

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Чан Дык Хиеу



ЦИФРОВЫЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ
ДЛЯ ЛИТЬЯ И ПРОКАТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Бажин В.Ю.

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----------|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ АСУ ТП В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛИСТОВОЙ ПРОКАТНОЙ ЗАГОТОВКИ | 11 |
| 1.1 Анализ процесса производства прокатных заготовок из алюминиевого сплава | 11 |
| 1.1.1 Глобальные тенденции развития производства алюминиевых прокатных заготовок | 18 |
| 1.1.2 Требования к качеству прокатной заготовки и их связь с параметрами технологического процесса | 21 |
| 1.1.3 Физико-металлургические процессы при кристаллизации алюминиевых сплавов..... | 22 |
| 1.1.4 Международные стандарты и нормативы в производстве алюминиевых заготовок | 23 |
| 1.1.5 Современные технологические линии: уровни автоматизации и цифровой интеграции | 24 |
| 1.1.6 Основные проблемы традиционных технологий получения заготовок..... | 24 |
| 1.1.7 Сравнительный анализ традиционного и бесслиткового метода производства | 26 |
| 1.2 Состояние АСУ ТП в производстве прокатной заготовки из алюминиевых сплавов..... | 26 |
| 1.3 Современные тенденции развития АСУ ТП в производстве прокатной заготовки из алюминиевых сплавов..... | 33 |
| 1.4 Цели и задачи исследования..... | 34 |
| 1.5 Выводы по главе 1 | 34 |
| ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ В БЕССЛИТКОВОЙ ПРОКАТКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ..... | 36 |
| 2.1 Современные подходы к выбору способа управления температурным режимом | 36 |
| 2.2 Исследование и создание математической модели температурного режима зоны контакта между расплавом и валками-кристаллизаторами в процессе бесслитковой прокатки..... | 45 |
| 2.3 Анализ и верификация математической модели температурного режима в бесслитковой прокатке..... | 64 |

| | |
|---|------------|
| 2.4 Выводы по главе 2 | 69 |
| ГЛАВА 3 ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ БЕССЛИТКОВОЙ ПРОКАТКИ | 71 |
| 3.1 Изучение структурно-функциональной организации системы управления процессом бесслитковой прокатки | 71 |
| 3.2 Алгоритм контроля основных параметров процесса бесслитковой прокатки.. | 78 |
| 3.3 Разработка программы контроля основных параметров процесса бесслитковой прокатки..... | 82 |
| 3.4 Вывод по главе 3 | 88 |
| ГЛАВА 4 КОНТРОЛЬ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА БЕССЛИТКОВОЙ ЗАГОТОВКИ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 8XXX | 90 |
| 4.1 Влияние химического состава на формирование структуры и свойств | 90 |
| 4.2 Методы и алгоритмы оперативного контроля | 97 |
| 4.3 Разработка алгоритма корректировки химического состава и программного обеспечения..... | 104 |
| 4.4 Экономическая эффективность проекта | 109 |
| 4.5 Вывод по главе 4 | 112 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 114 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 116 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025613075 | 131 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025689974 | 132 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В Акт о внедрении результатов диссертации | 133 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Бесслитковая прокатка (БП) – совмещенный способ литья и прокатки алюминиевых сплавов является альтернативным решением классическим технологиям получения листового проката из слитка. Несмотря на высокую техническую оснащенность процесса БП, во время подготовки сплава к литью и особенно при его прокатке имеется большое количество неконтролируемых параметров на всех этапах производства, что приводит к снижению производительности процесса и качества прокатных заготовок.

Температурный режим при производстве алюминиевых заготовок на агрегатах бесслитковой прокатки является одним из ключевых факторов, влияющих на качество микроструктуры и самой листовой заготовки, поскольку влияет на количество термических дефектов и определяет общую эффективность технологического процесса, в том числе механические свойства листовых заготовок. В условиях бесслитковой прокатки алюминиевых сплавов управление тепловым балансом (температурным режимом) имеет особое значение из-за высокой скорости кристаллизации при интенсивном теплообмене в системе «расплав – валки-кристаллизаторы» при ограниченном времени воздействия управляющих сигналов и изменении температурного режима. Существующие системы автоматического управления технологическими процессами (АСУ ТП) не обеспечивают требуемой точности регулирования температуры, так как они основываются на статических моделях и не учитывают нестационарное состояние процесса теплопередачи процесса БП, основываясь на аналоговых моделях и экспертных оценках. В этой связи для процесса бесслитковой прокатки необходим ввод цифровой платформы для обеспечения более качественного контроля и управления параметрами через систему АСУ.

