений по устранению дефектов поверхности листового металлопроката на основе контура управления технической системой с ОЭСКК, отличающаяся наличием научно-обоснованной взаимосвязи технологических параметров холдной обработки металла давлением с показателями качества поверхности листового проката в условиях воздействия внешней среды (п. 2, п. 3).

Выводы по первой главе

Рассмотрена структура ОЭСКК, ее характеристики и используемая модель представления изображений поверхности проката. На основе системного анализа существующих устройств, программно-аппаратных комплексов оптического контроля поверхности листового металлопроката и разработок методов поддержки принятия решений в системах контроля качества доказана актуальность проводимого исследования. Выделены факторы внешней среды, оказывающие влияние на качество поверхности листового металлопроката в процессе прокатки. Определена основная проблема контроля качества листового металлопроката с использованием средств технического зрения и выдвинута научно-обоснованная гипотеза ее решения. Разработана концептуальная модель поддержки принятия решений по устранению дефектов поверхности листового металлопроката на основе контура управления технической системой с ОЭСКК и схема ее реализации.

2 Разработка методики поддержки принятия решений по устранению дефектов поверхности листового материала при холодной обработке металла давлением

Значительный вклад в развитие моделей, методов и алгоритмов анализа процесса прокатки и качества поверхности листового металла внесли И. П. Мазур, А. А. Казаков, О. С. Логунова, М. И. Румянцев, Д. А. Тищенко и другие ученые. Развитие теории и практики контроля качества поверхности металлопроката также нашло отражение в работах Д. П. Бугаева, М. И. Кузьмина, Е. А. Гарбара, А. И. Гайдара. В настоящее время вопрос распознавания поверхностных дефектов листового проката остается актуальным и освещается в исследованиях как отечественных, так и зарубежных ученых. Так, алгоритмы, основанные на сопоставлении геометрических признаков [51], позволяют повысить точность распознавания ряда классов дефектов до 85%. Заслуживают внимания методы распознавания дефектов листовых материалов, использующие нечеткую логику. В [52] подобный подход показал приемлемый результат для 82% анализируемых изображений. Высокой достоверностью распознавания характеризуются методы глубокого нейросетевого анализа. Исследования [53-55] различных архитектур сверточного слоя нейронной сети показали успешное распознавание дефектов проката, близкое к 90% случаев. Отдельно следует отметить использование систем интеллектуальной поддержки принятия решений для выявления поверхностных дефектов проката, в основе которых лежат алгоритмы нейронечеткой классификации [56]. Достигнутые учеными результаты позволили повысить точность распознавания ряда дефектов, однако вопрос определения причин возникновения дефектов и выработки рекомендаций по возможному их устранению, несмотря на существующие попытки решения данной проблемы, по-прежнему остается открытым. Так в исследовании [18] рассматривается подход к регулированию параметров процесса прокатки, основанный на анализе частоты возникновения дефектов. Однако алгоритм корректировки не анализирует в полной мере условия возникновения дефектов.

та и выполнение задания по количеству реверсных прогонов. Повышение качества проката на основе анализа исторических данных по изменению параметров процесса прокатки предлагается в [57]. Преимуществом решения является выработка рекомендаций по корректировке параметров с целью адаптации технологического процесса к условиям в каждой конкретной ситуации. Но при этом в исследовании не анализируются типы возникающих дефектов, которые также оказывают влияние на настройку параметров. Предлагаемое в данной работе решение позволяет избежать указанных недостатков.

2.1 Модель изображения области дефекта

2.1.1 Описание модели изображения области дефекта

В настоящее время существуют различные подходы к модельному представлению цифровых изображений. Так, в [58] предлагается фрактальное описание изображения на основе систем итерируемых функций. Согласно данному подходу, изображение разбивается на множество неперекрывающихся ранговых блоков и множество перекрывающихся доменных блоков. Для каждого рангового блока подбирается доменный блок и соответствующее сжимающее отображение, переводящее доменный блок в ранговый. Однако данный метод позволяет получить только грубое фрактальное представление изображения, не учитывающее мелкие детали.

В [59] для представления изображения используется обобщенная графовая модель и ее расширения. В качестве вершин графа выступают пиксели анализируемого изображения.

Среди прочих можно также выделить модель изображения [60] с ассоциированным признаковым пространством на основе иерархического способа его разбиения и получения пирамиды интенсивностей участков изображения.

Рассмотренные подходы позволяют сформировать описание изображения области дефекта с целью его использования в задачах классификации, однако для

оценки качества поверхности листовых материалов они не подходят. Наиболее подходящим вариантом для решения задач исследования является модель области дефекта на основе пространства признаков изображения [61, 62]:

$$Y(t) = \{y_1, y_2, \dots, y_M\}(t).$$

Подобное описание области дефекта позволит учесть различные характеристики дефекта и использовать их при построении критерия уровня дефектности проката.

2.1.2 Пространство признаков изображения области дефекта

Каждое изображение области дефектов характеризуется некоторым набором глобальных и локальных признаков [63]. Глобальные признаки позволяют выделить на изображении дефект поверхности среди множества других объектов (бликов, пыли, пятен эмульсии и т.п.), а локальные используются для уточнения его положения. Формирование признакового пространства необходимо выполнять таким образом, чтобы признаки были наиболее независимы от яркостных и аффинных изменений исследуемых объектов, а так же позволяли оценить качество поверхности листовых материалов.

Выделяют три группы признаков изображения: геометрические, яркостные и текстурные (рисунок 16).

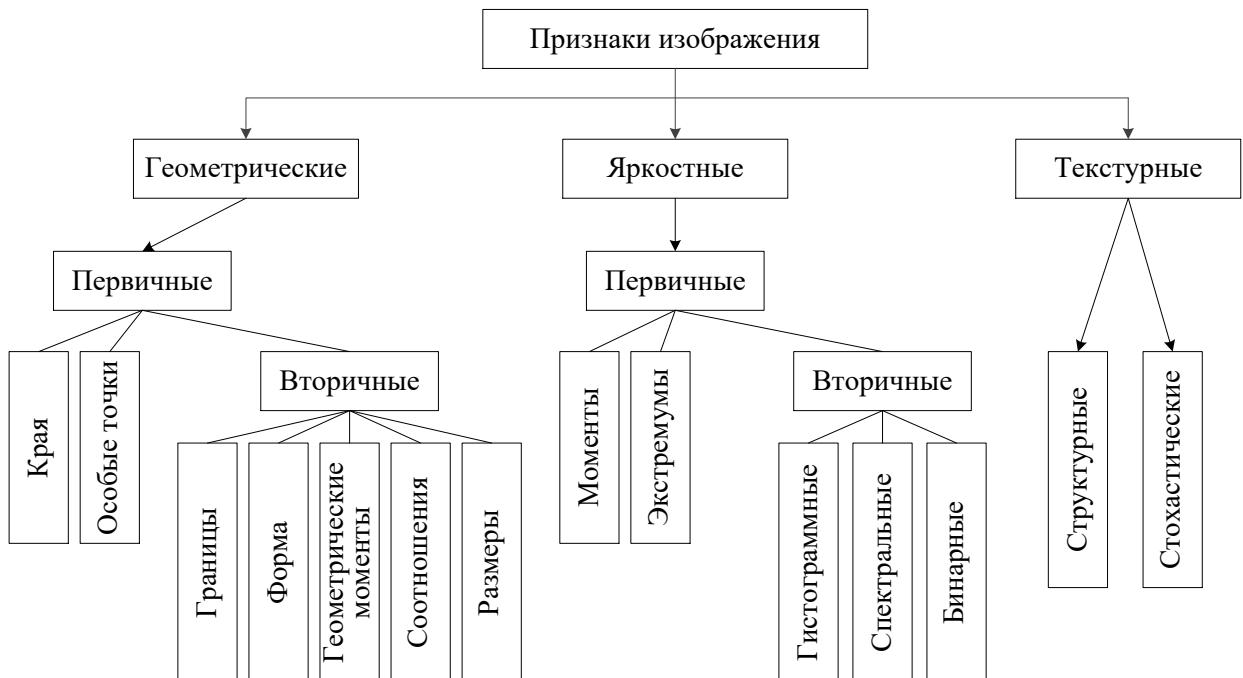


Рисунок 16 – Классификация признаков изображения

С целью сокращения времени вычисления признаков изображения области дефекта необходимо рассматривать только те из них, которые непосредственно характеризуют поверхностный дефект и не учитывают текстурную составляющую изображения, а для получения более точных результатов оценки качества поверхности – анализировать лишь вторичные признаки и признаки, имеющие более высокий порядок.

Анализ геометрических особенностей поверхностных дефектов листового проката металлов показал, что все множество вариаций форм дефектов представляет собой отклонения от граничных случаев – прямоугольной и круглой форм. Следовательно, в качестве геометрических признаков [64, 65] изображения необходимо и достаточно выбрать те из них, которые характеризуют свойства прямоугольности и округлости дефекта (таблица 2).

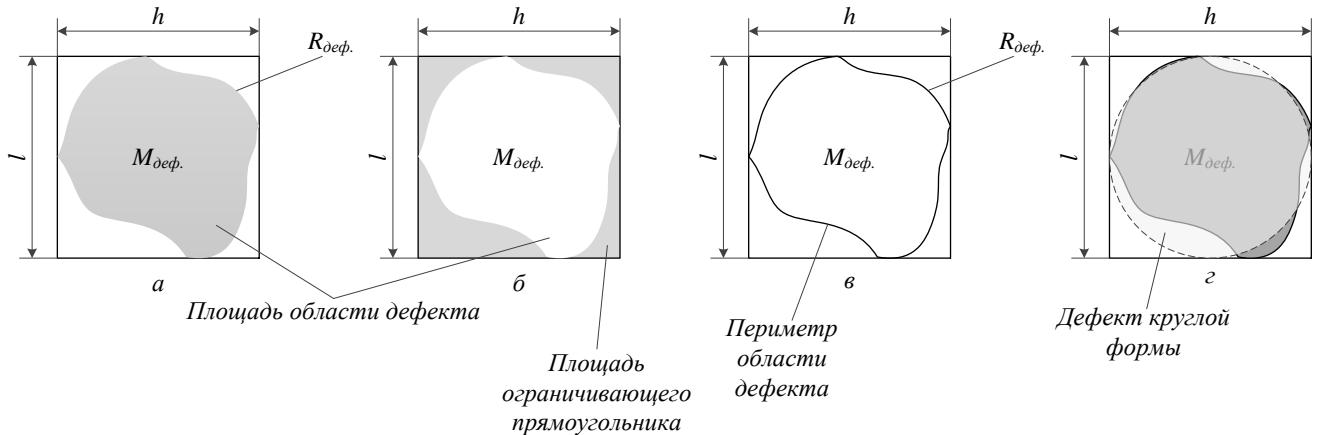
Таблица 2 – Геометрические признаки изображения

| Название | Обозначение | Описание |
|--------------------------|-------------------------------------|--|
| Длина области дефекта | l | Расстояние между вертикальными линиями, проведенными через крайнюю левую и крайнюю правую точки области дефекта. |
| Ширина области дефекта | h | Расстояние между горизонтальными линиями, проведенными через крайнюю нижнюю и крайнюю верхнюю точки области дефекта. |
| Периметр области дефекта | $P_m = \sum_{(x,y) \in R_{def.}} 1$ | Количество пикселей с координатами (x, y) , образующих границу $R_{def.}$ области дефекта. |
| Площадь области дефекта | $S_m = \sum_{(x,y) \in M_{def.}} 1$ | Количество пикселей с координатами (x, y) , принадлежащих области дефекта $M_{def.}$, включая границу $R_{def.}$. |
| Компактность дефекта | $Q_m = \frac{P_m^2}{S_m}$ | Величина, инвариантная к однородным изменениям масштаба и ориентации дефекта, вычисляемая на основе периметра и площади области дефекта. |

Продолжение таблицы 2

| Название | Обозначение | Описание |
|---|------------------------------------|---|
| Коэффициент заполнения области дефекта | $k_{зап.} = \frac{S_m}{h \cdot l}$ | Если форма дефекта приближена к квадрату, $k_{зап.}$ будет стремиться к единице, в случае окружной формы – к $\frac{\pi}{4}$. |
| Коэффициент округлости дефекта | $k_{окр.} = \frac{P^2}{4\pi S_m}$ | $k_{окр.} = 1$, если дефект круглый, для остальных случаев – больше единицы. |
| Коэффициент прямоугольности области дефекта | $k_{прям.} = \frac{l}{h}$ | При $k_{прям.} = 1$ дефект имеет окружную или квадратную форму, $k_{прям.} > 1$ – дефект вытянут горизонтально, $k_{прям.} < 1$ – дефект вытянут вертикально. |
| Коэффициент отношения периметров | $k_{неп.} = \frac{P_m}{P_{прям.}}$ | Коэффициент отношения периметра области дефекта P_m к периметру прямоугольника $P_{прям.}$, описанного вокруг области дефекта. |

Графическое представление признаков отражено на рисунке 17.



- а) площадь области дефекта;
- б) коэффициент заполнения области дефекта;
- в) периметр области дефекта;
- г) коэффициент окружности дефекта

Рисунок 17 – Геометрические признаки дефекта

Группа яркостных признаков (таблица 3) характеризует изменения локальной энергии изображения поверхности листового металлоконструкции, т.е. перепады в уровнях яркостей относительно равномерного фона и границы дефекта. Из дан-

ной группы выбраны гистограммные [65] и спектральные [66, 67] признаки. Гистограммные признаки позволяют оценить распределение яркости изображения. Спектральные признаки определяются на основе матрицы вейвлет-коэффициентов $W_{z(\phi)}^i$, описывающих изображение поверхности проката в существующей ОЭСКК.

Таблица 3 – Яркостные признаки изображения

| Название | Обозначение |
|---|--|
| Гистограммные признаки | |
| Среднее значение яркости в области дефекта | $m_I = \frac{1}{S_m} \sum_{(x,y) \in M_{\text{деф.}}} I(x,y)$ |
| Среднеквадратичное отклонение яркости в области дефекта | $\sigma_I = \sqrt{\frac{1}{S_m} \sum_{(x,y) \in M_{\text{деф.}}} (I(x,y) - m_I)^2}$ |
| Спектральные признаки | |
| Средние значения вейвлет-коэффициентов области дефекта | $mw_z^i = \frac{1}{S_m^i} \sum_{(x,y) \in M_{\text{деф.}}} W_{z(\phi)}^i(x,y),$ где S_m^i – площадь дефекта на i -м уровне вейвлет-преобразования |
| Среднеквадратичные отклонения вейвлет-коэффициентов области дефекта | $\sigma w_z^i = \sqrt{\frac{1}{S_m^i} \sum_{(x,y) \in M_{\text{деф.}}} (W_{z(\phi)}^i(x,y) - mw_z^i)^2},$ где S_m^i – площадь дефекта на i -м уровне вейвлет-преобразования |

С учетом сформированного пространства признаков, модель изображения области дефекта, удовлетворяющую задаче оценки качества поверхности листового проката металлов, можно определить в виде набора геометрических и яркостных признаков:

$$Y(t) = \{l, h, P_m, S_m, Q_m, k_{\text{зан.}}, k_{\text{окр.}}, k_{\text{прям.}}, k_{\text{непр.}}, m_I, \sigma_I, mw_z^i, \sigma w_z^i\}(t). \quad (2)$$

Данная модель отличается от [61, 62] расширенным набором признаков, учитывающих пространственно-геометрические характеристики дефекта, и определяет признаки качества продукции.

Таким образом, выполнен анализ моделей изображения области дефекта, разработана модель на основе набора геометрических и яркостных признаков изображения, отличающаяся расширенным набором пространственно-геометрических характеристик дефекта и определяющая признаки качества поверхности листового металлопроката.

2.2 Оценка качества поверхности листового материала

Для оценки качества поверхности листового материала предлагается использовать критерий уровня дефектности, рассчитываемый на основе модели изображения области дефекта (2).

Пусть $Y^{(\mathcal{D})} = \{l, h, P_m, S_m, Q_m, k_{зан.}, k_{окр.}, k_{прям.}, k_{неп.}, m_I, \sigma_I, mw_z^i, \sigma w_z^i\}^{(\mathcal{D})}$ – модель изображения эталонной поверхности листа проката, на которой отсутствуют дефекты, и $Y^{(\mathcal{D})} = \{l, h, P_m, S_m, Q_m, k_{зан.}, k_{окр.}, k_{прям.}, k_{неп.}, m_I, \sigma_I, mw_z^i, \sigma w_z^i\}^{(\mathcal{D})}$ – модель области дефекта, который был выявлен ОЭСКК. Тогда отношения $\frac{Y^{(\mathcal{D})}}{Y^{(\mathcal{D})}}$ и $\frac{Y^{(\mathcal{D})}}{Y^{(\mathcal{D})}}$ будут определять координаты начала и конца вектора в n -мерном векторном пространстве, модуль которого будет характеризовать уровень дефектности некоторой области проката и ее отличие от эталонного состояния, выраженное числовым значением.

Таким образом, оценка уровня дефектности $L^{d_k}(Y)$ по типу дефекта d_k будет определяться зависимостью:

$$L^{d_k}(Y) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\sqrt{\sum_{i=1}^M \left(\frac{y_{ij}^{(\mathcal{D})}}{y_i^{(\mathcal{D})}} - 1 \right)^2} \right), \quad (3)$$

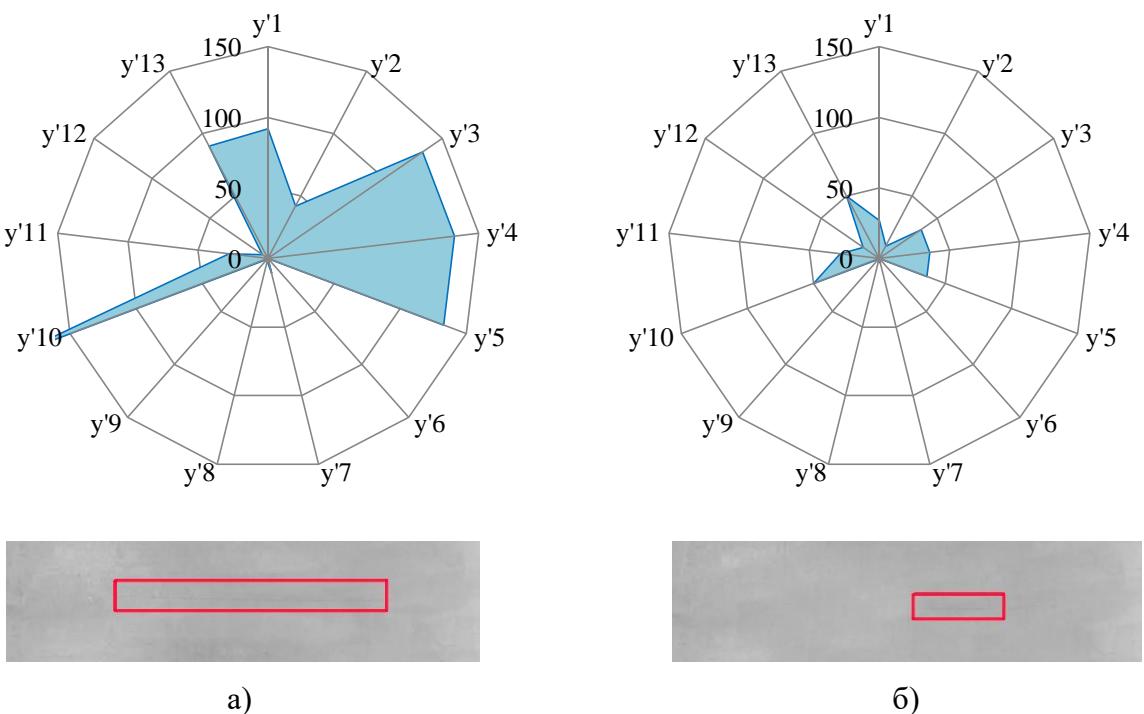
где $y_{ij}^{(\mathcal{D})}$ – значение i -го признака j -ой области дефекта типа d_k , $y_i^{(\mathcal{D})}$ – значение i -го признака модели изображения эталонной поверхности листа, M – количество признаков модели области дефекта, N – количество областей дефекта типа d_k .

Обобщенная оценка уровня дефектности листового материала примет вид:

$$L(Y) = \frac{1}{K \cdot N} \sum_{k=1}^K c_k \sum_{j=1}^N \left(\sqrt{\sum_{i=1}^M \left(\frac{y_{ij}^{(D)}}{y_i^{(\Theta)}} - 1 \right)^2} \right), \quad (4)$$

где K – число типов дефектов, выявленных ОЭСКК, c_k – коэффициент критичности типа дефекта.

Лепестковая диаграмма, каждая ось которой соответствует величине $y'_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{y_{ij}^{(D)}}{y_i^{(\Theta)}} - 1 \right)$, позволяет проанализировать уровень дефектности в разрезе каждого из показателей качества проката y_i . При этом уменьшение уровня дефектности будет сопровождаться стремлением значений y'_i к началу координат (рисунок 18).



а) исходные значения y'_i ; б) изменения y'_i при уменьшении уровня дефектности;

Рисунок 18 – Изменение уровня дефектности для типа дефекта «царапина»

На основе анализа изображений поверхности листового металлопроката были исследованы значения уровня дефектности для типов дефектов «царапина», «отпечатки», «риска» (таблица 4).

Таблица 4 – Оценки значений уровня дефектности

| Тип дефекта | Уровень дефектности | | | |
|-------------|---------------------|----------|------------------|-------------------------------|
| | Минимум | Максимум | Среднее значение | Среднеквадратичное отклонение |
| Царапина | 207 | 2720 | 867 | 572 |
| Отпечатки | 978 | 20140 | 5819 | 3662 |
| Риска | 653 | 11581 | 2350 | 1544 |

Область определения значений уровня дефектности представлена на рисунке 19. Наибольшие значения уровень дефектности принимает в случае типа дефекта «отпечатки».