Современное развитие алюминиевой промышленности во Вьетнаме, включая рост производства алюминиевого проката и фольги на основе новых способов для строительной, энергетической и пищевой отраслей, сопровождается внедрением энергосберегающих и цифровых технологий. С другой стороны, большинство

предприятий по-прежнему используют традиционные способы литья и прокатки из слитка, отличающиеся высокой энергоемкостью, низкой производительностью производства листового проката, что приводит к значительным потерям металла. Необходимость создания цифровой базы данных технологических параметров для стабильности и точности работы систем автоматизированного контроля и управления процессом БП связана с наличием большого количества неконтролируемых параметров и высокой долей кратковременных измерений, что приводит к существенным материальным и энергетическим затратам. Актуальность работы обусловлена разработкой в рамках цифровой платформы дополнительных точек контроля и внедрением адаптивных и прогнозирующих алгоритмов регулирования температурного режима через цифровые сигналы, интегрированных как в блоки программного обеспечения (ПО), так и в действующую систему АСУ ТП, способных учитывать динамику тепловых процессов в зоне контакта расплава и валков в зависимости от химического состава расплава во время всего процесса литья и самой листовой заготовки во время ее прокатки в зазоре валков-кристаллизаторов агрегата БП.

Степень разработанности темы исследования

Вопросами внедрения специальных автоматизированных систем в технологические процессы литья и прокатки алюминиевых сплавов занимались известные российские ученые и специалисты: Черняк С.Н., Добаткин В.И., Зинченко В.П., Арышенский В.Ю., Дриц А.М., Гречников Ф.В., Зенцов А.И., Эльдарханов А.С., Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Баранов М.В., Бажин В.Ю., а также зарубежные ученые: Naga T., Suzuki S., M. Yun, Slokyer J. D. и др. Значительный вклад в эту работу внесли также крупные фольгопрокатные предприятия – Михайловский алюминиевый завод (Михалюм), Саянский алюминиевый завод (СаАЗ), а также институты ВАМИ (Санкт-Петербург) и ВИЛС (Москва). Эти исследования охватывают широкий круг различных совмещенных процессов литья и прокатки алюминиевых сплавов, включая разработку и применение систем автоматизированного управления. Но само время ограничивало возможность широкого использования цифровизации автоматизированных систем.

Применение цифрового моделирования отдельных стадий процесса литья при помощи ПИД-регуляторов дает возможность идентификации численных моделей и оптимизации нового поколения АСУ в металлургии.

Объект исследования – агрегат бесслитковой прокатки для производства листовой заготовки алюминиевой фольги.

Предмет исследования – цифровая система автоматизированного управления совмещенным процессом литья и прокатки высоколегированных алюминиевых сплавов.

Цель работы – повышение эффективности процесса бесслитковой прокатки высоколегированных алюминиевых сплавов в заданных интервалах температуры процесса с учетом изменения химического состава.

Идея работы заключается в интеграции дополнительных средств и точек контроля технологических параметров для расширения функций управления процессом производства листовых заготовок и в создании цифровой автоматизированной системы регистрации температурного режима бесслитковой прокатки при изменении марки (химического состава) алюминиевого сплава.

Задачи исследования:

1. Выполнить параметрический анализ на основе существующих технологий литья и прокатки алюминиевых сплавов и изучить опыт применения АСУ ТП, используемых в производстве листовой заготовки и проката.

2. Обосновать выбор дополнительных участков контроля температуры для создания цифровой платформы АСУ ТП на всех этапах процесса литья и прокатки с учетом математического моделирования температурного режима литья и прокатки заготовки.

3. Разработать алгоритм и программное обеспечение контроля основных параметров теплового режима процесса бесслитковой прокатки для интеграции в существующие системы АСУ ТП на основе созданной цифровой платформы.

4. Обосновать внедрение дополнительной системы контроля химического состава на всех стадиях процесса бесслитковой прокатки для повышения качества заготовки.

Научная новизна работы:

1. Научно обоснованы нестационарные режимы теплопереноса с учетом скрытой теплоты кристаллизации заготовки с получением нелинейных зависимостей теплопроводности и теплоемкости от температуры на основе цифровой математической модели теплового состояния системы «расплав – валки-кристаллизаторы».

2. Для достоверности цифровой платформы АСУ ТП определены критические зоны значений температурных градиентов в области контакта «расплав – валки-кристаллизаторы», оказывающие наибольшее влияние на равномерность затвердевания и качество поверхности листовой заготовки.

3. Доказано, что цифровая модель контроля температурного режима процесса бесслитковой прокатки базируется на данных о нестационарном теплопереносе в зоне кристаллизации и обеспечивает формирование оптимальных управляющих воздействий в заданном горизонте прогнозирования с учетом запаздывания сигнала отклонения.

4. Контроль химического состава при согласовании с температурным режимом литья и прокатки высоколегированных алюминиевых сплавов при управляющем воздействии на систему регулирования параметрами обеспечивает равномерную мелкозернистую структуру листовой заготовки и улучшение механических свойств листовых заготовок.

Соответствие паспорту специальности. Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами по пунктам:

1 «Автоматизация производства заготовок, изготовления деталей и сборки».

2 «Автоматизация контроля и испытаний».

17 «Разработка методов обеспечения совместимости и интеграции АСУ, АСУТП, АСУП, АСТПП и других систем и средств управления».

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработан и обоснован алгоритм управления температурой при бесслитковой прокатке алюминиевых сплавов, который использует адаптивную

систему регулирования, учитывающую запаздывание информации значений температур и обеспечивающую стабилизацию заданной температуры в зоне «расплав – валки-кристаллизаторы»;

Разработанный программный модуль (свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025613075, № 2025689974) внедрен и апробирован в производственных условиях на Михайловском алюминиевом заводе ОК «РУСАЛ» (акт внедрения от 25.02.2026 г., Приложение В) и на предприятии во Вьетнаме.

Методология и методы исследования

Исследование проведено с использованием методов научного обобщения, сравнительного анализа, математического моделирования и численного эксперимента. Проведен параметрический анализ литературных источников, патентных материалов и научных публикаций, который позволил определить современные направления развития систем управления температурными режимами при бесслитковой прокатке алюминиевых сплавов для выявления существующих недостатков традиционных схем регулирования и АСУ.

Построение моделей и численные расчеты выполнялись с применением программных средств Python по разработанным алгоритмам температурных режимов с учетом теплопередачи и фазовых превращений в зоне контакта «расплав – валки-кристаллизаторы». Для описания тепловых процессов использовались дифференциальные уравнения нестационарной теплопроводности с учетом скрытой теплоты кристаллизации и изменений теплофизических свойств алюминиевого сплава различного химического состава в зависимости от температуры при помощи ПО Thermo-Calc.

Положения, выносимые на защиту:

1. Управление температурным режимом процесса бесслитковой прокатки алюминиевых сплавов по цифровой математической модели обеспечивает автоматическую корректировку технологических параметров с минимальным запаздыванием в пределах допустимых отклонений 3–5% во время процесса получения листовой заготовки.

2. Контроль и корректировка химического состава сплавов системы Al–Fe–Si–Mn на всех стадиях производства с учетом отклонения температурного режима и параметров литья и прокатки формирует равномерную мелкозернистую структуру и улучшает механические свойства листовой заготовки на 10–12%.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается использованием корректных методов теоретического и экспериментального анализа, применением математического моделирования процессов теплопередачи и кристаллизации, а также проверкой полученных данных на основе промышленных измерений процесса на агрегатах бесслитковой прокатки.

Результаты исследования подтверждаются публикациями в рецензируемых научных изданиях и апробацией на международных и российских научно-практических мероприятиях.

Апробация результатов диссертации проведена на 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных. За последние 3 года принято участие в 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных:

1. Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные исследования в науке и образовании» (07 июня 2024 года, г. Санкт-Петербург).

2. Международный семинар «Нанозифика и наноматериалы», посвященный 300-летию Российской академии наук и 145-летию со дня рождения профессора Горного института Веймарна Петра Петровича (20-21 ноября 2024 года, г. Санкт-Петербург).

3. VI международная научная конференция «Теория и методика фундаментальных и прикладных научных исследований» (15 ноября 2024 года, г. Санкт-Петербург).

4. XX Всероссийская конференция-конкурс студентов выпускного курса и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (01–07 декабря 2024 года, г. Санкт-Петербург).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и формулировке задач исследования; в разработке методологии и структуры работы; в проведении анализа

научно-технической литературы и патентного поиска по тематике автоматизированных систем управления процессами бесслитковой прокатки алюминиевых сплавов; в создании программного обеспечения для контроля и оптимизации технологических параметров литья и прокатки; в обобщении полученных результатов и подготовке научных публикаций.