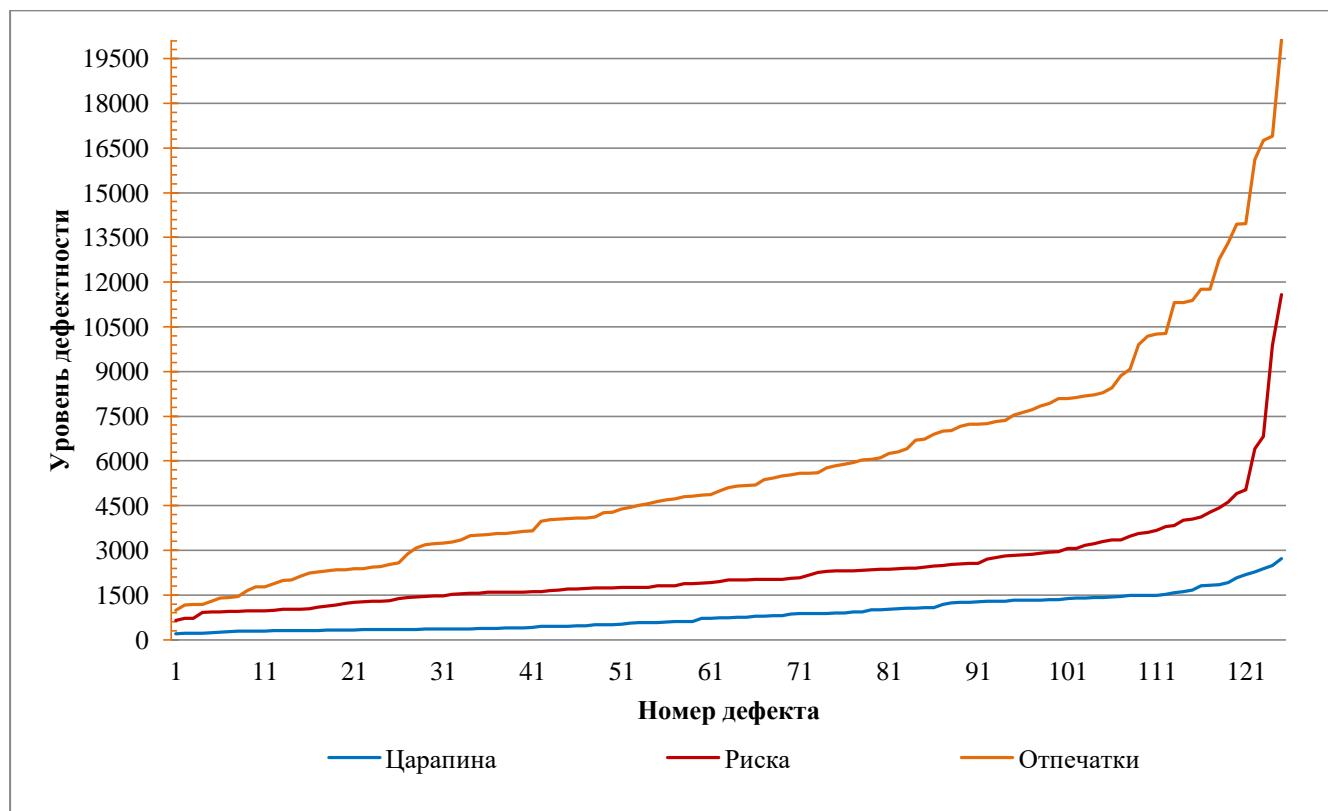


Рисунок 19 – Области значений уровня дефектности

Полученные результаты показывают, что области значений уровня дефектности для рассмотренных типов дефектов имеют пересечения друг с другом (рисунок 20). Наибольшее перекрытие наблюдается у типов дефектов «риска» и «отпечатки».

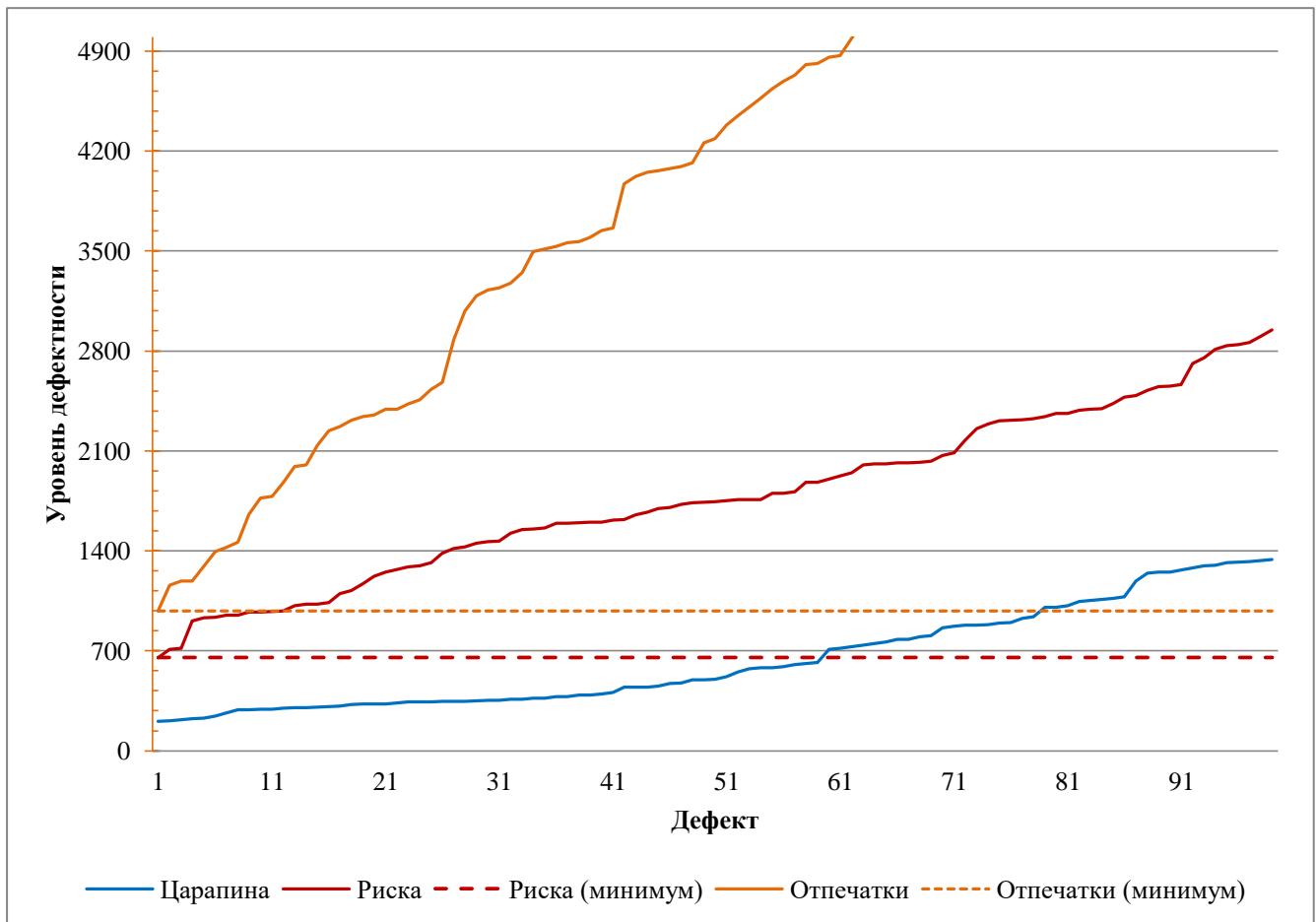


Рисунок 20 – Пересечение областей значений уровня дефектности

Посредством метода k -средних кластерного анализа выделено 12 кластеров значений уровней дефектности. Оценочные характеристики кластеров представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Оценки кластеров значений уровня дефектности

| Кластер | Уровень дефектности | | | |
|---------|---------------------|----------|------------------|-------------------------------|
| | Минимум | Максимум | Среднее значение | Среднеквадратичное отклонение |
| 1 | 9072 | 6698 | 7644 | 652 |
| 2 | 6409 | 4622 | 5429 | 560 |
| 3 | 4571 | 3174 | 3783 | 418 |
| 4 | 3081 | 2243 | 2542 | 250 |
| 5 | 2187 | 1669 | 1889 | 145 |
| 6 | 13328 | 9887 | 11208 | 1079 |
| 7 | 1657 | 1243 | 1431 | 124 |

Продолжение таблицы 5

| Кластер | Уровень дефектности | | | |
|---------|---------------------|----------|------------------|-------------------------------|
| | Минимум | Максимум | Среднее значение | Среднеквадратичное отклонение |
| 8 | 1223 | 926 | 1041 | 88 |
| 9 | 910 | 709 | 804 | 73 |
| 10 | 653 | 444 | 532 | 68 |
| 11 | 409 | 207 | 321 | 53 |
| 12 | 20140 | 13940 | 16303 | 2295 |

Процентное распределение значений уровня дефектности в разрезе типов дефектов отражено в таблице 6. Выделяются как кластеры, характеризующие различные типы дефектов, так и определяющие значения уровня дефектности преимущественного одного типа дефекта.

Таблица 6 – Распределение значений уровня дефектности

| Кластер | Процентное соотношение | | | |
|---------|------------------------|----------|-----------|-------|
| | Доля от всего | Царапина | Отпечатки | Риска |
| 1 | 7 | 96 | 0 | 4 |
| 2 | 9 | 0 | 88 | 12 |
| 3 | 11 | 0 | 62 | 38 |
| 4 | 13 | 6 | 28 | 66 |
| 5 | 11 | 17 | 14 | 69 |
| 6 | 3 | 0 | 85 | 15 |
| 7 | 15 | 49 | 9 | 42 |
| 8 | 8 | 35 | 13 | 52 |
| 9 | 5 | 85 | 0 | 15 |
| 10 | 5 | 95 | 0 | 5 |
| 11 | 11 | 100 | 0 | 0 |
| 12 | 2 | 0 | 100 | 0 |

Таким образом, для оценки качества поверхности листового материала дано определение критерия уровня дефектности, выполнен анализ значений критерия для типов дефектов «царапина», «отпечатки», «риска».

2.3 Модель изменения состояний поверхности листового материала в процессе прокатки

Пусть состояние поверхности листового проката в процессе холодной обработки металла давлением описывается последовательностью вида:

$$S_i(t) = \langle X, X^*, \bar{L}^{d_k}, W \rangle(t), \quad (5)$$

где X – задающие параметры прокатки, X^* – коэффициенты корректировки параметров относительно предыдущих значений, \bar{L}^{d_k} – вектор значений уровней дефектности поверхности листа по каждому выявленному типу дефекта, W – вектор оценок влияния внешних факторов (1) на качество поверхности листового проката.

$$X(t) = \langle h_{вых}, v_{вых} \rangle(t),$$

где $h_{вых}$ – задающее значение толщины ленты проката на выходе из клети, где $v_{вых}$ – задающее значение скорости прокатки на выходе из клети.

$$X^*(t) = \langle h^*, v^* \rangle(t), \quad (6)$$

где h^* – коэффициент изменения толщины ленты проката, равный отношению нового значения толщины h_{new} к предыдущему h_{prev} ; v^* – коэффициент изменения скорости прокатки на выходе из клети, равный отношению нового значения скорости v_{new} к предыдущему v_{prev} .

Переход из состояния $S_i(t)$ в $S_{i+1}(t)$ осуществляется вследствие коррекции задающих параметров прокатки $X(t)$ под влиянием факторов внешней среды (1). Ввиду регламентированности изменений задающих параметров, существует ограниченное количество возможных переходов из текущего состояния в новое.

Для описания изменения состояний поверхности листового металла в процессе прокатки в условиях воздействия факторов внешней среды (1), оказывающих влияние на качество поверхности листа, разработана модель на основе графа (рисунок 21), каждая вершина S_i которого характеризует состояние поверхности проката и условий, в результате которых оно наступило, в некоторый момент времени t , соответствующий окончанию прогона.

Учитывая, что ряд поверхностных дефектов может быть устранен в процессе прокатки, изменение задающих параметров прокатки необходимо осуществлять таким образом, чтобы при стремлении количества прогонов и соответствующих им состояний S_i к некоторому заданному значению M_T было достигнуто конечное состояние, характеризующееся требуемой толщиной h_{mpeb} проката и минимальным уровнем дефектности по каждому типу дефектов:

$$\begin{cases} S_i : h_{\text{был}} = h_{mpeb}, L^{d_k}(Y) \rightarrow \min \\ i \rightarrow M_T \\ X^* = f(A, Y, W) \end{cases}, \quad (7)$$

где $f(A, Y, W)$ – алгоритм определения наилучшего вектора X^* коэффициентов корректировки задающих параметров прокатки из множества альтернатив A для текущих показателей качества Y поверхности листового проката, формирующихся под влиянием W внешних факторов V .

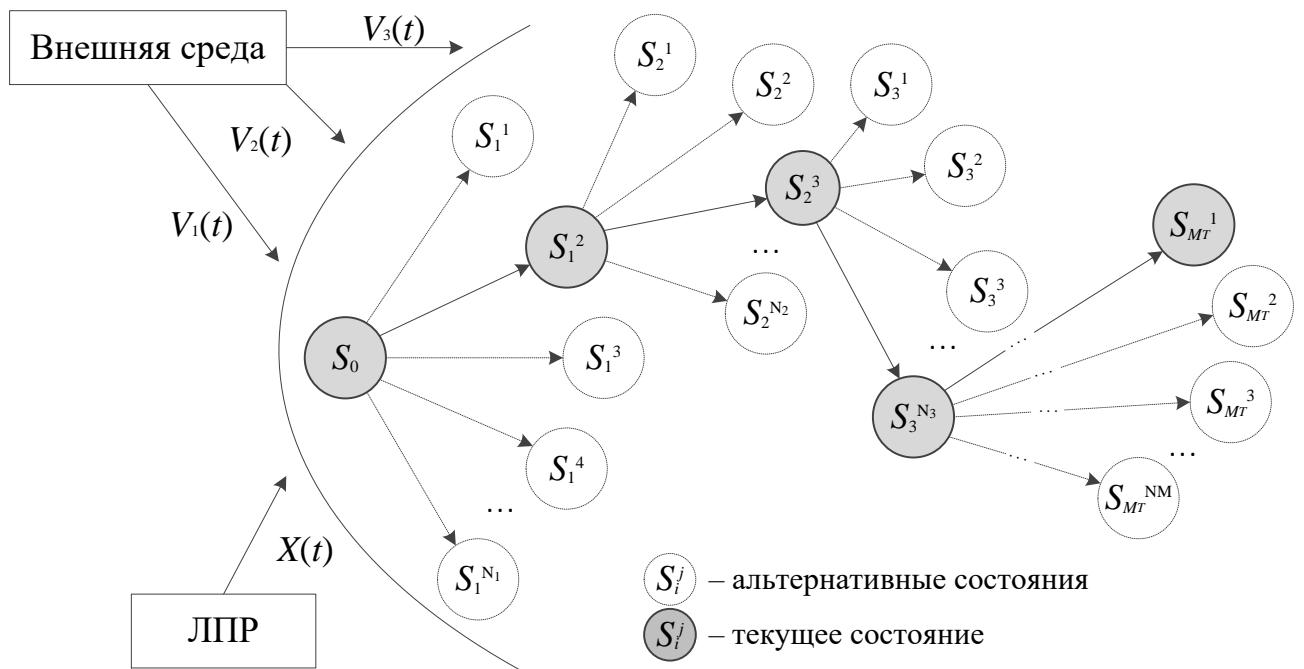


Рисунок 21 – Граф изменения состояний поверхности листового материала в процессе холодной обработки металла давлением

При этом в качестве меры близости текущего состояния S_i к требуемому S_{M_T} можно принять евклидово расстояние:

$$d(S_i) = \sqrt{\sum_{k=1}^K \left(L_i^{d_k} - L_{don}^{d_k} \right)^2 + \left(i - M_T \right)^2 + \left(\frac{h_{\text{вых}}}{h_{\text{мпроб}}} - 1 \right)^2}, \quad (8)$$

где $L_{don}^{d_k}$ – допустимое значение уровня дефектности для типа дефекта d_k в состоянии S_{M_T} .

Таким образом, разработана модель изменения состояний поверхности листового металла в процессе прокатки, на основе которой определена целевая функция поддержки принятия решений по устранению дефектов листового металлопроката.

2.4 Методика поддержки принятия решений

Методика поддержки принятия решений по устранению дефектов поверхности листового материала при холодной обработке металла давлением включает семь основных этапов, подразумевающих обработку данных как существующей ОЭСКК (этапы 1, 2), так и СИПР, разработанными в данной работе (этапы 3-7).

Этап 1. Преобразование изображений. Формируется модельное представление цифровых изображений поверхности листа на основе полученных оценок детализирующих вейвлет-коэффициентов разложения изображения проката.

Этап 2. Выделение областей возможных дефектов и их классификация.

Этап 3. Формирование модельного описания областей дефектов на основе признаков изображений поверхности листа.

Этап 4. Оценка уровней дефектности поверхности листа по каждому выявленному типу дефекта.

Этап 5. Оценка коэффициентов корректировки значений задающих параметров прокатки для устранимых типов дефектов.

Этап 6. Оценка влияния внешних факторов на качество поверхности листа.

Этап 7. Формирование рекомендаций для ЛПР (оператор стана) по устранению дефектов поверхности в виде коэффициентов коррекции X^ исходных технологических параметров.*

Схема алгоритма методики представлена на рисунке 22.

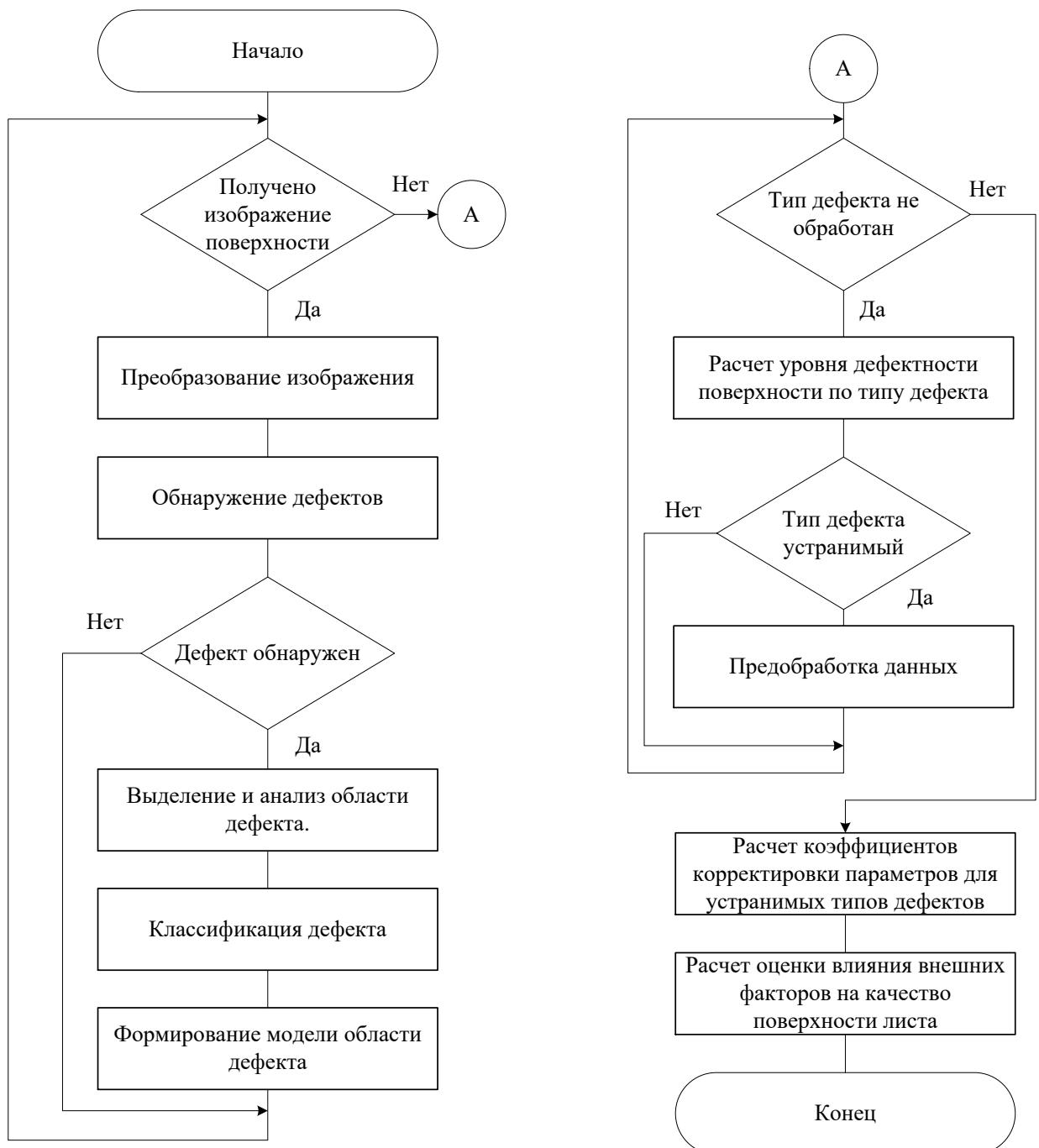


Рисунок 22 – Алгоритм методики поддержки принятия решений по устранению дефектов поверхности листового материала при холодной обработке металла давлением

Линейная камера регистрирует изображения поверхности листового металлопроката, которые поступают на вход аналитических модулей ОЭСКК. Система контроля качества осуществляет обнаружение и классификацию дефектов. Полученная информация обрабатывается средствами поддержки принятия решений, которые формируют рекомендации по изменению параметров при реверсном режиме прокатки и определяют влияние внешних факторов на возникновение дефектов.

Таким образом, разработана методика поддержки принятия решений по устранению дефектов поверхности листового металлопроката в ОЭСКК.