Публикации. Результаты диссертационной работы освещены в 8 печатных работах (пункты списка литературы № 4 – 6, 8 – 10, 50, 51), в том числе в 3 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (пункты списка литературы № 34 – 35, Приложения А, Б).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 121 наименование, и 3 приложений. Диссертация изложена на 134 страницах машинописного текста, содержит 27 рисунков и 9 таблиц.

ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ АСУ ТП В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛИСТОВОЙ ПРОКАТНОЙ ЗАГОТОВКИ

1.1 Анализ процесса производства прокатных заготовок из алюминиевого сплава

Во Вьетнаме формирование и ведение алюминиевого расплава в последние годы осуществляется в условиях высокой зависимости от внешних поставок металла для последующих переделов. Сырьевой поток включает первичный алюминий, сплавы в чушках и ряд полуфабрикатов, в том числе литые и деформируемые заготовки, которые либо используются непосредственно, либо подвергаются переплаву с корректировкой химического состава под требования конкретного производства. Такая структура обеспечения металлом переводит расплавный передел из вспомогательной операции в ключевое звено обеспечения качества, поскольку именно на стадии расплава согласуются свойства поступающего сырья и требования к прокатной заготовке. Технологическая устойчивость процесса при этом определяется вариативностью входных материалов (партии первичного металла, возврат, лом, шихтовые добавки), условиями транспортировки и хранения, а также выполнением экологических и таможенных требований к импортируемому вторичному сырью.

Существенным источником металла для переплава является алюминиевый лом и отходы, используемые при наличии мощностей по подготовке, сортировке и рафинированию [2, 23]. По товарной позиции отходы и лом алюминия объемы внешних поставок во Вьетнам остаются значительными: по данным международной таможенной статистики, в 2024 г. основными поставщиками выступали Япония, Европейский союз и США, а суммарные поставки составили порядка 267,9 млн долл. США при массе около 137,2 тыс. т. Данная картина отражает объективную потребность промышленности в доступном сырье для переплава и одновременно повышает требования к управлению расплавом, поскольку лом как шихтовая составляющая характеризуется большей неоднородностью по химическому составу, содержанию неметаллических включений и газонасыщенности по сравнению с первичным металлом.

С технологической точки зрения на вьетнамских предприятиях, выпускающих деформируемые полуфабрикаты, алюминиевый расплав обычно получают переплавом шихты с последующим рафинированием и корректировкой состава до заданного сплава [41]. Качество расплава при этом рассматривается как ключевой промежуточный результат, определяющий стабильность разливки и дальнейшей обработки. Главная особенность связана со смешанной шихтой: первичный металл обеспечивает более предсказуемую чистоту, а лом и возврат повышают разброс по содержанию примесей и неметаллических включений. Поэтому контроль должен включать не только проверку марочного состава, но и оценку состояния расплава по трем направлениям: химический состав, газонасыщенность (прежде всего водород) и загрязненность включениями и продуктами окисления [116]. Даже при правильном подборе шихты именно водород и включения чаще всего становятся причиной дефектов заготовки и снижения выхода годного. В ответ усиливается стандартизация подготовки расплава: удаление шлака, применение флюсов, дегазация инертными газами и фильтрация перед заливкой [27, 85, 111]. При работе с импортным ломом процесс становится более чувствительным, поэтому устойчивое качество достигается за счет управляемых режимов и корректировок на основе измеряемых параметров, а не усредненных настроек.

Процесс производства прокатных заготовок из алюминиевого сплава представлен на рисунке 1.1.

1 этап. Подготовка сырья

Подготовка сырья является первым этапом производства прокатных заготовок из алюминиевого сплава. Перед началом производственного процесса необходимо выбрать и классифицировать сырье. При использовании бокситового сырья сначала получают глинозем (Al_2O_3), затем осуществляют электролитическое восстановление алюминия и его последующее рафинирование. Если в качестве сырья применяется алюминиевый лом, его разделяют по степени чистоты и химическому составу. Перед переплавом материал очищают от пыли, жировых загрязнений, оксидной пленки, силикатных включений и других примесей с

применением механических, химических или комбинированных методов. После подготовки сырья, как правило, брикетируют либо измельчают и направляют на следующий этап технологического цикла.