2.5 Разработка алгоритмов поддержки принятия решений по устранению дефектов поверхности листового металлопроката

2.5.1 Оценка коэффициентов корректировки значений задающих параметров прокатки для устранимых типов дефектов на основе группы критериев уровня дефектности

2.5.1.1 Математическая формулировка задачи

Пусть A^* – некоторое множество, называемое пространством решений, содержит все возможные пары коэффициентов корректировки задающих параметров прокатки (6). Пары, которые могут быть использованы для поиска наиболее предпочтительного варианта изменения параметров прокатки, составляют подмножество A пространства A^* и являются множеством допустимых решений. Предпочтительность пар коэффициентов корректировки описывается числовой функцией L , характеризующей уровень дефектности поверхности листового проката и называемой критерием оптимизации.

Пусть набор из K критериев представляет собой множество функций $(L^{d_1}, L^{d_2}, \dots, L^{d_K})$, определенных на пространстве A^* и в частности, на множестве допустимых решений A . При этом уровень дефектности L^{d_k} по каждому выявленному типу дефекта d_k будет являться частным критерием выбора, а совокупность

критериев будет полной, т.к. отражает все интересы ЛПР по устранению поверхностных дефектов листового проката.

2.5.1.2 Алгоритм решения задачи оценки коэффициентов корректировки

Алгоритм (рисунок 23) выбора наилучшей альтернативы коэффициентов корректировки значений задающих параметров прокатки для устранимых типов дефектов на основе группы критериев уровня дефектности состоит из шести шагов.



Рисунок 23 – Укрупненная схема алгоритма оценки коэффициентов корректировки задающих параметров прокатки

Шаг 1. Предобработка данных областей дефектов. Для каждого типа дефекта d_k вычисляется среднее значение признаков $\bar{Y}^{d_k} = \{\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_M\} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{y_{ij}^{(d)}}{y_i^{(\Theta)}} \right\}$

всех его областей, и формируется вектор оценки типа дефекта

$$P^{d_k} = \left\{ d_k, L^{d_k}, \frac{L^{d_k}}{L}, \bar{Y}^{d_k} \right\}.$$

Шаг 2. Формирование множества альтернатив коэффициентов корректировки задающих параметров прокатки. Векторы P^{d_k} подаются на вход вероятностной нейронной сети, суммирующий слой которой составляют пары коэффициентов корректировки параметров (6). Учитывая усредненный способ формирования входных данных, для каждого вектора, подаваемого на вход, выбираются те выходные значения нейронной сети, вероятность которых превышает среднее значение вероятности элементов суммирующего слоя. Выбранные пары составляют множество допустимых альтернатив $A = \{X_1^*, X_2^*, \dots, X_O^*\}$ коэффициентов корректировки.

Шаг 3. Оценка корректировки. Формируется матрица оценки влияния коэффициентов X_l^* на выявленные типы дефектов d_k :

$$\begin{pmatrix} X_1^* & X_1^* & X_1^* & X_1^* & X_2^* & X_2^* & X_2^* & \dots & X_O^* & X_O^* & X_O^* & X_O^* \\ P^{d_1} & P^{d_2} & \dots & P^{d_K} & P^{d_1} & P^{d_2} & \dots & P^{d_K} & \dots & P^{d_1} & P^{d_2} & \dots & P^{d_K} \\ L^{d_{11}} & L^{d_{12}} & \dots & L^{d_{1K}} & L^{d_{21}} & L^{d_{22}} & \dots & L^{d_{2K}} & \dots & L^{d_{O1}} & L^{d_{O2}} & \dots & L^{d_{OK}} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где $L^{d_{lk}}$ – прогнозное значение уровня дефектности, к которому приведет изменение задающих параметров прокатки в соответствии с корректировкой X_l^* при выявленных типах дефектов, описываемых векторами P^{d_k} .

Шаг 4. Установление соответствия между коэффициентами корректировки задающих параметров прокатки и возможными уровнями дефектности поверхности листа. Матрица (9) преобразуется к виду:

$$L^* = \begin{pmatrix} \left(L^{d_1}, L^{d_2}, \dots, L^{d_K} \right)_{X_1^*} \\ \left(L^{d_1}, L^{d_2}, \dots, L^{d_K} \right)_{X_2^*} \\ \vdots \\ \left(L^{d_1}, L^{d_2}, \dots, L^{d_K} \right)_{X_O^*} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Шаг 5. Предварительный отбор коэффициентов корректировки задающих технологических параметров. На основе множества векторов (10) выполняется построение Парето-оптимального множества $P(L^*)$, элементы которого удовлетворяют критерию оптимизации.

Шаг 6. Выделение наилучшей альтернативы уровней дефектности и соответствующих ей коэффициентов корректировки X_l^* . Выполняется сужение множества $P(L^*)$ в соответствии с целью (7).

2.5.1.3 Формирование множества альтернатив коэффициентов корректировки задающих параметров прокатки

Для формирования множества альтернатив коэффициентов корректировки задающих параметров прокатки в работе использована модификация модели вероятностной нейронной сети. Архитектура сети (рисунок 24) включает четыре слоя: входной, слой образцов, суммирующий слой и выходной агрегирующий слой, что является модификацией классической модели вероятностной нейронной сети. Основная задача входного слоя – распределение признаков входного вектора P^{d_k} для слоя образцов. Количество нейронов данного слоя равно размерности входного вектора, которая определяется 16-ю признаками. Размерность слоя образцов соответствует размеру обучающей выборки. Количество нейронов слоя суммирования определяется числом возможных вариантов изменения задающих параметров прокатки.

Входной слой и слой образцов образуют полно связную структуру [68]. Для входящих в элемент слоя образцов связей весовые коэффициенты устанавливаются равными значению признаков соответствующего входного вектора. Активность нейронов слоя образцов вычисляется по формуле [69]:

$$\theta_i = \exp\left(\frac{-\sum (w_{ij} - P_i^{d_k})^2}{\sigma^2}\right), \quad (11)$$

где w_i – вектор весов i -го нейрона слоя образцов; σ – параметр, задающий ширину (отклонение) функции и определяющий ее влияние.

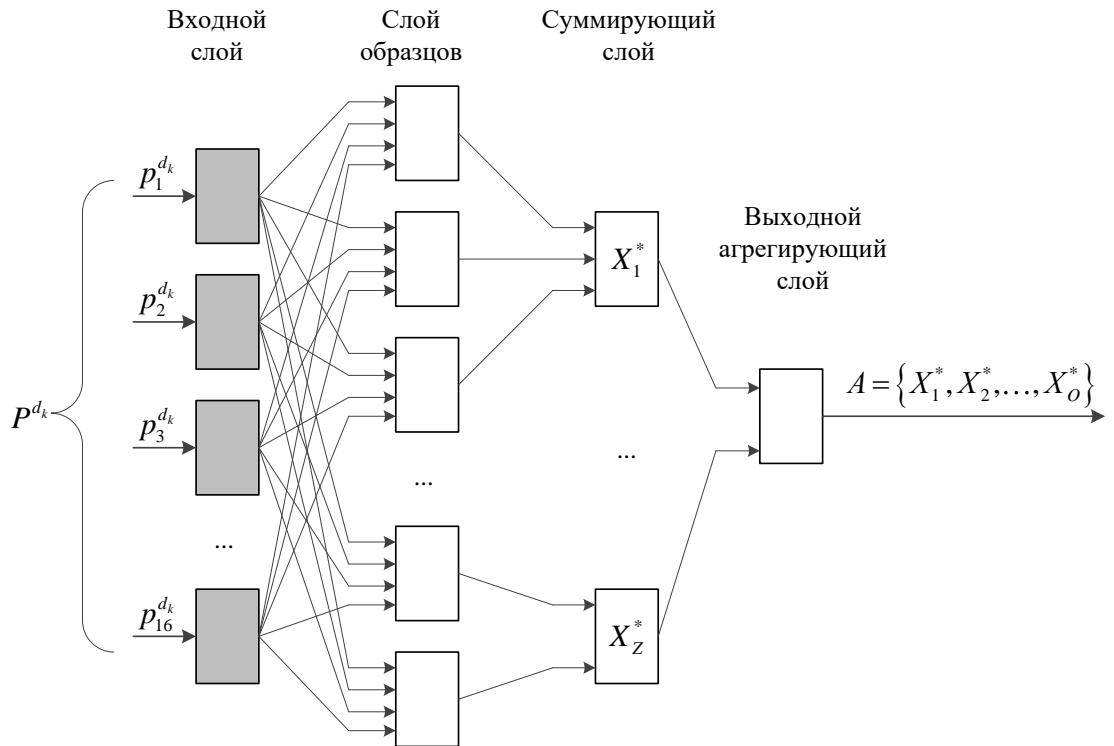


Рисунок 24 – Архитектура вероятностной нейронной сети

Элементы слоя суммирования связаны только с элементами слоя образцов и определяют соответствующие изменения задающих параметров прокатки. Элементы слоя суммирования вычисляют сумму выходных значений нейронов слоя образцов, которая оценивает значение функции плотности распределения вероятностей для набора экземпляров соответствующих коэффициентов корректировки параметров прокатки.

Выходной агрегирующий слой вычисляет среднее значение активности элементов слоя суммирования и формирует из этого слоя выходной набор альтернатив коэффициентов корректировки, активность которых больше либо равна рассчитанному среднему значению.

Преимуществом данной модели является быстрое обучение и возможность получения полезных результатов даже на малых объемах обучающей выборки [70].

Алгоритм обучения вероятностной нейронной сети:

Шаг 1. Выполнить нормализацию обучающего вектора $P_i^{d_k}$:

$$P_{ij}^{\prime d_k} = \frac{P_{ij}^{d_k}}{\sqrt{\sum_j^{16} (P_{ij}^{d_k})^2}}.$$

Шаг 2. Подать вектор $P_{ij}^{\prime d_k}$ на вход нейронной сети.

Шаг 3. Определить значения синаптических связей слоя образцов:

$$w_{ij} = P_{ij}^{\prime d_k}, w_i = P_i^{\prime d_k}$$

где $i = \overline{1, W}$, $j = \overline{1, 16}$, W – размер обучающей выборки, w_{ij} – вес j -го синапса i -го нейрона, $P_{ij}^{\prime d_k}$ – j -й признак i -го вектора обучающей выборки.

Шаг 4. Установить связь между i -м нейроном слоя образцов и нейроном суммирующего слоя, соответствующим варианту коэффициентов корректировки, к которому относится обучающий вектор.

Шаг 5. Если $i \leq W$, вернуться к шагу 1, иначе – конец алгоритма.

Алгоритм формирования множества альтернатив коэффициентов корректировки задающих параметров прокатки:

Шаг 1. Выполнить нормализацию вектора оценки типа дефекта $P_i^{d_k}$:

$$P_{ij}^{\prime d_k} = \frac{P_{ij}^{d_k}}{\sqrt{\sum_j^{16} (P_{ij}^{d_k})^2}}.$$

Шаг 2. Подать вектор $P_{ij}^{\prime d_k}$ на вход нейронной сети.

Шаг 3. Определить активность нейронов слоя образцов по формуле (9).

Шаг 4. Вычислить сумму значений синаптических связей каждого нейрона слоя суммирования.

Шаг 5. Вычислить среднее значение активности элементов слоя суммирования.

Шаг 6. Сформировать множество альтернатив коэффициентов корректировки на основе элементов суммирующего слоя, активность которых больше либо равна значению, рассчитанному на шаге 5.

2.5.1.4 Оценка альтернатив коэффициентов корректировки задающих параметров прокатки

Для оценки альтернатив коэффициентов был использован метод классификации на основе случайного леса [71]. Случайным лесом называется классификатор, состоящий из набора деревьев, каждое из которых вносит один голос при определении класса анализируемого объекта:

$$\{h(x, \Theta_k) \mid k = 1, \dots\},$$

где Θ_k – независимые случайно распределенные векторы.

Таким образом, случайный лес представляет собой ансамбль деревьев решений, построение которых осуществляется на основе бутстреп-выборки из исходного обучающего набора.

Для формирования ансамбля деревьев решений $\{T_i\}_{i=1}^B$ каждое дерево T_i , $i = 1, 2, \dots, B$, где B – количество деревьев в ансамбле, строится по следующему алгоритму [72]:

- на основе исходной обучающей выборки $D = \{x_i, y_i\}_{i=1}^l$ формируется бутстреп-выборка S размера l ;
- по сформированной выборке S индуцируется неусеченное дерево решений T_i , обладающее минимальным количеством n_{min} наблюдений в терминальных вершинах, посредством рекурсивного выполнения следующих шагов:
 - 1) из исходного набора n признаков, произвольным образом выбираются r признаков;
 - 2) из определенных на предыдущем шаге r признаков выбирается признак, обеспечивающий наилучшее расщепление;

3) выборка, соответствующая обрабатываемой вершине, расщепляется на две подвыборки.

Классификация осуществляется следующим образом: пусть $\omega_i(x) \in \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_c\}$ – класс, предсказанный деревом решений T_i , тогда результатом классификации $\hat{\omega}_{rf}^B(x)$ будет являться класс, наиболее часто встречающийся в множестве решений $\{\omega_b(x)\}_{i=1}^B$ ансамбля деревьев.

Преимущество использования случайного леса обеспечивается высокой точностью классификации за счет слабой коррелированности деревьев, высокой вычислительной эффективностью вследствие отсутствия усечения полного дерева решений и возможности организации параллельных вычислений, а так же простотой применения.

Формирование обучающей выборки осуществлялось на основе векторов оценки типов дефектов P^{d_k} , значений параметров прокатки и кластеров, сформированных на этапе анализа значений уровня дефектности.

Алгоритм оценки коэффициентов корректировки параметров прокатки основан на отнесении входного вектора к одному из двенадцати кластеров значений уровней дефектности. Оценочным значением при этом является центр кластера, к которому был отнесен объект, характеризующий тип дефекта и коэффициенты корректировки.

2.5.1.5 Выделение наилучшей альтернативы коэффициентов корректировки задающих параметров прокатки на основе построения Парето-оптимального множества

Вектор $L_p^* \in L^*$ называется оптимальным по Парето [73], если не существует такого возможного вектора $L_{X_l^*}^* \in L^*$, для которого $L_{X_l^*}^* \geq L_p$. Множество L^* будет Парето-оптимальным, если выполняется условие:

$$P(L^*) = \{L_p \in L^* \mid \exists L_{X_l^*}^* \in L^*, L_{X_l^*}^* \geq L_p\}.$$

Алгоритм построения Парето-оптимального множества альтернатив коэффициентов корректировки задающих технологических параметров прокатки на основе векторов уровней дефектности поверхности листа.

Шаг 1. Положить $P(L^*) = L^*$, $i=1, j=2$ (в начале алгоритма текущее множество Парето-оптимальных векторов совпадает с множеством L^* , где i – номер текущего элемента Парето-оптимального множества, j – номер текущего элемента исходного множества).

Шаг 2. Если $L_{X_i^*}^* \leq L_{X_j^*}$, перейти к шагу 3, в противном случае – к шагу 5.

Шаг 3. Удалить из текущего множества векторов $P(L^*)$ вектор $L_{X_j^*}$, перейти к шагу 4.

Шаг 4. Если $j < O$, перейти к рассмотрению следующего вектора: $j=j+1$ и вернуться к шагу 2. В противном случае – перейти к шагу 7.

Шаг 5. Если $L_{X_i^*}^* \geq L_{X_j^*}$, перейти к шагу 6, в противном случае – вектора не сравнимы, вернуться к шагу 4.

Шаг 6. Удалить из текущего множества векторов $P(L^*)$ вектор $L_{X_i^*}$, перейти к шагу 7.

Шаг 7. Если $i < R-1$, последовательно увеличить i и j : $i=i+1, j=i+1$. После этого вернуться к шагу 2. В противном случае Парето-оптимальное множество альтернатив построено полностью.

Ввиду того, что полученное множество альтернатив может быть достаточно широким [74], выбирается такая альтернатива, при которой разница между допустимым изменением задающего значения толщины листа проката kh и соответствующим альтернативе коэффициентом h^* будет стремиться к нулю, где kh определяется выражением:

$$kh = \begin{cases} \frac{h_{\text{пред}} - h_{\text{был}}}{M_T - i}, & \text{если } h_{\text{пред}} \leq kh_{\max} \\ kh_{\max}, & \text{в противном случае} \end{cases},$$

и kh_{\max} – предельно допустимое изменение толщины листа проката, i – номер состояния S_i .

2.5.2 Оценка влияния внешних факторов на качество поверхности листа

Для оценки степени влияния факторов (1) в работе использован модифицированный метод многокритериального выбора [75] с различным числом альтернатив под критериями с использованием продукциионных правил для сравнения альтернатив.

Пусть в качестве альтернатив выступают факторы внешней среды, множество критериев включает элементы: K_1 – тип дефекта «риска», K_2 – тип дефекта «царапина», K_3 – тип дефекта «накол», K_4 – тип дефекта «отпечатки», K_5 – тип дефекта «раскатанная трещина», K_6 – тип дефекта «прокатная плена», K_7 – тип дефекта «полосы нагартовки», K_8 – периодичность дефекта, K_9 – продольная разнотолщинность полосы, K_{10} – нарушение плоскости полосы, а матрица парных сравнений для критериев имеет вид (рисунок 25).

| | K1 | K2 | K3 | K4 | K5 | K6 | K7 | K8 | K9 | K10 |
|------|----|-----|----|-------|--------|-----|----|------|-------|-------|
| K1 | 1 | 0,5 | 1 | 0,333 | 0,25 | 0,5 | 1 | 0,25 | 0,333 | 0,333 |
| K2 | 2 | 1 | 1 | 0,333 | 0,25 | 0,5 | 1 | 0,25 | 0,333 | 0,333 |
| K3 | 1 | 1 | 1 | 0,333 | 0,25 | 1 | 1 | 0,5 | 0,333 | 0,333 |
| K4 | 3 | 3 | 3 | 1 | 0,25 | 1 | 1 | 0,25 | 1 | 1 |
| K5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 4 | 4 | 2 | 3 | 3 |
| K6 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0,25 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| K7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,25 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| K8 | 4 | 4 | 2 | 4 | 0,5 | 1 | 1 | 1 | 4 | 4 |
| ▶ K9 | 3 | 3 | 3 | 1 | 0,3... | 0,5 | 1 | 0,25 | 1 | 1 |
| K10 | 3 | 3 | 3 | 1 | 0,3... | 0,5 | 1 | 0,25 | 1 | 1 |

Рисунок 25 – Матрица парных сравнений критериев

Заполнение матрицы сравнения альтернатив по критериям осуществляется на основе базы продукциионных правил. Например, если распознан тип дефекта

«риска» и износ оборудования составляет более 50%, то матрица попарного сравнения альтернатив по критерию K_1 будет иметь вид (рисунок 26).

| Nº | Критерий |
|----|---|
| 1 | K1 - тип дефекта "риска" |
| 2 | K2 - тип дефекта "царапина" |
| 3 | K3 - тип дефекта "накол" |
| 4 | K4 - тип дефекта "отпечатки" |
| 5 | K5 - тип дефекта "раскатанная трещина" |
| 6 | K6 - тип дефекта "прокатная пленка" |
| 7 | K7 - тип дефекта "полосы нагартовки" |
| 8 | K8 - периодичность дефекта |
| 9 | K9 - продольная разнотолщинность полосы |
| 10 | K10 - нарушение плоскостности полосы |

Матрица ...

| | A1 | A2 | A3 |
|----|----|-------|-------|
| A1 | 1 | 0,111 | 0,125 |
| A2 | 9 | 1 | 6 |
| A3 | 8 | 0,167 | 1 |

OK Отмена

Рисунок 26 – Матрица парного сравнения альтернатив для критерия K_1

После заполнения матриц для каждого критерия выполняется их нормировка: значение в каждом столбце матрицы делится на сумму значений этого столбца. Далее для каждой матрицы находятся средние значения по каждой строке. В итоге получается вектор-столбец весов критериев по цели и матрица весовых коэффициентов альтернатив с точки зрения соответствия отдельным критериям. Произведение матрицы на вектор даст вектор W значений весов альтернатив относительно критериев (рисунок 27), т.е. оценку влияния факторов внешней среды на возникновение дефекта.

| Результат анализа | | |
|--|-------|------|
| Вектор приоритетов альтернатив | | |
| 0,366 | 0,484 | 0,15 |
| Альтернатива "V2(t) - состояние прокатного оборудования" является наилучшей. Приоритет: 0,484 | | |

Рисунок 27 – Результат оценки влияния факторов внешней среды

Алгоритм оценки влияния внешних факторов на качество поверхности листа состоит из шести шагов:

Шаг 1. Построение матрицы парных сравнений дефектов X .

Шаг 2. Установление взаимосвязи между внешними факторами $\{V_1, V_2, V_3\}$ и множеством типов дефектов $\{d_1, d_2, \dots, d_s\}$: построение матрицы B , такой что, если фактор V_i оценивается по дефекту d_j , то $b_{ij} = 1$, иначе $b_{ij} = 0$:

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1s} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2s} \\ b_{31} & b_{32} & \dots & b_{3s} \end{bmatrix}.$$

Шаг 3. Оценка факторов воздействия внешней среды по дефектам: на основе производственных правил с учетом матрицы B по методу парного сравнения строится матрица AD :

$$AD = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1s} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2s} \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{3s} \end{bmatrix},$$

где оценки $\{a_{ij}\}$ представляют векторы приоритетов факторов V_i относительно дефекта d_j . Если фактор V_i не оценивается по дефекту d_j , то $a_{ij}=0$.

Шаг 4. Обработка матрицы парных сравнений дефектов X , построение нормированного вектора приоритетов дефектов \bar{X} .

Шаг 5. Формирование матрицы L :

$$L = \begin{bmatrix} R_1/N_R & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_2/N_R & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & R_s/N_R \end{bmatrix},$$

где R_j – число факторов V_i , оцениваемых по дефекту d_j , $N_R = \sum_{j=1}^s R_j$ – суммарное число факторов, оцениваемых по всем дефектам.

Шаг 6. Рассчитывается оценка влияния внешних факторов на качество поверхности листа: определяется вектор $W = AD \cdot L \cdot \bar{X} \cdot B$, где матрица B предназначена для окончательного нормирования значений вектора W .

Таким образом, решена задача № 2, разработана методика, модели и алгоритм поддержки принятия решений по устраниению дефектов поверхности листового материала при холодной обработке металла давлением с учетом воздействия факторов внешней среды, оказывающих влияние на качество поверхности листа.

Выводы по второй главе

Таким образом, разработаны: модель области дефекта проката на основе геометрических, гистограммных, спектральных признаков изображения поверхности металла, разработана методика определения уровня дефектности поверхности проката, модель изменения состояний поверхности листового металла в процессе прокатки. Определена целевая функция поддержки принятия решений в ОЭСКК. Разработано специальное математическое и алгоритмическое обеспечение СППР по устранению дефектов проката: методика поддержки принятия решений по устранению дефектов проката, алгоритм расчета коэффициентов корректировки задающих параметров прокатки, алгоритм оценки влияния внешних факторов на качество поверхности листа.

3 Разработка прототипа программного средства интеллектуальной поддержки принятия решений по устранению дефектов листового металлопроката

3.1 Разработка функционального назначения программного средства

Разработка функционального назначения программного средства [76] (рисунок 28) выполнена на базе модели поддержки принятия решений по устранению дефектов поверхности листового металлопроката.



Рисунок 28 – Функциональная схема программного средства

Таким образом, программное средство интеллектуальной поддержки принятия решений по устранению дефектов листового металлопроката предназначено для решения следующих задач: ведение справочных данных, анализ изображений области дефекта, расчет коэффициентов корректировки, оценка влияния внешних факторов.

3.2 Разработка архитектуры программного средства

Архитектура программного средства – это абстрактное представление, состоящее из моделей компонент приложения и моделей взаимодействия между ними. Разработка архитектуры приложения средств интеллектуальной поддержки принятия решений осуществлялась на основе объектно-ориентированного подхода, который позволяет отразить взаимосвязи между объектами приложения, отдельными подсистемами, описать типы отношений между ними и внутреннюю структуру [77].

Архитектура программного средства интеллектуальной поддержки принятия решений отражена на диаграмме классов (рисунок 29).

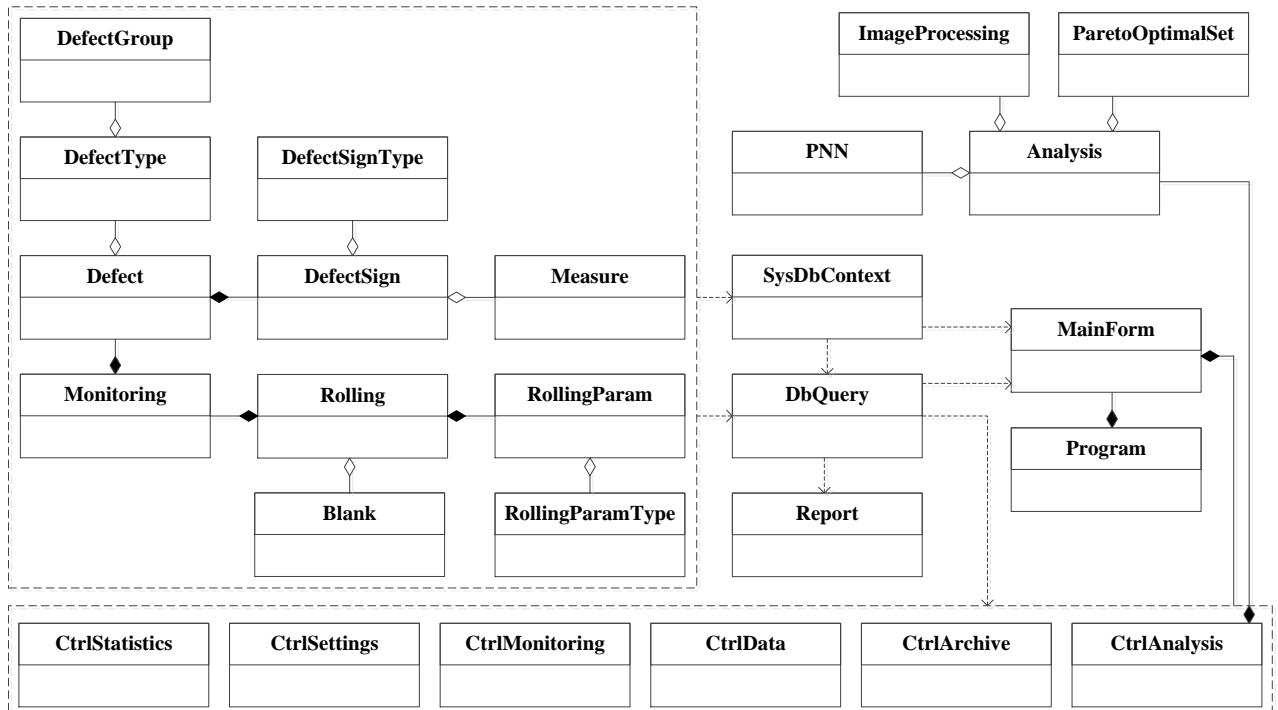


Рисунок 29 – Диаграмма классов программного средства

Описание классов представлено в таблице 7.

Таблица 7 – Описание классов программного средства

| Название класса | Функциональное назначение |
|------------------|---|
| CtrlStatistics | Реализация графического пользовательского интерфейса, отображение статистических данных выполненного анализа. |
| CtrlSettings | Реализация графического пользовательского интерфейса, отображение панели настроек. |
| CtrlMonitoring | Реализация графического пользовательского интерфейса, отображение панели анализа. |
| CtrlData | Реализация графического пользовательского интерфейса, отображение панели ведения данных. |
| CtrlArchive | Реализация графического пользовательского интерфейса, отображение панели архивных данных. |
| CtrlAnalysis | Реализация графического пользовательского интерфейса, отображение панели поддержки принятия решений. |
| Program | Инициализация и запуск программы. |
| MainForm | Реализация графического пользовательского интерфейса, главное окно программы. |
| Report | Библиотека работы с файлами, формирование протокола поддержки принятия решений. |
| DbQuery | Библиотека запросов к базе данных. |
| SysDbContext | Библиотека инициализации элементов для работы с базой данных. |
| PNN | Реализация модификации вероятностной нейронной сети. |
| ImageProcessing | Библиотека функций построения модели области дефекта. |
| ParetoOprimalSet | Библиотека функций построения Парето-оптимального множества альтернатив. |
| Analysis | Библиотека функций оценки коэффициентов корректировки параметров и оценки влияния внешних факторов. |
| RollingParamType | Хранение данных о типе параметра прокатки. |
| RollingParam | Хранение данных о параметрах прокатки. |

Продолжение таблицы 7

| Название класса | Функциональное назначение |
|-----------------|--|
| Measure | Хранение данных о единицах измерения. |
| DefectSignType | Хранение данных о типе признака изображения, характеризующего область дефекта. |
| DefectSign | Хранение данных о признаке изображения, характеризующего область дефекта. |
| Blank | Хранение данных о сортаменте проката |
| Rolling | Хранение данных о прокатке. |
| Monitoring | Хранение данных о контроле качества. |
| Defect | Хранение данных о дефекте проката. |
| DefectType | Хранение данных о типах дефектов. |
| DefectGroup | Хранение данных о группах дефектов. |

Таким образом, разработана архитектура средств интеллектуальной поддержки принятия решений по устранению дефектов листового металлопроката.

3.3 Разработка структуры оптико-электронной системы контроля качества со средствами поддержки принятия решений

ОЭСКК со средствами поддержки принятия решений состоит из двух основных компонент (рисунок 30): непосредственно самой ОЭСКК, осуществляющей сканирование поверхности ленты проката и выполняющей обнаружение и классификацию дефектов, и средств поддержки принятия решений, которые выполняют анализ данных, полученных от ОЭСКК, и формируют рекомендации лицу, принимающему решения.

Входными данными для подсистем СППР являются изображение области дефекта, вейвлет-коэффициенты модельного представления изображения поверхности проката и тип обнаруженного дефекта. СППР решают две ключевые задачи: расчет коэффициентов корректировки задающих параметров и оценку влияния внешних факторов на возникновение дефектов. Данный функционал реализуется соответствующими подсистемами, которые реализуют представленную в данной

работе методику поддержки принятия решений по устраниению поверхностных дефектов проката. ОЭСКК, СППР и АСУТП прокатного стана используют единую базу данных.

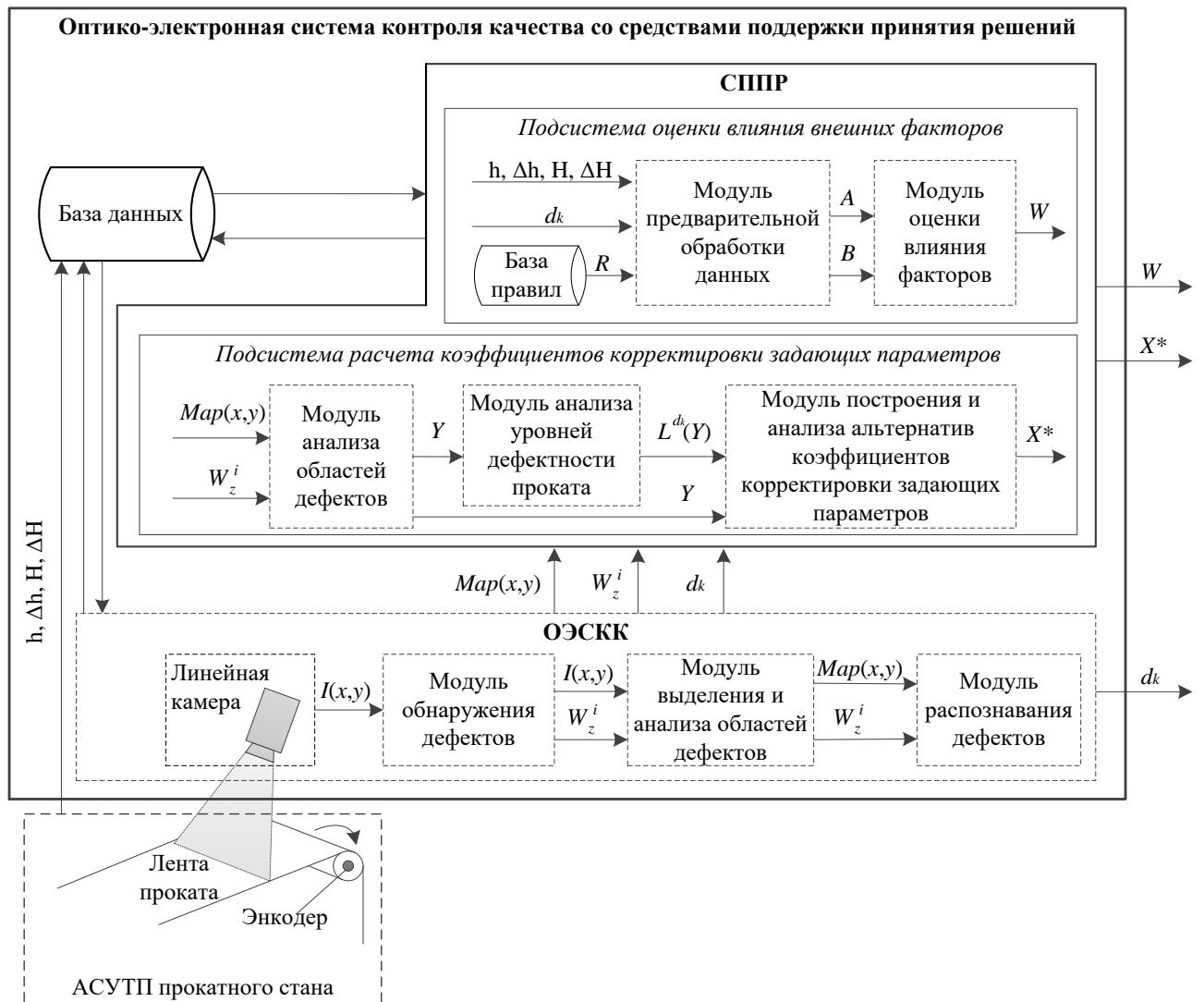


Рисунок 30 – Схема ОЭСКК со средствами интеллектуальной поддержки принятия решений

Таким образом, выполнено проектирование основных элементов ОЭСКК с СППР и определены основные потоки обмена данными между ними.

3.4 Разработка информационного обеспечения программного средства

3.4.1 Внешний уровень архитектуры базы данных

Формализованное описание предметной области включает описание классов объектов (КО) (таблица 8), присущих заданной предметной области, их свойства, характеристики свойств и связи между классами объектов [78].

В таблице использованы следующие сокращения: «ПК» – первичный ключ, «УК» – уникальный ключ, «д.б.» – должно быть, «м.б.» – может быть, «G» - генерация, «I» - ввод, «U» - обновление, «R» - просмотр.

Таблица 8 – Описание классов объектов предметной области

| Класс объектов/ Свойство | Ключ | Физические характе- ристики | Обяза- тель- ность значения | Логические ограничения | Процессы |
|-----------------------------|-----------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| ГОСТ | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| наименование | – | символы, 500 | д.б. | – | I, U, R |
| дата введения | – | дата | д.б. | ДД.ММ.ГГГГ | I, U, R |
| дата отмены | – | дата | м.б. | ДД.ММ.ГГГГ | I, U, R |
| ВИД ПРОДУКЦИИ | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| название | – | символы, 500 | д.б. | – | I, U, R |
| краткое название | – | символы, 200 | м.б. | – | I, U, R |
| ТИП ХАРАКТЕРИСТИКИ | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |

Продолжение таблицы 8

| Класс объектов/ Свойство | Ключ | Физические характе- ристики | Обяза- тель- ность значения | Логические ограничения | Процессы |
|-----------------------------|-----------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| название | — | символы, 500 | д.б. | — | I, U, R |
| краткое название | — | символы, 200 | м.б. | — | I, U, R |
| МАТЕРИАЛ | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| название | — | символы, 100 | д.б. | — | I, U, R |
| обозначение | — | символы, 50 | м.б. | — | I, U, R |
| ЗАГОТОВКА | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| название | — | символы, 200 | д.б. | — | I, U, R |
| доп. информация | — | символы, 2000 | м.б. | — | I, U, R |
| СОРТАМЕНТ | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| наименование | — | символы, 200 | д.б. | — | I, U, R |
| доп. информация | — | символы, 2000 | м.б. | — | I, U, R |
| ПРОКАТКА | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| дата | — | дата | д.б. | ДД.ММ.ГГГГ | I, R |
| доп. информация | — | символы, 2000 | м.б. | — | I, U, R |

Продолжение таблицы 8

| Класс объектов/ Свойство | Ключ | Физические характе- ристики | Обяза- тель- ность значения | Логические ограничения | Процессы |
|-----------------------------|-----------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| ПРОГОН | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| номер | — | символы, 10 | д.б. | буквы, циф- ры | I, R |
| ТИП ПАРАМЕТРА | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| название | — | символы, 100 | д.б. | — | I, U, R |
| краткое название | — | символы, 50 | м.б. | — | I, U, R |
| ЕДИНИЦА ИЗМЕРЕНИЯ | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| название | — | символы, 100 | д.б. | — | I, U, R |
| краткое название | — | символы, 50 | м.б. | — | I, U, R |
| ХАРАКТЕРИСТИКА | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| значение | — | число, 5 | д.б. | — | I, U, R |
| ОГРАНИЧЕНИЕ | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| значение | — | число, 5 | д.б. | — | I, U, R |
| ПАРАМЕТР | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |

Продолжение таблицы 8

| Класс объектов/ Свойство | Ключ | Физические характе- ристики | Обяза- тель- ность значения | Логические ограничения | Процессы |
|--------------------------------|-----------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| значение | – | число, 5 | д.б. | – | I, U, R |
| ВИД ПАРАМЕТРА | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| название | – | символы, 100 | д.б. | – | I, U, R |
| краткое название | – | символы, 50 | м.б. | – | I, U, R |
| КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| уровень дефектно- сти | – | число, 5 | д.б. | – | I, R |
| доп. информация | – | символы, 2000 | м.б. | – | I, U, R |
| ВНЕШНЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| коэффициент | – | число, 5 | д.б. | – | I, U, R |
| ВИД ВОЗДЕЙСТВИЯ | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| название | – | символы, 100 | д.б. | – | I, U, R |
| краткое название | – | символы, 50 | м.б. | – | I, U, R |

Продолжение таблицы 8

| Класс объектов/ Свойство | Ключ | Физические характе- ристики | Обяза- тель- ность значения | Логические ограничения | Процессы |
|-----------------------------|-----------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| ГРУППА ДЕФЕКТА | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| название | — | символы, 100 | д.б. | — | I, U, R |
| краткое название | — | символы, 50 | м.б. | — | I, U, R |
| ТИП ДЕФЕКТА | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| название | — | символы, 100 | д.б. | — | I, U, R |
| краткое название | — | символы, 50 | м.б. | — | I, U, R |
| ТИП ПРИЧИНЫ | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| название | — | символы, 100 | д.б. | — | I, U, R |
| краткое название | — | символы, 50 | м.б. | — | I, U, R |
| ПРИЧИНА ВОЗНИКНОВЕНИЯ | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| описание | — | символы, 2000 | д.б. | — | I, U, R |
| УРОВЕНЬ ДЕФЕКТНОСТИ | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |

Продолжение таблицы 8

| Класс объектов/ Свойство | Ключ | Физические характе- ристики | Обяза- тель- ность значения | Логические ограничения | Процессы |
|-----------------------------|-----------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| значение | – | число, 5 | д.б. | – | I, R |
| ДЕФЕКТ | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| изображение | – | двоичный объект | д.б. | – | I, R |
| ОБЛАСТЬ ДЕФЕКТА | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| изображение | – | двоичный объект | д.б. | – | I, R |
| ТИП ПРИЗНАКА | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| название | – | символы, 100 | д.б. | – | I, U, R |
| краткое название | – | символы, 50 | м.б. | – | I, U, R |
| ПРИЗНАК ДЕФЕКТА | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| значение признака | – | число, 5 | д.б. | – | I, R |
| КРИТИЧНОСТЬ | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| коэффициент | – | число, 5 | д.б. | – | I, U, R |
| дата начала действия | – | дата | д.б. | ДД.ММ.ГГГГ | I, U, R |
| дата окончания действия | – | дата | м.б. | ДД.ММ.ГГГГ | I, U, R |

Продолжение таблицы 8

| Класс объектов/ Свойство | Ключ | Физические характе- ристики | Обяза- тель- ность значения | Логические ограничения | Процессы |
|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| СРЕДСТВО КОНТРОЛЯ | | | | | |
| код | ПК, УК | число, 5 | д.б. | > 0 | G, R |
| наименование | – | символы, 100 | д.б. | – | I, U, R |
| разрешение | – | символы, 100 | д.б. | – | I, U, R |
| дата начала ис- пользования | – | дата | д.б. | ДД.ММ.ГГГГ | I, U, R |
| дата окончания ис- пользования | – | дата | м.б. | ДД.ММ.ГГГГ | I, U, R |

Таким образом, выделено 28 классов объектов.

3.4.2 Концептуальный уровень архитектуры базы данных

Исходными данными для построения информационно-логической модели (ИЛМ) является описание классов объектов предметной области и связей между ними. ИЛМ представлена в виде ER-диаграммы (рисунок 31). Для построения модели использована нотация Ричарда Баркера [79].

Тестирование разработанных проектных решений было выполнено с применением перекрестной проверки (проверки соответствия) модели предметной области поддержки принятия решений по устранению дефектов листового металлопроката заявленному составу функций СППР. В результате тестирования не было выявлено избыточности или недостаточности разработанной информационно-логической модели.

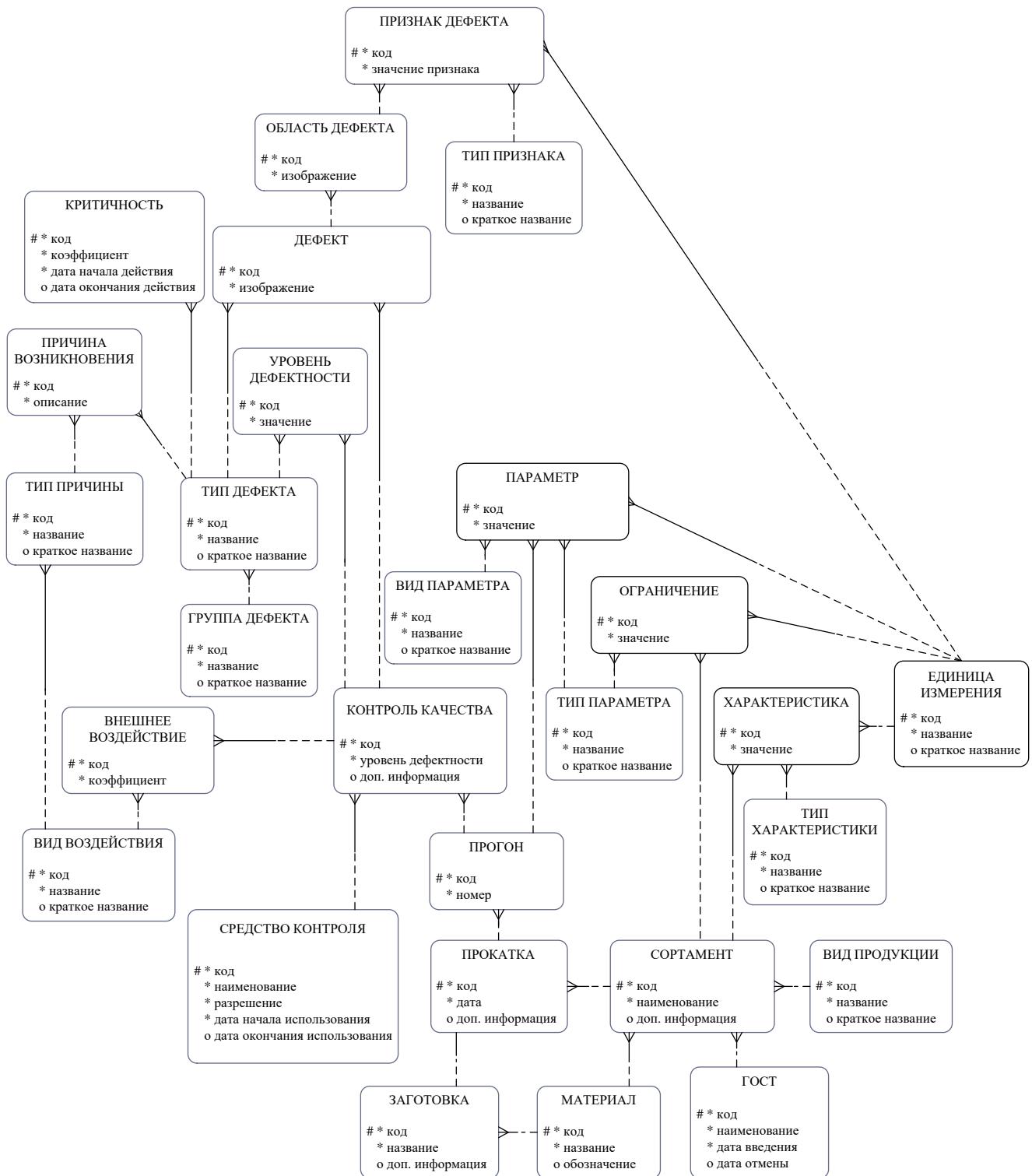


Рисунок 31 – Информационно-логическая модель предметной области

ИЛМ предметной области состоит из 28 классов объектов. Основной вид связи между классами объектов – «один ко многим» с обязательной опциональностью на стороне «много». Даталогическая модель реляционной базы данных [80] разработана на основе ИЛМ и соответствует третьей нормальной форме [81].

3.5 Разработка алгоритма программного средства

Укрупненная схема алгоритма программного средства, описывающая вызов меню, представлена на рисунке 32.

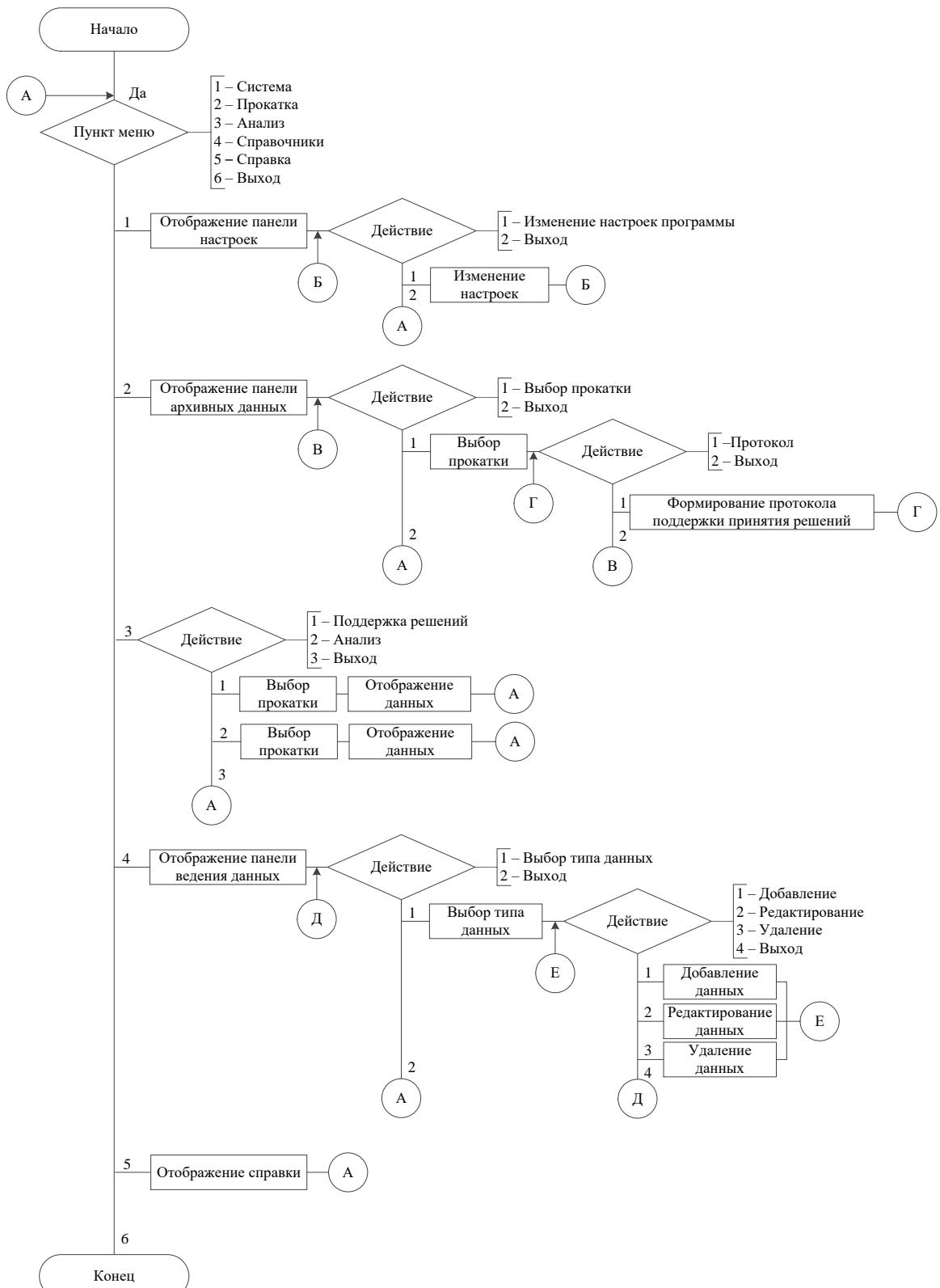


Рисунок 32 – Укрупненная схема алгоритма приложения

Главное меню программного средства состоит из следующих пунктов:

- «Система», позволяет отобразить панель настроек и изменить настройки программы.
- «Прокатка», предоставляет возможность отображения архивных данных и формирования протоколов поддержки принятия решений .
- «Анализ», отображает панель поддержки принятия решений.
- «Справочники», реализует возможность ведения справочных данных.
- «Справка», содержит информацию о программном средстве.

Таким образом, разработан алгоритм программного средства, определены основные пункты меню.

3.6 Верификация разработанных программных компонент

Под верификацией понимают проверку соответствия одних создаваемых в ходе разработки и сопровождения программного обеспечения артефактов другим, ранее созданным или используемым в качестве исходных данных, а также соответствие этих артефактов и процессов их разработки правилам и стандартам [82]. К артефактам жизненного цикла программного обеспечения относятся различные информационные сущности, документы и модели, которые создаются или используются в процессе разработки и сопровождения программного продукта. Методами верификации являются: экспертиза, статистический анализ, формальные, динамические, синтетические методы.

Для верификации средств интеллектуальной поддержки принятия решений были использованы динамические методы. Это группа методов, проверяющих соответствие результатов реальной работы системы предъявляемым требованиям и проектным решениям. Различают два вида динамических методов: мониторинг и тестирование. Тестирование подразумевает выполнение программного обеспечения в соответствии с заранее подготовленными сценариями.

Выделяют несколько видов тестирования [83]:

- 1) по уровню или масштабу проверяемых элементов системы;
- 2) по проверяемым характеристикам качества;
- 3) по источникам данных, используемых для построения теста;
- 4) по роли команды, выполняющей тестирование.

Тестирование системы поддержки принятия решений было выполнено на основе модульного, интеграционного, системного тестирования, а также тестирования черного и белого ящика.

В ходе системного тестирования выполнена проверка и подтверждена работоспособность основных функций средств интеллектуальной поддержки принятия решений (рисунки 33, 34): расчет коэффициентов корректировки параметров прокатки, оценка влияния внешних факторов на качество поверхности листового металлопроката, ведение справочных данных, отображение истории выполнения анализа.

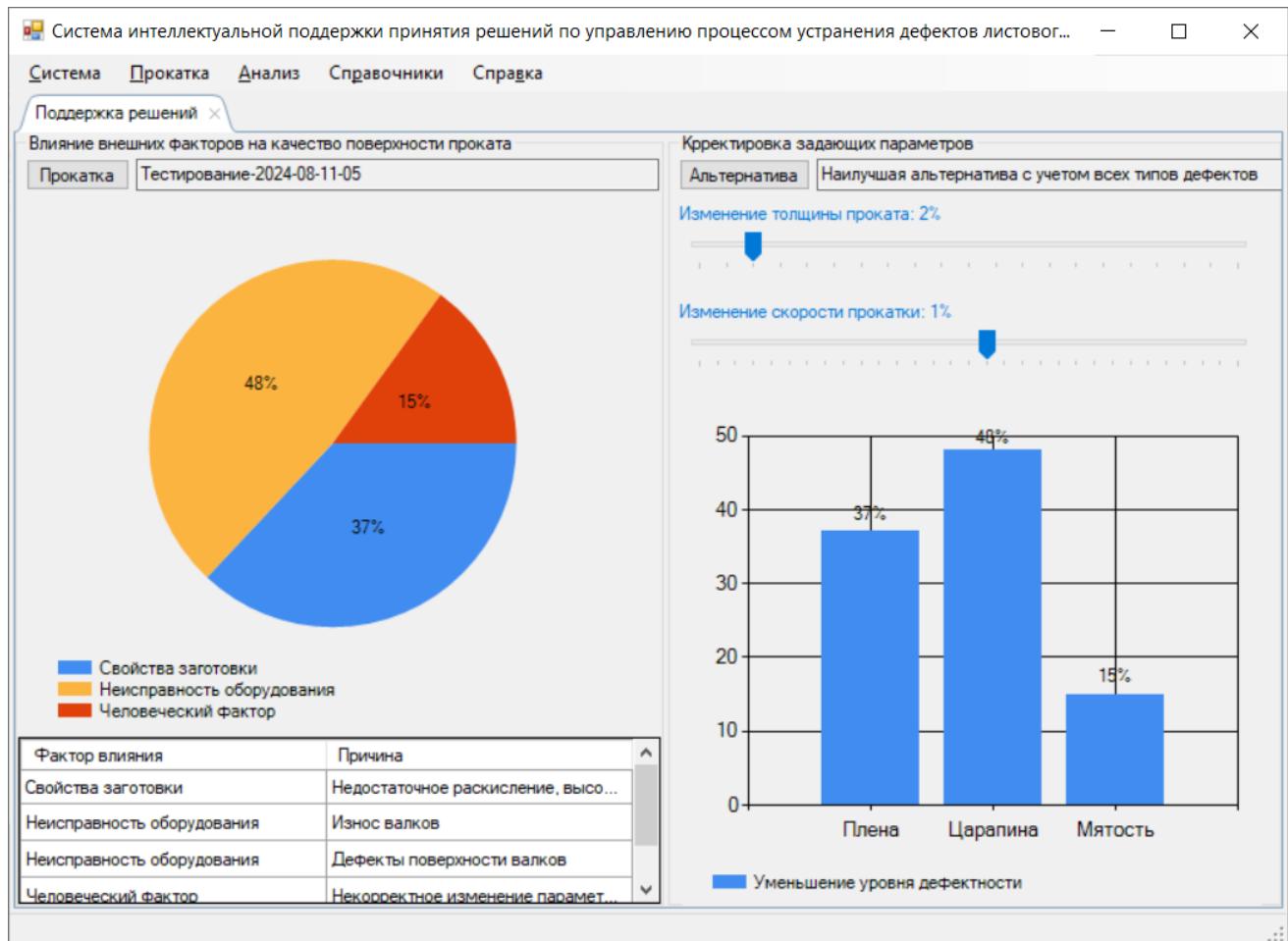


Рисунок 33 – Экранная форма СИППР. Поддержка решений

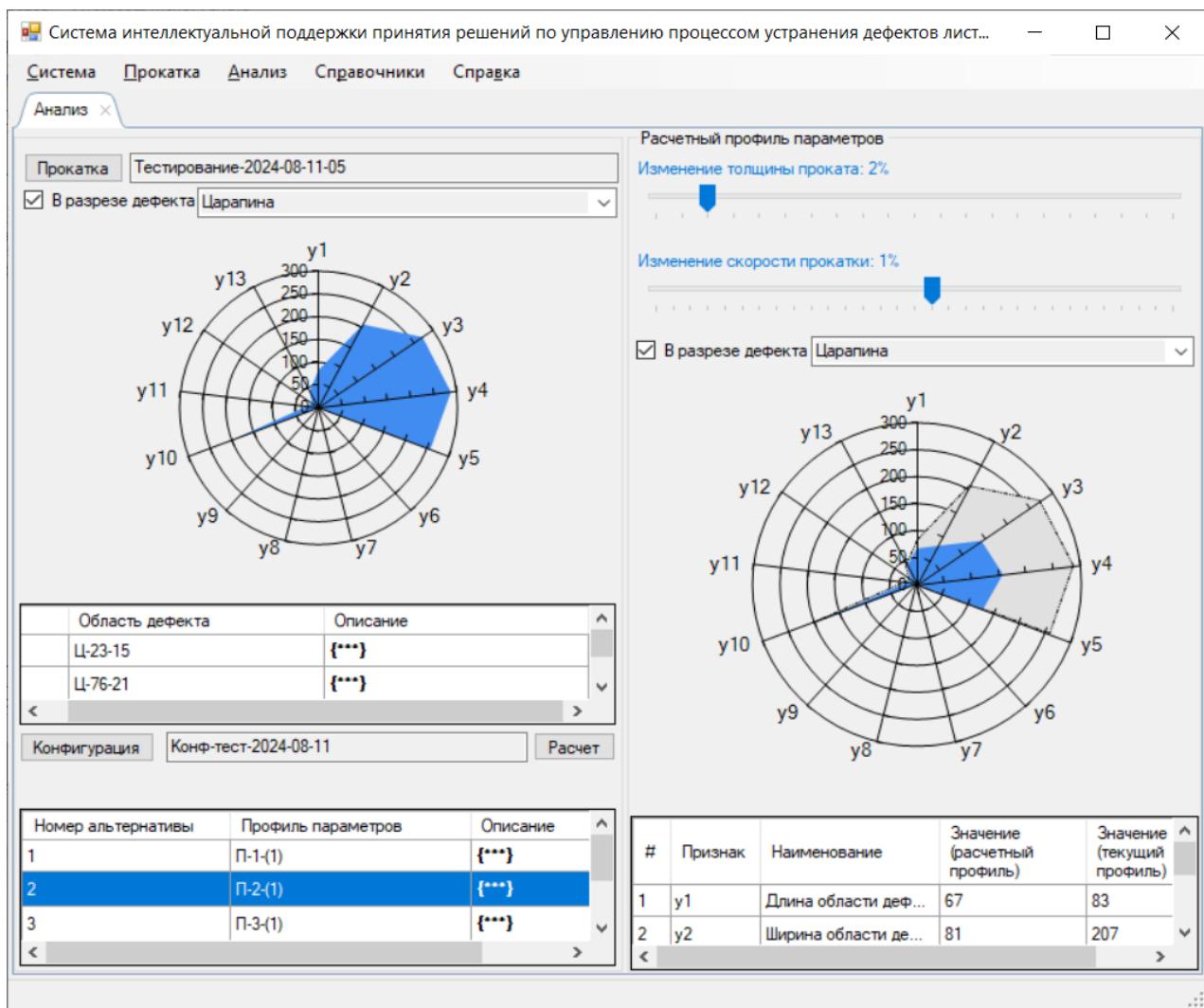


Рисунок 34 – Экранная форма СИППР. Анализ

Корректность взаимодействия компонентов ядра системы, включающих модули обработки данных и функции работы с базой данных, проверена в результате интеграционного тестирования. В случае нарушения корректности взаимодействия пользователь уведомляется соответствующими сообщениями (рисунок 35).

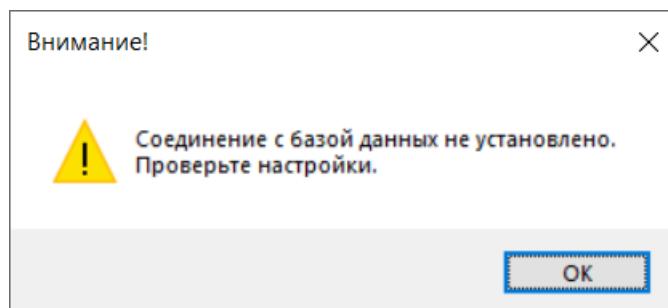


Рисунок 35 – Уведомление об отсутствии соединения с базой данных

Проверка корректности ввода данных была осуществлена в процессе функционального тестирования (рисунок 36).

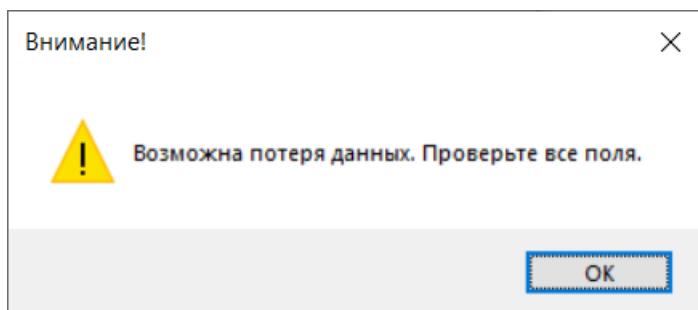


Рисунок 36 – Уведомление о возможной потере данных

Таким образом, решена задача № 3: разработан прототип СППР по устранению дефектов металлопроката в ОЭСКК поверхности листовых материалов. Верификация средств интеллектуальной поддержки принятия решений позволила проверить корректность разработки программных компонентов, их взаимодействие и подтвердить соответствие установленным требованиям.

Вывод по третьей главе

Таким образом, разработано программно-информационное обеспечение средств интеллектуальной поддержки принятия решений по устранению дефектов листового металлопроката: выполнено проектирование функционального назначения, архитектуры и структуры приложения, разработан и реализован проект информационной структуры данных, разработаны и реализованы алгоритмы приложения, выполнена верификация программных компонентов.

4 Экспериментальное исследование средств поддержки принятия решений по устранению дефектов листового металлопроката

4.1 Разработка имитационной модели исследования закономерностей устранения поверхностных дефектов листового металлопроката

4.1.1 Особенности листового проката цветных металлов

Среди всех цветных металлов наибольшее распространение в технике получили медь и алюминий [84]. Медь и ее сплавы относятся к группе тяжелых цветных металлов, алюминий – к группе легких. Особенности технологий производства листового проката из тяжелых и легких металлов имеют существенные отличия. Ниже представлен обзор технологии прокатки меди и медных сплавов.

Холодная обработка металла давлением позволяет получать медные и латунные листы толщиной 0,4-10 мм, шириной 600-1000 мм и длиной до 2000 мм, полосы шириной до 600 мм, а также тонколистовой прокат толщиной меньше 0,4 мм. При этом значительная доля продукции приходится на ленты толщиной 0,05-2,0 мм и шириной 300 мм. В качестве исходного материала используются заготовки толщиной 3-6 мм или 12-16 мм. Относительное обжатие за пропуск составляет 10-45%. Суммарное обжатие между отжигами достигает 60-80%. Максимальная скорость прокатки на непрерывных станах – до 7 м/с. На реверсивных станах прокатка осуществляется с натяжением $(0,2-0,5)\sigma_t$. Предел текучести меди в очаге деформации σ_t может изменяться в диапазоне от 70 до 100 МПа при относительном удлинении δ 40-50% [85].

4.1.2 Структура АСУТП прокатного стана

Главной функциональной задачей АСУТП прокатного стана является управление станом при прокатке партии полос. Как правило, АСУТП представляет собой совокупность взаимосвязанных и иерархически подчиненных систем

управления. Нижний уровень такой иерархии состоит из локальных управляемых устройств, непосредственно воздействующих на оборудование прокатного стана. Средний уровень включает системы локального управления отдельными зонами (участками) стана и агрегатами технологической линии, а верхний уровень представлен системой управления станом в целом [86].

Каждая функциональная задача подразделяется на ряд функций. Функции АСУТП могут быть двух видов: информационные, предназначенные для сбора и представления в удобном виде информации о состоянии стана, и управляющие, направленные на выработку и реализацию управляющих воздействий. Управление достигается за счет изменения показателей процесса прокатки (рисунок 37): переменных устройств стана, которые характеризуют работу оборудования и систем, и технологических переменных стана, характеризующих сам процесс прокатки.



Рисунок 37– Управляемые переменные прокатного стана

В зависимости от источника принятия решений по изменению управляемых переменных выделяют [87] три режима функционирования АСУТП: информационно-советующий, комбинированный и режим прямого управления.

Ниже рассмотрена структура АСУТП на примере двухклетевого стана «КВАРТО 400» [88, 89]. Оснащение каждой четырехвалковой рабочей клети (рисунок 38) включает гидравлическое нажимное устройство (ГНУ), систему позитивного и негативного изгиба рабочих валков, систему предварительного напряжения станины клети, измерители силы (ИС) прокатки (мессодзы). К оборудованию прокатного стана также относятся разматыватель, моталки, контактные толщиномеры (ИТ1, ИТ2), датчики плоскостности полосы (разрезные ролики) (ДС1, ДС2), система подготовки и подачи технологической смазки (эмulsionии), насосно-аккумуляторные станции (НАС) низкого и высокого давления, которые обеспечивают работу гидравлических систем, вспомогательные механизмы [90].

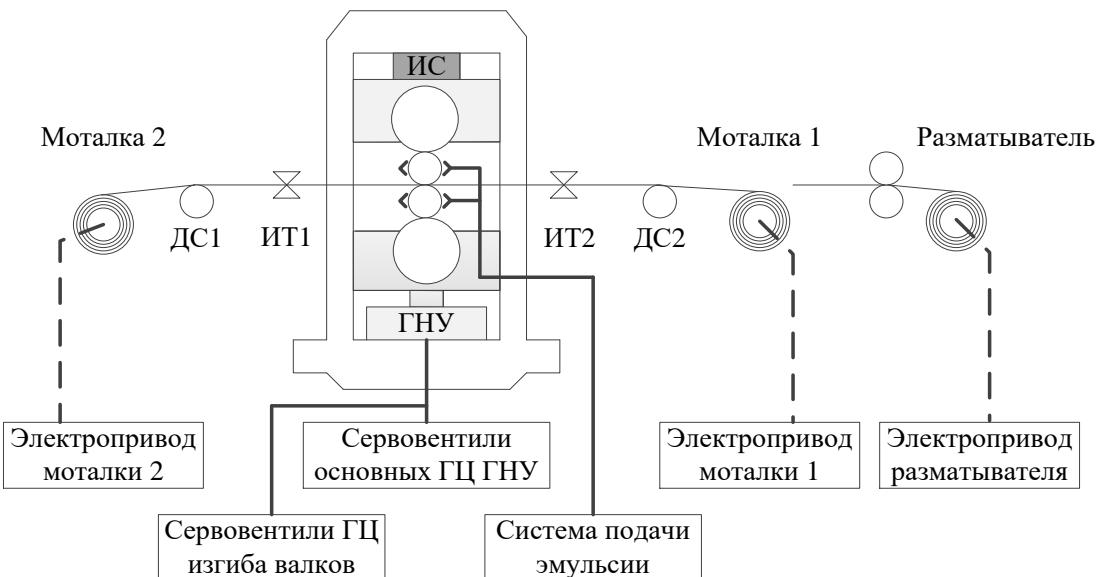


Рисунок 38 – Технологическая схема клети стана «КВАРТО 400»

Системы управления АСУТП (рисунок 39) делятся на два уровня. Базовый уровень включает систему управления электроприводами и вспомогательными механизмами (САУ ЭП) и систему управления гидронажимным устройством (СУ ГНУ). Верхний уровень представлен системой управления режимом стана (СУРС), системой автоматического регулирования толщины полосы (САРТ), системой автоматического регулирования плоскостности и формы полосы (САР-ПиФ) и системой визуализации и контроля (СВК). Так же к верхнему уровню от-

носят математическую модель стана, используемую для контроля работы САРТ и ее наладки.

САУ ЭП осуществляет управление главными приводами валков, приводами моталок и разматывателя. Сигналы управления поступают от импульсных датчиков на валах двигателей приводов и измерительных роликах, а также теристорных преобразователей приводов.

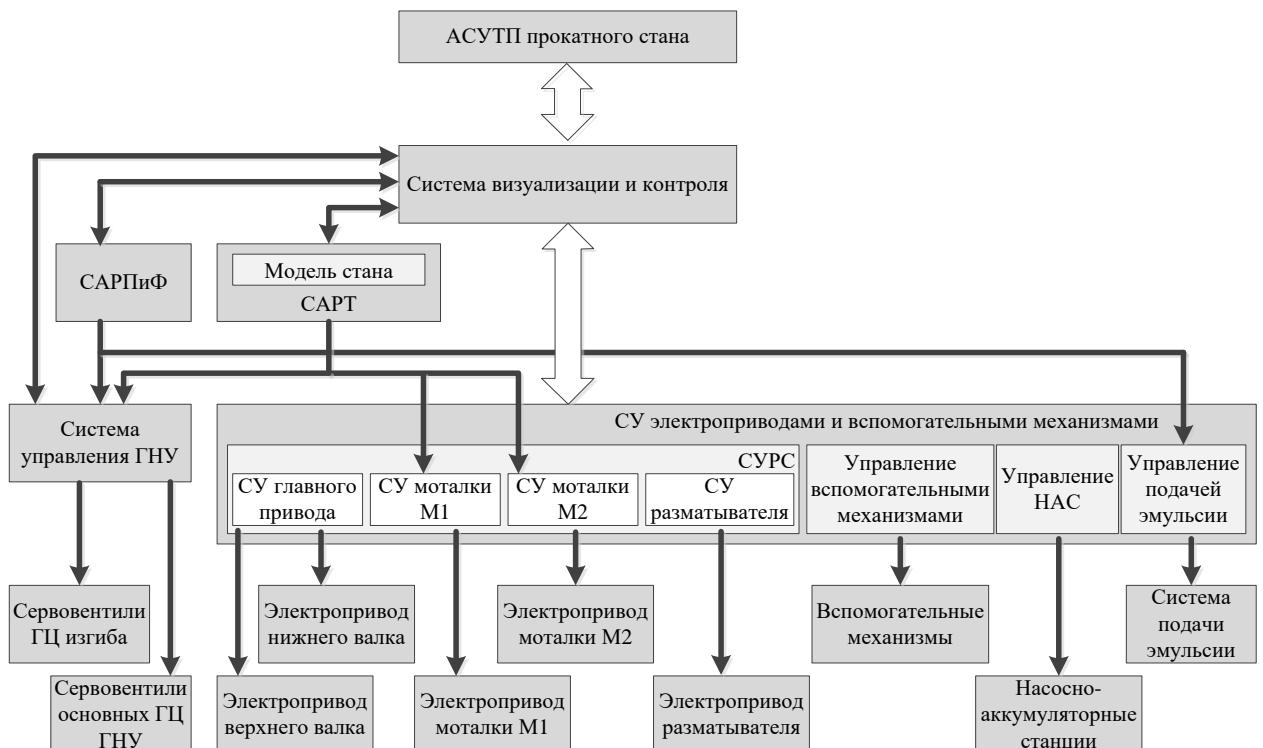


Рисунок 39 – Функциональная схема АСУТП стана «КВАРТО 400»

СУ ГНУ под управлением САРТ и САРПиФ регулирует положение ГНУ, взаимное положение гидроцилиндров, усилия прокатки по сигналам от месдоз и давление в контурах позитивного и негативного изгиба рабочего валка, обеспечивает автоматическую калибровку валков и выполняет анализ аварийных ситуаций.

СУРС, управляя САУ ЭП, обеспечивает минимальное отклонение натяжения полосы проката в переходных процессах, выполняет автоматическое снижение скорости и остановку стана перед прохождением через клеть концов полосы, швов и дефектов.

СВК обеспечивает управление системами стана с автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора и пультов управления, визуализацию и диагностику оборудования АСУТП, сбор и архивирование производственной информации.

4.1.3 Контуры управления САРТ

Ключевой системой АСУТП прокатного стана является САРТ, обеспечивающая минимальную продольную разнотолщинность проката за счет изменения раствора валков, скорости полосы и регулирования межклетевых натяжений полосы. Качество работы САРТ определяется отклонением выходной толщины прокатной полосы от заданной. Двухклетевой прокатный стан имеет две САРТ с тремя контурами регулирования (рисунок 40).

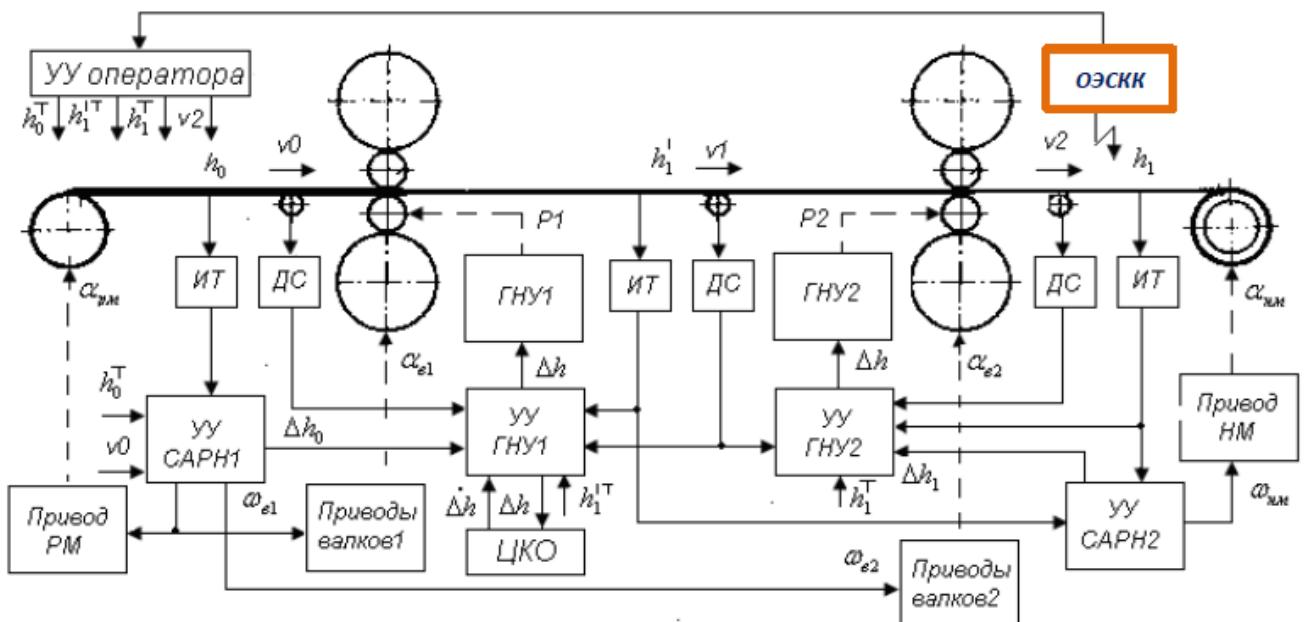


Рисунок 40 – Контуры управления САРТ

Первый контур регулирования натяжения полосы состоит из измерителя толщины (ИТ) полосы на входе в клеть, устройства управления системой авторегулирования натяжения (УУ САРН), привода первой моталки и приводов валков обеих клетей. Используя в качестве входного сигнала отклонение $\Delta h_0 = h_{03} - h_0$ толщины полосы на входе в клеть от заданной величины, контур определяет из-

менение положения нажимных валков через СУ ГНУ первой клети и созданию необходимого натяжения полосы. Натяжение перед входной клетью регулируется сигналом управления ω_{B_1} , воздействующим на привод разматывающей моталки (РМ) и приводы валков входной клети, которые определяют скорость движения полосы. Натяжение после первой клети создается приводами валков второй клети.

Второй контур регулирует толщину по постоянству секундного объема полосы проката на входе и выходе из клети

$$v_0 h_0 = v_1 h_1 = v_2 h_2 \text{ с учетом незначительного отклонения ширины полосы.}$$

Контур состоит из датчиков скорости (ДС), установленных на измерительных роликах по обе стороны клети, и СУ ГНУ. Показания ДС используются для измерения действительного обжатия полосы. Исходя из входной толщины полосы и действительного обжатия, рассчитывается выходная толщина. При отклонении полученного значения выходной толщины от заданного формируется выходной сигнал на перемещение ГНУ с целью компенсации возникшего рассогласования.

Исходя из того, что выходная скорость v_2 и толщина проката h_2 – заданные величины, скорость в остальных клетях рассчитывается:

$$v_0 = v_2 h_2 / h_0, v_1 = v_2 h_2 / h_1. \quad (12)$$

Для перехода к скоростям валков по клетям выражение (1) можно привести к виду (13) [91], используя определение опережения $s = \frac{v - v_0}{v_0}$ [92], где v_0 – круговая скорость валков, v – скорость выхода полосы из валков.

$$h_1 v_{B_1} (1 + s_1) = h_2 v_{B_2} (1 + s_2). \quad (13)$$

Третий контур регулирует толщину полосы по отклонению, стабилизируя усилия проката пропорционально средней составляющей требуемого обжатия. Входным сигналом является значение толщины полосы на выходе первой клети h_1 . В случае отклонения измеренного значения от заданного формируется сигнал коррекции регулятору, устраняющему рассогласование с помощью электромеханического нажимного устройства (ЭНУ).

Качество работы САРТ характеризуется отклонением выходной толщины от заданной. К факторам, влияющим на толщину полосы, относятся: скорость

прокатки, режим технологической смазки, температура рабочих и опорных валков, натяжение полосы между клетями и на моталке, колебания твердости и толщины по длине проката.

4.1.4 Моделирование контуров управления САРТ

Модель САРТ прокатного стана формируется из моделей рассмотренных контуров регулирования. В качестве входных данных для построения модели контура регулирования натяжения (САРН) используется толщина заготовки полосы проката h_0 , линейная скорость полосы v_2 и толщина полосы h_2 на выходе второй клети, относительный коэффициент обжатия по одной из клетей $K_{об_i}$ и передаточные функции контуров. Данные системы включают приводы валков по клетям и узлы «рабочие валки – полоса».

Принимая во внимание лишь запаздывание в передаче скорости, систему передачи скорости в первом приближении можно представить инерционным звеном с передаточной функцией (14).

$$W_{\text{пв}_i}(p) = \frac{K_{\text{пв}_i}}{T_{\text{пв}_i}p+1}, \quad (14)$$

где $K_{\text{пв}_i}$, $T_{\text{пв}_i}$ – коэффициенты передачи и постоянные времени контура регулирования скоростей i -ой клети,

$v_{i_{\text{п}}}$ – скорость движения полосы в i -й клети,

v_i – скорость движения полосы до i -й клети.

Тогда модель канала регулирования натяжения можно описать структурной схемой (рисунок 41), включающей элементы расчета скорости движения полосы до клети и блок передаточной функции системы передачи скоростей.

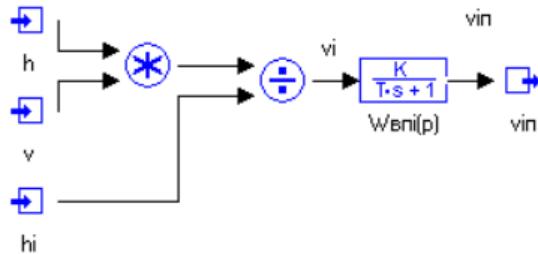


Рисунок 41 – Структурная схема модели канала регулирования натяжения

Учитывая динамику приводов валков и нажимных устройств, аналитическую связь между толщиной полосы проката после первой клети и задающими параметрами УУ оператора, а также параметрами клети можно выразить, представив толщину полосы $h_{1_{\Pi}}$ в виде суммы постоянной h_{1_c} и переменной Δh_1 составляющих. При этом h_{1_c} складывается из текущего значения раствора валков S_0 и отношения силы P воздействия ЭНУ к модулю жесткости клети M_k вида (15):

$$h_{1_c} = S_0 + \frac{P}{M_k}. \quad (15)$$

Переменная составляющая Δh_1 рассчитывается (16) из разности $\Delta S = S_0 - S_{0_3}$ текущей (17) и заданной ширины (18) раствора валков и отношения силы ΔP воздействия ГНУ к модулю жесткости клети [41] M_k .

$$\Delta h_1 = \Delta S + \frac{\Delta P}{M_k}. \quad (16)$$

$$S_0 = h_1 K_s - h_0 \cdot \frac{M_{\Pi}}{M_k}. \quad (17)$$

где K_s – передаточный коэффициент, определяющий связь между перемещением валков и изменением конечной толщины полосы,

M_{Π} – модуль жесткости полосы.

$$S_{0_3} = h_1 K_s - h_{0_3} \cdot \frac{M_{\Pi}}{M_k}. \quad (18)$$

Тогда силу воздействия ЭНУ P и ГНУ ΔP можно представить выражениями (19) и (20) соответственно.

$$P = (h_1 - S_0) M_k W_{\text{ЭНУ}}. \quad (19)$$

где $W_{\text{ЭНУ}}$ – величина воздействия ЭНУ.

$$\Delta P = (\Delta h_1 - \Delta S) M_k W_{\text{ГНУ}}. \quad (20)$$

где $W_{\text{ГНУ}}$ величина воздействия ГНУ.

ГНУ в первом приближении без учета свойств жидкости и валковой системы может быть представлено последовательным соединением инерционного и интегрирующего звеньев (рисунок 42). Передаточная функция ГНУ в разомкнутом состоянии имеет вид (21):

$$W_{ГНУ}(p) = \frac{K_{ГНУ}}{p(T_{ГНУ}p+1)}. \quad (21)$$

где $K_{ГНУ}$ – коэффициент передачи ГНУ в разомкнутом состоянии,

$T_{ГНУ}$ – постоянная времени гидроусилителя.

Аналогичный вид имеет и модель электро-нажимного устройства, отличающаяся большей инерционностью.

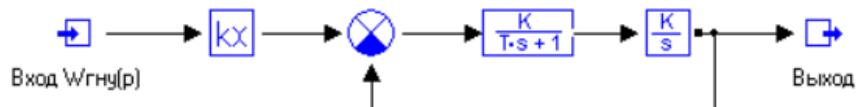


Рисунок 42 – Структурная схема модели нажимного устройства

Модель подката (заготовки) предлагается имитировать колебательным процессом: $h_{0_3} = h_0 + \Delta h_0 \cdot (\sin(\omega_1 l + \varphi_1) + \sin(\omega_2 l + \varphi_2))$.

На рисунке 43 представлен инструментарий моделирования технологических процессов двухклетевого стана [33].

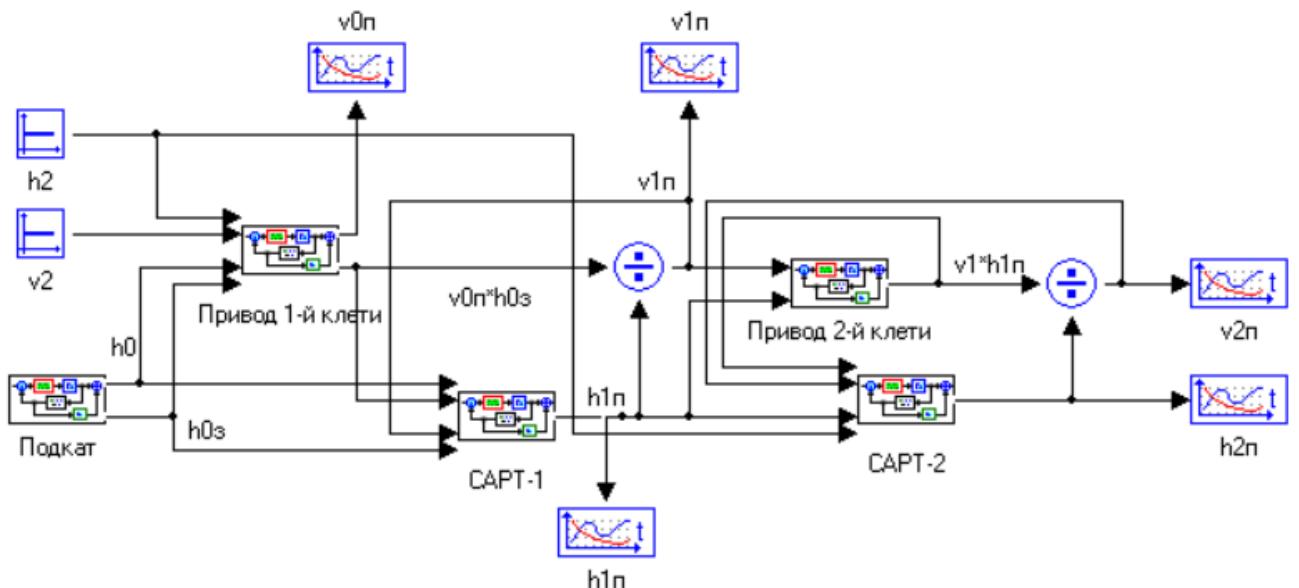


Рисунок 43 – Модель технологических процессов двухклетевого стана

Анализ выходных значений скорости и толщины полосы проката при изменении технологических параметров прокатки позволяет сделать вывод о наличии

или отсутствии некоторых типов дефектов (рисунок 44), а также сформировать набор статистических данных.

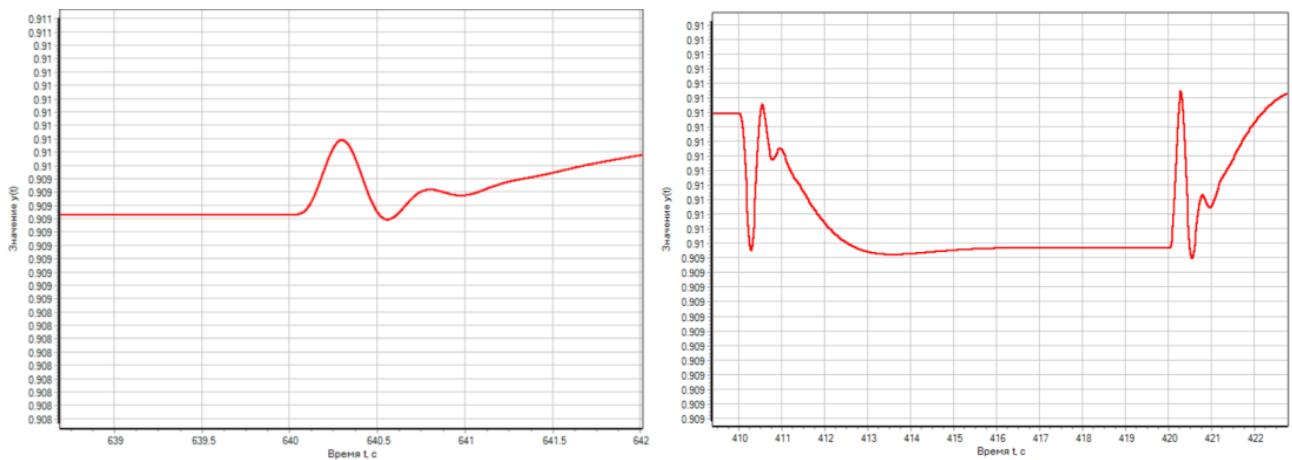


Рисунок 44 – Определение наличия дефекта по изменению выходных значений толщины полосы проката

Таким образом, предложенный моделирующий аппарат устанавливает связь задающих параметров прокатки и показателей качества листового металлопроката.

4.2 Планирование эксперимента и анализ результатов исследования

Для исследования эффективности разработанных решений в работе использован модельно-кибернетический (машинный) эксперимент [93], который является разновидностью модельного эксперимента и позволяет исследовать свойства объекта на основе его модельного представления и вычислительных алгоритмов. Эффективность использования имитационного моделирования при проведении экспериментальных исследований во многом определяется планом эксперимента, который устанавливает объем статистической выборки, порядок и приемы обработки результирующих данных. Одной из основополагающих задач эксперимента является определение взаимосвязей входных и выходных параметров объекта ис-

следования, а так же их представление в виде математической модели [94] (рисунок 45).

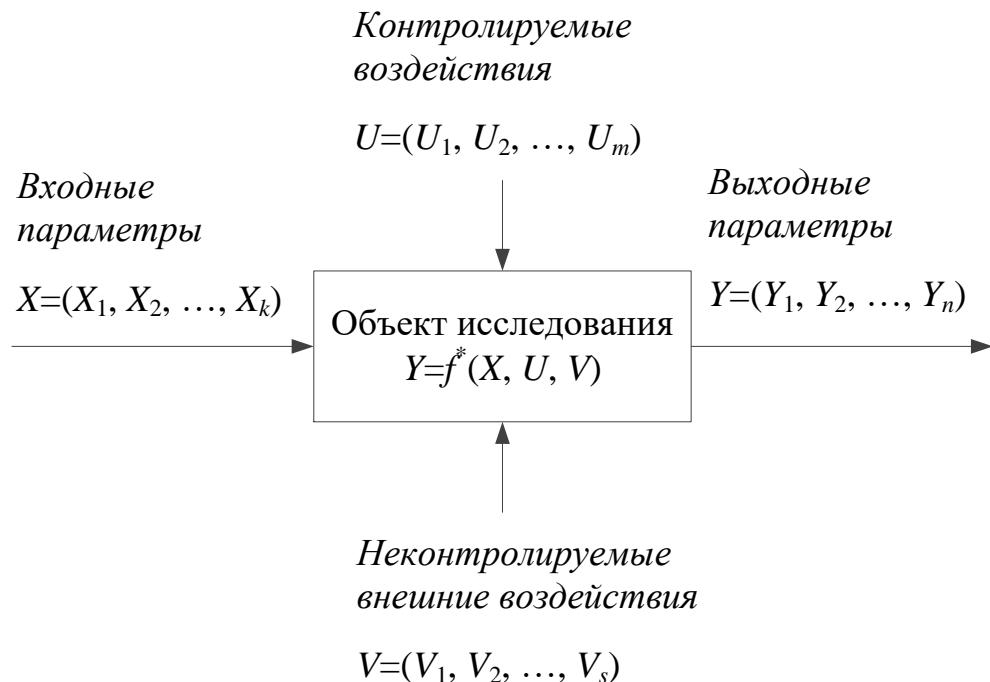


Рисунок 45 – Типовая структура объекта исследования

Поскольку целью экспериментальных исследований является оценка эффективности СППР по устранению дефектов поверхности листового металлопроката, задача эксперимента – получение объективных статистических данных о наличии дефектов, характеризующих качество поверхности листа, после изменения задающих параметров прокатки только на основе информации ОЭСКК и с учетом использования рекомендаций СППР по устранению выявленных дефектов.

Для исследования выбраны наиболее часто встречающиеся типы дефектов: отпечатки, царапина и риска. В качестве модели объекта исследования принята зависимость:

$$Y=f^*(X),$$

где Y – вектор признаков изображения области дефекта, X – фактор, характеризующий задающую скорость прокатки.

План эксперимента представлен на рисунке 46. Исследования проводились с применением среды SimInTech [95] на базе имитационной модели (рисунок 43) с учетом данных и рекомендаций по корректировке задающих параметров, полученных на производстве.

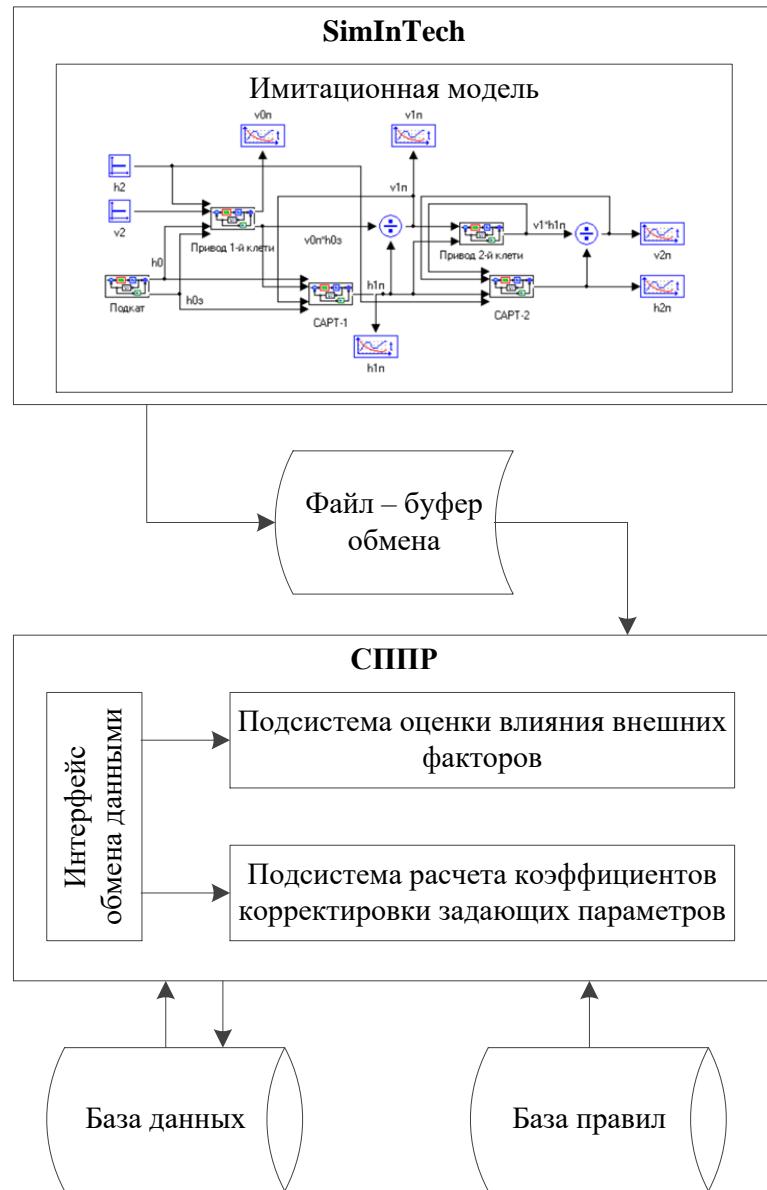


Рисунок 46 – Схема проведения имитационного эксперимента

Дефекты трех типов возникают случайным образом и регистрируются модулем, имитирующим ОЭСКК. Для каждого выявленного таким образом дефекта формируется вектор признаков изображения области дефекта и через интерфейс вывода данных сохраняются в файловом носителе, выполняющем роль

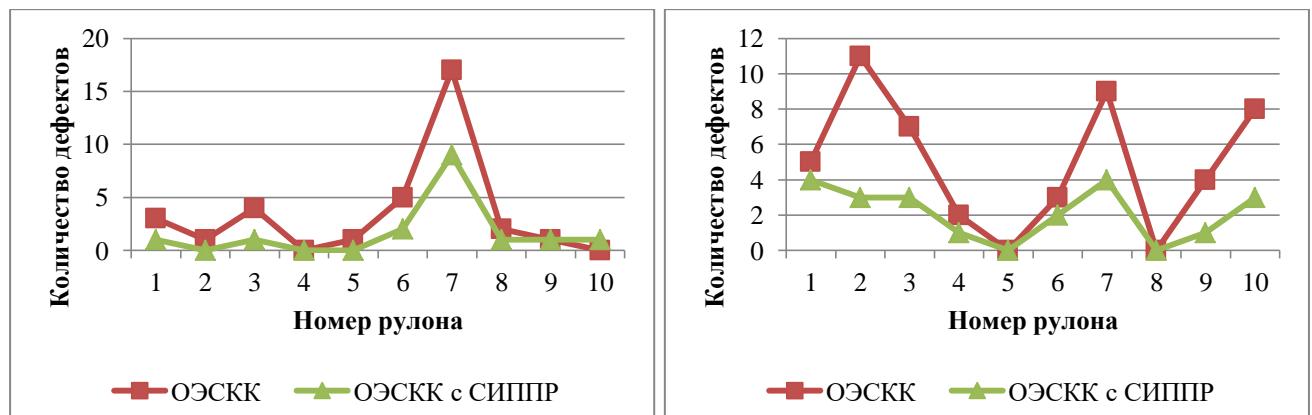
буфера. Модули СППР при появлении данных в буферном файле считывают информацию, выполняют анализ и по завершении имитационной моделью режима прокатки (одного пропуска ленты) вырабатывают рекомендации по изменению задающего параметра скорости.

В процессе имитационного моделирования прокатки десяти рулонов медной ленты получен набор данных о количестве и типе дефектов на завершающем пропуске при достижении требуемой толщины проката (таблица 9).

Таблица 9 – Результаты имитационного эксперимента

| Номер рулона | ОЭСКК | | | ОЭСКК с СППР | | |
|--------------|-----------|----------|-------|--------------|----------|-------|
| | Отпечатки | Царапина | Риска | Отпечатки | Царапина | Риска |
| 1 | 3 | 5 | 11 | 1 | 4 | 3 |
| 2 | 1 | 11 | 5 | 0 | 3 | 4 |
| 3 | 4 | 7 | 2 | 1 | 3 | 0 |
| 4 | 0 | 2 | 2 | 0 | 1 | 1 |
| 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 5 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| 7 | 17 | 9 | 5 | 9 | 4 | 1 |
| 8 | 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 9 | 1 | 4 | 3 | 1 | 1 | 2 |
| 10 | 0 | 8 | 2 | 1 | 3 | 1 |

Сравнительные характеристики устранения дефектов с использованием только ОЭСКК и с применением СППР представлены на рисунке 47.



a)

б)



в)

а) – тип дефекта «отпечатки»; б) – тип дефекта «царапина»; в) – тип дефекта «риска»

Рисунок 47 – Сравнительные характеристики устранения дефектов проката

Поскольку данные, полученные в процессе эксперимента, представляют собой случайные величины, для анализа эффективности СППР использованы оценки математического ожидания \bar{m}_y и дисперсии S^2 . С учетом того, что для анализа был использован малый объем выборки, расчетные значения необходимо дополнить интервальной оценкой δ математического ожидания. Оценки результатов имитационного эксперимента представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Оценки результатов имитационного эксперимента

| Оценка | ОЭСКК | | | ОЭСКК с СППР | | |
|-------------|-----------|----------|-------|--------------|----------|-------|
| | Отпечатки | Царапина | Риска | Отпечатки | Царапина | Риска |
| \bar{m}_y | 3,4 | 4,9 | 3,3 | 1,6 | 2,1 | 1,4 |
| δ | 3,1 | 2,3 | 1,9 | 1,7 | 0,9 | 0,8 |
| S^2 | 25,6 | 14,3 | 9,8 | 7,2 | 2,3 | 1,6 |
| S | 5,1 | 3,8 | 3,1 | 2,7 | 1,5 | 1,3 |

Таким образом, использование СППР в ОЭСКК может уменьшить среднее количество дефектов типа «отпечатки» на 47%, «царапина» – на 43%, «риска» - на 42%.

Для оценки качества поддержки принятия решений введена следующая гипотеза H_0 : в случае наличия дефектов типа d использование рекомендаций СППР

приведет к уменьшению уровня дефектности поверхности листа по данному типу дефекта. Ошибка первого рода α_d возникнет в том случае, если при наличии дефекта использование рекомендаций СППР не будет способствовать уменьшению значений его признаков (устранение дефекта не произойдет), ошибка второго рода β_d возникнет, когда в случае отсутствия дефекта использование рекомендаций СППР приведет к его возникновению.

1. Ошибка поддержки принятия решений первого рода определяется зависимостью:

$$\alpha_d = \frac{FI_d + FU_d}{N_d},$$

где N_d – количество испытаний, при которых возникли дефекты типа d ;

FI_d – количество испытаний, при которых в случае наличия дефектов типа d использование рекомендаций СППР не привело к изменению уровня дефектности поверхности листа по данному типу дефекта;

FU_d – количество испытаний, при которых в случае наличия дефектов типа d использование рекомендаций СППР привело к увеличению уровня дефектности поверхности листа по данному типу дефекта.

2. Ошибка второго рода:

$$\beta_d = \frac{FD_d}{N - N_d},$$

где N – количество испытаний;

FD_d – количество испытаний, при которых в случае отсутствия дефектов типа d использование рекомендаций СППР привело к их возникновению.

3. Полнота поддержки принятия решений:

$$r_d = \frac{TD_d}{N_d},$$

где TD_d – количество испытаний, при которых в случае наличия дефектов типа d использование рекомендаций СППР привело к уменьшению уровня дефектности поверхности листа по данному типу дефекта.

4. Точность поддержки принятия решений:

$$p_d = \frac{TD_d}{TD_d + FD_d}.$$

Сводная оценка качества поддержки принятия решений (F -мера) определяется зависимостью:

$$F_d = 2 \frac{r_d p_d}{r_d + p_d} \cdot 100\%.$$

В таблице 11 приведены результаты оценки качества поддержки принятия решений при имитационной прокатке десяти рулонах медной ленты с учетом десяти прогонов каждого рулона.

Таблица 11 – Оценка качества поддержки принятия решений

| Тип дефекта | N | N_d | FI_d | TD_d | FU_d | FD_d | α_d | β_d | r_d | p_d | $F_d, \%$ |
|-------------|-----|-------|--------|--------|--------|--------|------------|-----------|-------|-------|-----------|
| Риска | 100 | 27 | 5 | 20 | 2 | 2 | 0,26 | 0,03 | 0,74 | 0,91 | 82 |
| Царапина | 100 | 39 | 7 | 29 | 3 | 1 | 0,26 | 0,02 | 0,74 | 0,97 | 84 |
| Отпечатки | 100 | 18 | 0 | 17 | 1 | 1 | 0,06 | 0,01 | 0,94 | 0,94 | 94 |

Расчетные значения показывают, что качество поддержки принятия решений по устранению дефектов поверхности листового металлопроката типов «риска», «царапина», «отпечатки» составило 82%, 84% и 94% соответственно.

Таким образом, решена задача № 4. Результаты экспериментальных исследований разработанного прототипа программно-информационного средства свидетельствуют о повышении эффективности ОЭСКК при внедрении СППР по устранению дефектов листового металлопроката.

4.3 Направления дальнейших исследований

В качестве основных направлений дальнейших исследований могут быть рассмотрены:

1) повышение вычислительной эффективности алгоритмов поддержки принятия решений по устранению поверхностных дефектов;

- 2) декомпозиция факторов внешних воздействий на процесс холодной обработки металла давлением и уточнение модели изменения состояний поверхности листового материала;
- 3) развитие имитационной модели исследования закономерностей устранения поверхностных дефектов листового металлопроката.

Выводы по четвертой главе

Таким образом, выполнены экспериментальные исследования разработанного математического, алгоритмического, программно-информационного обеспечения и оценена их эффективность.

Имитационный эксперимент показал, что использование СППР в ОЭСКК может уменьшить среднее количество дефектов типа «отпечатки» на 47%, «царапина» – на 43%, «риска» – на 42%. Качество поддержки принятия решений по устраниению дефектов поверхности листового металлопроката типов «риска», «царапина», «отпечатки» составило 82%, 84% и 94% соответственно.

Определены основные направления дальнейших исследований.

Заключение

1. Выделены факторы внешней среды, оказывающие влияние на качество поверхности листового проката в процессе прокатки. Выполнено научное обоснование необходимости внедрения СППР в ОЭСКК на основе использования инструментальных средств исследования закономерностей устранения поверхностных дефектов листового металлопроката. Разработана концептуальная модель поддержки принятия решений по устранению дефектов поверхности листовых материалов на основе контура управления технической системой с ОЭСКК.
2. Разработано специальное математическое и алгоритмическое обеспечение СППР по управлению процессом устранения дефектов проката: модель области дефекта проката на основе признаков изображения поверхности листового металла; модель изменения состояний поверхности листового металла в процессе прокатки с учетом воздействия факторов, оказывающих влияние на качество поверхности проката; методика поддержки принятия решений по устранению дефектов поверхности листового металлопроката; алгоритм оценки уровня дефектности листового проката на основе анализа изображений поверхности; алгоритм расчета коэффициентов корректировки значений задающих параметров прокатки для устранимых типов дефектов; алгоритм построения Парето-оптимального множества альтернатив коэффициентов корректировки задающих параметров прокатки на основе векторов уровней дефектности поверхности проката; алгоритм расчета оценки влияния внешних факторов на качество поверхности листового проката.
3. Разработано программно-информационное обеспечение СППР в ОЭСКК по устранению дефектов листового металлопроката.
4. Выполнены экспериментальные исследования разработанного математического, алгоритмического, программно-информационного обеспечения и оценена их эффективность: использование СППР в ОЭСКК может уменьшить среднее количество дефектов типа «отпечатки» на 47%, «царапина» – на 43%, «риска» – на 42%.

Список использованных источников

- 1 Самойлович, Г. С. Неразрушающий контроль металлов и изделий: справочник. / Г. С. Самойлович, П. И. Беда, Б. И. Выборнов, Ю. А. Глазков, С. П. Луцько, Г. С. Шелихов. – М. : Машиностроение, 1976.
- 2 Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. –М.: Техносфера. – 2005. – 1072 с.
- 3 Соловьев, Н.А. Компьютерное зрение в задачах идентификации и распознавания поверхностных дефектов тонколистового проката: монография / Д. П. Бугаев, М. И. Кузьмин, Н. А. Соловьев; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2019 – 128 с.
- 4 Соловьев, Н. А. Концепция совершенствования АСУТП прокатного стана на основе компьютерного зрения / Н. А. Соловьев, С. А. Климацев // Университетская наука: решения и инновации : материалы Всерос. науч.-практ. конф., 23-25 окт. 2018 г., Оренбург / – Оренбург : ОГУ, 2018. – С. 78-81.
- 5 MVS-8600 Camera Link Frame Grabber. Line Scan Overview and Application [Электронный ресурс] / Cognex Corporation, 2006 – Режим доступа: https://www.cognex.com/support/downloads/ns/39/126/157/linescan_whitepaper0606.pdf
- 6 Quality right down the line [Электронный ресурс] / STEMMER IMAGING – Режим доступа: <https://www.stemmer-imaging.com/en-se/technical-tips/line-scan-cameras/>. – Загл. с экрана.
- 7 Кузьмин, М. И. Автоматизация обнаружения поверхностных дефектов листового проката / М. И. Кузьмин, Н. А. Соловьев // Перспектива. Сборник статей молодых ученых №15– Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2012. – С. 502-505.
- 8 Логунова, О. С. Алгоритмы и программное обеспечение распознавания низкоконтрастных изображений при оценке качества стали / О. С. Логунова, П. П. Макарычев // Программные продукты и системы. Тверь: ЗАО НИИ «Центрпрограммсистем». – 2008. – № 3. – С. 79-81.

9 Сирота, А. А. Некаузальные модели и алгоритмы генерации случайных полей / А. А. Сирота, Д. Н. Сергеев // Вестник ВГУ, серия: системный анализ и информационные технологии. – 2008. – №1. – С. 14-21.

10 Переберин, А. В. О систематизации вейвлет-преобразований / А.В. Переберин // Вычислительные методы и программирование. – 2001. – Т. 2, №. 2. –С. 133-158.

11 Новиков, Л. В. Основы вейвлет-анализа сигналов: Учебное пособие / Л. В. Новиков. – Спб.: Изд-во ООО «МОДУС+», 1999. – 152 с.: ил.

12 Бугаев, Д. П. Идентификация дефектов листового проката на основе вейвлетной кросскорреляции изображений / Д. П. Бугаев, Н. А. Соловьев // Естественные и технические науки. – 2013. – № 3. – С. 230-233.

13 Kuzmin, M. I. System of Computer Vision for Cold-Rolled Metal Quality Control / V. I. Batischev, M. I. Kuzmin, A. M. Pischukhin, N. A. Solovyov // International Review of Automatic Control (I.RE.A.CO.). – 2016. – Vol. 9, no. 4. – P. 259-263.

14 Мазур, И. П. Контроль качества поверхности листового проката / И. П. Мазур // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении : материалы 6-й международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А. Ф. Головина». – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2013. – С. 359-365.

15 Пат. 2546267 Российская Федерация, МПК B21C51/00. Способ и устройство для контроля поверхности отрезков полосы /Рихтер Ханс-Петер (DE), Ахенбах Дирк (DE); заявитель и патентообладатель СМС ЗИМАГ АГ (DE). – № 2013133966/02; заявл. 24.11.11; опубл. 10.04.15, Бюл. № 10 (II ч.). – 11 с.

16 Vmx Dequs: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ / Нигматуллин Ф.Т., Геращенко А.П.; правообладатель Общество с ограниченной ответственностью «ВидеоМатрикс» (ООО «ВидеоМатрикс») (RU).- № 2018614932 заявл. 05.02.2018 зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 19.04.2018. - 2018. - 1 с.

17 На форуме «АРМИЯ-2020» показали АРМИЛ: комплекс на базе искусственного интеллекта для контроля качества стали [Электронный ресурс] / Video Matrix. Industrial machine vision, 2020 – Режим доступа: <https://videomatrix.ru/naforume-armiya-2020-pokazali-armil-kompleks-na-baze-iskusstvennogo-intellekta-dlya-kontrolya-kachestva-stali/>. – Загл. с экрана.

18 Ермушева, И. Д. Автоматизированная система диагностирования поверхностных дефектов холоднокатаного листового проката цветных металлов / И. Д. Ермушева, Е. Г. Крылов, Н. В. Козловцева // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2023. – № 8(279). – С. 54-57.

19 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024666551 Российская Федерация. ML Sense Металлопрокат : № 2024665245 : заявл. 02.07.2024 : опубл. 15.07.2024 ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Норд Клан».

20 Видеоконтроль качества стали [Электронный ресурс] / AI Russia, 2020 – Режим доступа: <https://ai-russia.ru/library/steel-video-control>. – Загл. с экрана.

21 Соловьев, Н. А. Основы теории принятия решений для программистов: учебное пособие / Н.А. Соловьев, Е.Н. Чернопрудова, Д.А. Лесовой; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2012. – 187 с.

22 Садовникова, Н. П. Системы поддержки принятия решений : учеб. пособие / Н. П. Садовникова, Д. С. Парыгин, М. В. Щербаков ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2021. – 108 с.

23 Анфилатов, В.С. Системный анализ в управлении/ В.С. Анфилатов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин – М.: Финансы и статистика, 2002 – 368 с.

24 Игнатьев, А. А. Экспертная система поддержки принятия решения при контроле динамического качества шлифовальных станков / А. А. Игнатьев, А. В. Гаврилова, С. А. Игнатьев. – Саратов : Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2018. – 104 с.

25 Фатхинурова, И. Ф. Система информационной поддержки принятия решений в процессе контроля качества продукции ТЭК на основе онтологии / И. Ф. Фатхинурова // Студенческий. – 2019. – № 26-1(70). – С. 89-91.

26 Смирнов, В. А. Разработка концептуальной модели системы поддержки принятия решений для приемочного контроля бортовой аппаратуры / В. А. Смирнов, Д. В. Смирнов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2017. – Т. 18, № 1. – С. 149-159.

27 Управление качеством высокопрочного проката на основе эффективности выбора технологических параметров / А. В. Горбунов, А. В. Кузнецов, А. В. Антонов, М. В. Чукин // Труды Восьмого конгресса прокатчиков, Магнитогорск, 11–15 октября 2010 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский Дом печати, 2010. – С. 33-34.

28 Миков, А. Ю. Математическое обеспечение и структура системы интеллектуальной поддержки системы управления оценкой качества поверхности холоднокатаного проката / А. Ю. Миков, О. С. Логунова, А. В. Маркевич // Электротехнические системы и комплексы. – 2016. – № 1(30). – С. 45-51.

29 Гарбар, Е. А. Математическое и алгоритмическое обеспечение подсистемы интеллектуальной поддержки принятия решений при идентификации поверхностных дефектов стального листа в системе оптического контроля / Е. А. Гарбар, О. С. Логунова. – Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2023. – 155 с.

30 ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 1979-01-26. – Москва : Изд-во стандартов, 1979. – 21 с.

31 Васин, О. Е. Атлас дефектов: Научно-технический сборник. / О. Е. Васин, В. М. Югай, Р. А. Садртдинов, В. А. Подмогаев, В. Б. Гейцан, Н. К. Кареев, А. А. Селиванов. – Екатеринбург, 2008. – 56 с.

32 Найзабеков, А. Б. Обзор дефектов поверхности при холодной прокатке / А. Б. Найзабеков, В. А. Талмазан, А. С. Ержанов, Ф. М. Ерназарова, А. Т. Калдыбекова // Обработка материалов давлением. – 2017. – №1 (44). – С. 204-209.

33 Казаков, А. А. Неметаллические включения и природа дефектов холоднокатанного листа. Часть 1. Дефект «Пленка» / А. А. Казаков, П. В. Ковалев, А. Л.

Мясников, А. А. Дробинин, С. Д. Зинченко // Черные металлы. – 2006. – №2. – С. 32-37.

34 Казаков, А. А. Неметаллические включения и природа дефектов холоднокатанного листа. Часть 2. Дефекты, образовавшиеся на этапе прокатного производства / А. А. Казаков, П. В. Ковалев, Е. И. Козакова, С. Д. Зинченко, П. Б. Горелик // Черные металлы. – 2006. – №2. – С. 38-42.

35 Казаков, А. А. Неметаллические включения и природа дефектов холоднокатанного листа. Часть 3. Труднораспознаваемые дефекты / А. А. Казаков, П. В. Ковалев, Е. И. Козакова, С. Д. Зинченко, А. Л. Мясников, П. Б. Горелик // Черные металлы. – 2006. – №2. – С. 42-46.

36 ГОСТ 32597–2013. Медь и медные сплавы. Виды дефектов заготовок и полуфабрикатов. – Введ. 2015–01–01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 28 с.

37 ГОСТ 21014–2022. Металлопродукция из стали и сплавов. Дефекты поверхности. Термины и определения. – Введ. 2022–09–01. – Москва : Российский институт стандартизации, 2022. – 98 с.

38 Идентификация дефекта поверхности листового проката типа "вкапанная окалина" / А. Б. Сычков, Н. В. Копцева, Ю. Ю. Ефимова [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – № 11(1427). – С. 72-77.

39 Сторожев, М. В., Попов, Е. А. Теория обработки металлов давлением: Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977.

40 Комановский, А. З. Листопрокатное производство: справочник. – М. : Металлургия, 1979. – 280 с.

41 Анализ природы возникновения поверхностных дефектов холоднокатаного проката из IF-сталей / А. И. Зайцев, И. Г. Родионова, А. Д. Хорошилов [и др.] // Электрометаллургия. – 2012. – № 7. – С. 36-40.

42 Синицкий, О. В. Элементы современных технологических систем для обеспечения геометрии и формы листового проката / О. В. Синицкий, П. П. Польцов // Калибровочное бюро. – 2015. – №6. – С. 72-99.

43 Самедов, Я. Ю. Проблемы неразрушающего контроля прокатных валков / Я. Ю. Самедов // Дефектоскопия. – 2008. – №4. – С. 3-10.

44 Указ Президента РФ от 30.03.2022 № 166 «О мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ, 04.04.2022, № 14, ст. 22242.

45 Минпромторг России. Ведомственный проект «Цифровая промышленность» [Электронный ресурс] // Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. URL: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/vedomstvennyij-proekt-tsifrovaya-promyishlennost.pdf> (дата обращения: 07.08.2023).

46 Распоряжение Правительства РФ от 07.11.2023 г. № 3113-р «О стратегическом направлении в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности» // Официально опубликование правовых актов, 09.11.2023, № 0001202311090050.

47 Соловьев, Н. А. Системный анализ проблем производства тонколистового проката цветных металлов / Н.А. Соловьев, С.А. Климачев // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2019. – №1 (28). – С. 20-22.

48 Попов, А. И. Свободные инструменты проектирования информационных систем: учеб.-метод, пособие / А. И. Попов; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. - Архангельск: ИПЦ САФУ, 2012. - 78 с : ил.

49 Соловьев, Н. А. Инструментарий исследования закономерностей устранения поверхностных дефектов тонколистового металлопроката / Н. А. Соловьев, С. А. Климачев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – № 12. – С. 133-136.

50 Климачев, С. А. Имитационная модель системы авторегулирования толщины АСУ ТП прокатного стана / С. А. Климачев, Н. А. Соловьев // Инженерные технологии: традиции, инновации, векторы развития : сб. материалов VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 11-13 нояб. 2020 г., Абакан / Федер. гос.

бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Хакас. гос. ун-т им. Н. Ф. Катанова – Абакан : Изд-во Хакас. гос. ун-т им. Н. Ф. Катанова. – 2020. – С. 23-24.

51 Муравьев С.В., Погадаева Е.Ю. Автоматизированное распознавание дефектов сварных соединений при визуальном контроле с использованием геометрических признаков // Дефектоскопия. 2020. № 3. С. 49–57.

52 Силаков А.В., Варламова С.А., Котков П.В. Программное распознавание дефектов изображений регулярных текстур в текстильной промышленности // Технология текстильной промышленности. 2022. № 2 (398). С. 266–272.

53 Huang, Y.-C., Hung, K.-C., Lin, J.-C. Automated Machine Learning System for Defect Detection on Cylindrical Metal Surfaces, Sensors, 2022, vol. 22, Iss. 24. Doi: 10.3390/s22249783.

54 Привезенцев Д.Г., Мортин К.В., Жизняков А.Л., Титов Д.В Разработка сверточного слоя глубокой нейронной сети для определения дефектов металло-проката // Изв. Вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, №3. С. 202–207.

55 Zhou S., Zeng Y., Li S., Zhu H., Liu X., Zhang X. Surface Defect Detection of Rolled Steel Based on Lightweight Model. Appl. Sci. 2022, 12, 8905.

56 Гарбар Е.А., Логунова О.С. Математическое обеспечение подсистемы интеллектуальной поддержки принятия решений о проявлении дефектов на поверхности проката // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 8. С. 185–196.

57 Cuznar K., Glavan M. Optimization of cold rolling process recipes based on historical data // 2022 IEEE 21st Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON). 2022, pp.1–66.

58 Привезенцев, Д. Г., Жизняков, А. Л. Фрактальная модель цифрового изображения / Д. Г. Привезенцев, А. Л. Жизняков // Алгоритмы, методы и системы обработки данных, 2010. - № 15. – С. 147-152.

59 Штанчаев, Х. Б. Математическая модель представления изображения в системах распознавания образов / Штанчаев Х.Б. //Мир Науки, 2015. – № 2. – 11 с.

- 60 Копылов, И. В., Малыгин, Л. Л. Построение модели изображения и ее применение в задачах детектирования объектов / И. В. Копылов, Л. Л. Малыгин // Вестник Череповецкого государственного университета, 2014. - № 8. – С. 8-12.
- 61 Kuzmin M.I., Batischev V.I., Pischukhin A.M., Solovyov N.A. System of Computer Vision for Cold-Rolled Metal Quality Control. International Review of Automatic Control, 2016, vol. 9, no. 4, pp. 259–263.
- 62 Гарбар, Е. А. Признаки дефектов на изображении поверхности плоского проката / Е. А. Гарбар, О. С. Логунова // Программное обеспечение для цифровизации предприятий и организаций : сб. тр. Всеросс. Науч.-практ. Конференция, Магнитогорск, 14–16 июня 2021 года. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. Гос. Техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2021. – С. 68-71.
- 63 Макаров, А. О., Старовойтов, В. В. Быстрые алгоритмы вычисления признаков на цифровых изображениях. – Минск, 2005. – 39 с.
- 64 Глумов, Н. И. Обнаружение и распознавание объектов на изображениях: электрон. Учеб. Пособие / Н. И. Глумов, В. В. Мясников, В. В. Сергеев ; М-во образования и науки РФ, Самар. Гос. Аэрокосм. Ун-т им. С. П. Королева (нац. Исслед. Ун-т). – Самара, 2010.
- 65 Прэтт, У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – Кн. 2 – 480 с.
- 66 Астафьева, Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения, УФН, 166:11 (1996), 1145–1170; Phys. Usp., 39:11 (1996), 1085–1108
- 67 Яковлев, А. Н. Введение в вейвлет-преобразования: Учеб. Пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.
- 68 Каширина И.Л. Нейросетевые технологии: Учебно-методическое пособие для ВУЗов. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2008. – 72 с.
- 69 Круглов, В. В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. – М. : Физматлит, 2001. – 224 с.
- 70 Каллан, Роберт. Основные концепции нейронных сетей.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – с.: ил. Парал. Тит. Англ. ISBN 5-8459-0210-X (рус.)

- 71 Breiman L. Random forests // Machine Learning. 2001. Vol. 45, N 1. P. 5-32.
- 72 Чистяков С.П. Случайные леса: обзор / Труды Карельского научного центра РАН. 2013. N 1. С. 117-136.
- 73 В.Д. Ногин. Принятие решений при многих критериях. Учебно-методическое пособие. – СПб. Издательство «ЮТАС», 2007. – 104 с.
- 74 Ногин В.Д. Проблема сужения множества Парето: подходы к решению // "Искусственный интеллект и принятие решений". 2008, № 1, С. 98-112.
- 75 Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Анализ, синтез, планирование решений в экономике — М.: Финансы и статистика, 2000. — 368 с.: ил.
- 76 Волкова, Т. В. Проектирование компонентов автоматизированных систем в примерах : учебное пособие / Т. В. Волкова, Е. Н. Чернопрудова. – Оренбург : Оренбургский государственный университет, 2017. – 178 с. : табл., схем.
- 77 Соловьев, Н. А. Системы автоматизации разработки программного обеспечения: учебное пособие / Н. А. Соловьев, Е. Н. Чернопрудова, Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2012. – 191 с.
- 78 Волкова, Т. В. Проектирование и создание БД / Т. В. Волкова – Оренбург : ОГУ, 2006. – 140 с.
- 79 Дейт, К. Дж. Введение в системы баз данных, 8-е издание.: Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2005. – 1328 с.: ил. – Парал. тит. англ.
- 80 Frankie, Inguanez Entity Relationship Modelling [Электронный ресурс] / Frankie Inguanez, 2012 – Режим доступа: <https://cupdf.com/document/barkers-erd-notation-1.html>
- 81 Щелоков, С. А. Базы данных: учебное пособие/ С. А. Щелоков; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2014. – 298 с.
- 82 Синицын, С. В., Налютин Н. Ю. Верификация программного обеспечения: Курс лекций. - М.: МИФИ (ГУ), 2006. – 158 с.
- 83 Кулямин, В. В. Методы верификации программного обеспечения / В. В. Кулямин – М.: Институт Системного Программирования РАН, 2008. – 111 с.

- 84 Грудев, А. П. Технология прокатного производства: Учебник для вузов / А. П. Грудев, Л. Ф. Машкин, М. И. Ханин – М. : Металлургия, 1994. – 656 с.
- 85 Диомидов, Б. Б Технология прокатного производства: Учебник для вузов / Б. Б. Диомидов, Н.В. Литовченко – М. : Металлургия, 1979. – 488 с.
- 86 Дружинин, Н. Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. – М. : Металлургия, 1975. – 336 с.
- 87 ГОСТ 24.103-84 Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Автоматизированные системы управления. Основные положения. – Введ. 1985–07–01. – Москва : Изд-во стандартов, 1986. – 8 с.
- 88 Питкин, А. Н. Автоматизированная система управления технологическим процессом реверсивного стана «КВАРТО 400 ŠKODA» / А. Н. Питкин, С. М. Браун, С. М. Вахрушев // Цветные металлы. – 2004. – №. – С. 85-88.
- 89 Восканьянц, А. А. Автоматизированное управление процессами прокатки: Учеб. пособие / А.А. Восканьянц; Московский гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 85 с.
- 90 Целиков, А. И. Прокатные станы: Учебник для металлургич. специальностей вузов / А. И. Целиков, В. В. Смирнов. – М. : Металлургиздат, 1958. – 432 с.
- 91 Рудской, А.И. Теория и технология прокатного производства: Учеб. пособие / А.И. Рудской, В.А. Лунев – СПб.: Наука, 2008. – 527 с.
- 92 Куприн, М. И. Основы теории прокатки: Учебник для металлург. Техников / М. И. Куприн, М. С. Куприна. – М. : Металлургия, 1971. – 240 с.
- 93 Косенко, Е. А. Планирование эксперимента: учеб. пособие / Е.А. Косенко. – М.: МАДИ, 2023. – 202 с.
- 94 Задорожная, Е. А. Теория планирования эксперимента: учебное пособие / Е.А. Задорожная. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2018. – 92 с.
- 95 Карташов, Б. А. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech: Практикум по моделированию систем автоматического регулирования : учебное пособие / Б. А. Карташов, Е. А. Шабаев, О. С. Козлов, А. М. Щекатуров. — Москва : ДМК Пресс, 2017. — 424 с.

Приложение А

(обязательное)

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ



Рисунок А.1 – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

Приложение Б

(обязательное)

Акты внедрения результатов работы

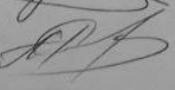
| | | |
|--|-------------------------|--|
|  МИНОБРНАУКИ РОССИИ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет» (ОГУ) | № г. Оренбург | «УТВЕРЖДАЮ» Проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» д-р физ.-мат. наук, профессор |
| | |  С. Н. Летута <i>«19» сентября 2025 г.</i> |
| АКТ использования результатов диссертационной работы Климачева Сергея Александровича на тему «Оптико-электронная система контроля качества листового металлопроката со средствами интеллектуальной поддержки решений по устранению дефектов» | | |
| <p>Комиссия в составе: председателя – заведующего кафедрой программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем (ПОВТАС) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» (ОГУ), канд. техн. наук, доцента Горбачева Д. В.; членов комиссии: заведующего кафедрой математики и цифровых технологий, канд. пед. наук, доцента Шухмана А. Е., доцента кафедры ПОВТАС, канд. техн. наук, доцента Семенова А. М. составила настоящий акт в том, что материалы диссертационной работы Климачева С. А. используются в образовательном процессе:</p> <ul style="list-style-type: none"> – по профилю подготовки обучающихся-бакалавров «Разработка программно-информационных систем» направления 09.03.04 Программная инженерия в дисциплинах «Автоматизация технологии разработки программного обеспечения», «Исследование операций»; – по программе магистратуры «Разработка информационно-телекоммуникационных систем» направления 09.04.04 Программная инженерия в дисциплине «Теория систем и системный анализ». <p>Председатель комиссии: канд. техн. наук, доцент  Д. В. Горбачев</p> <p>Члены комиссии: канд. пед. наук, доцент  А. Е. Шухман канд. техн. наук, доцент  А. М. Семенов</p> | | |

Рисунок Б.1 – Акт использования результатов работы в учебном процессе
 Оренбургского государственного университета

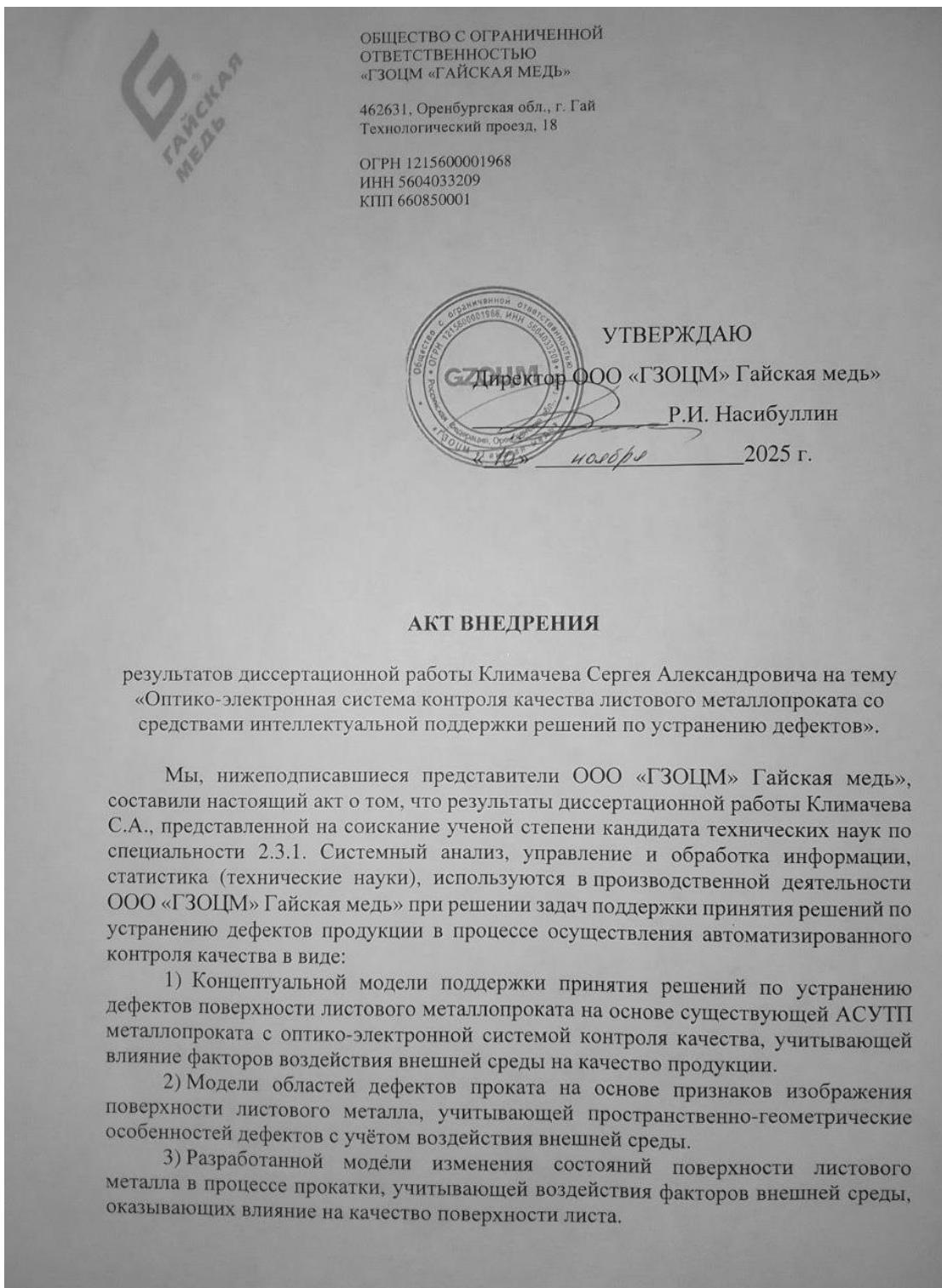


Рисунок Б.2 – Акт внедрения результатов работы в ООО «ГЗОЦМ» Гайская медь»

4) Алгоритм поддержки принятия решений по устранению дефектов поверхности листового металлопроката *отличающихся* решением задачи в два этапа: построение множества Парето-оптимальных альтернатив устранения дефектов, если полученное множество не однозначно, выбирается лучшая альтернатива по критерию уровня дефектности, оцениваемого на основе признаков изображения области дефекта по многопараметрической модели изменения состояний поверхности металлопроката.

Использование предложенных разработок позволяют автоматизировать информационные процессы поддержки принятия решений по устранению дефектов листового металлопроката и повысить эффективность существующей оптико-электронной системы контроля качества.

Начальник ПТО

ООО «ГЗОЦМ» Гайская медь»


O.B. Гребень

Ведущий инженер-
технолог ПТО


B.A. Толстоноженко

Рисунок Б.2, лист 2