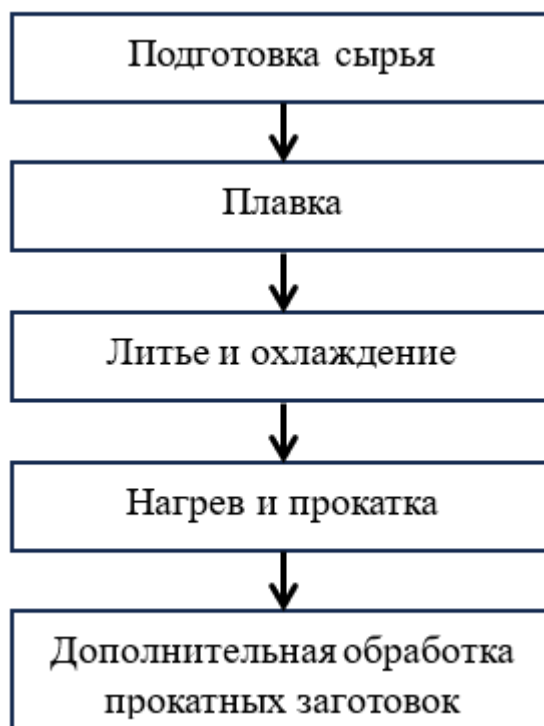


Рисунок 1.1 – Технологический процесс производства прокатных заготовок из алюминиевого сплава (составлено автором)

2 этап. Плавка

Перед плавкой печь должна быть в хорошем состоянии и чистой. Любые примеси в печи могут повлиять на качество конечного продукта. Футеровка печи также должна выдерживать высокие температуры и не вступать в химическую реакцию с алюминиевым сплавом. Подготовленное сырье загружается в печь и нагревается до температуры 660–750°C [45]. Когда сырье достигает жидкого состояния, в него в соответствующих дозах добавляются добавки, такие как Si, Mg, Cu, Zn, Fe, Ti, Mn..., и тщательно перемешиваются для получения алюминиевого сплава с желаемыми механическими свойствами. Наконец, в расплавленный сплав добавляют флюс, дегазирующий агент, легирующий агент и средство защиты поверхности. Эти добавленные вещества помогают удалить примеси, растворенный водород; уменьшить пористость, скорректировать состав алюминиевого сплава и ограничить окисление алюминия [27, 85, 111].

3 этап. Литье

После плавления расплавленный алюминиевый сплав разливают в заранее подготовленные формы для подготовки к процессу охлаждения. Существует два основных метода литья: непрерывное литье и полунепрерывное литье. Многие технические аспекты двух методов показаны в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Сравнение технических параметров методов непрерывного и полунепрерывного литья [14, 29, 43]

| Критерии | Полунепрерывное литье | Непрерывное литье |
|---|-----------------------|-------------------|
| Скорость вытягивания заготовки (мм/мин) | 50–300 | 2000–6000 |
| Скорость заливки (кг/мин) | 100–000 | 500–5000 |
| Длина заготовки (мм) | 1000–6000 | Непрерывная длина |
| Пористость (%) | <0,5 | 1–2 |
| Остаточное напряжение (МПа) | низкий (<50) | высокий (> 100) |
| Уровень потери металла | 3–5% | <1% |

При полунепрерывном методе литья жидкий алюминий заливается в вертикальную или горизонтальную форму, а для непосредственного охлаждения формы используется вода. Медленная скорость охлаждения приводит к медленному затвердеванию. Вот почему алюминий имеет высокую чистоту, крупную кристаллическую структуру и меньше пузырьков воздуха. Затвердевшую заготовку вытаскивают и разрезают на куски заданного размера. Данным методом можно изготавливать крупногабаритные заготовки диаметром от 150 до 600 мм.

При непрерывном литье жидкий алюминий непрерывно заливается в охлаждающий конвейер или вращающуюся форму для формирования длинных полос или прутков. Существенным преимуществом непрерывного литья является высокая степень автоматизации, позволяющая снизить зависимость процесса от постоянного присутствия оператора, характерную для полунепрерывных схем. Высокая скорость затвердевания обеспечивает эффективность метода при массовом выпуске тонколистовой продукции и длинномерных полуфабрикатов [109]. Дополнительным достоинством является более полное использование сырья и сокращение технологических отходов. Вместе с тем интенсификация затвердевания повышает вероятность образования газовых дефектов, что требует

применения эффективной дегазации и значительных капитальных вложений в оборудование.

После завершения литья заготовка подвергается дальнейшему охлаждению, необходимому для стабилизации кристаллической структуры и снижения уровня остаточных напряжений. При последующей горячей прокатке неравномерное тепловое расширение может вызывать растрескивание либо деформацию заготовки [75, 87]. Охлаждение осуществляют как принудительными способами с использованием воды или воздуха, так и в режиме естественного теплоотвода.

4 этап. Нагрев и прокатка

После охлаждения заготовку нагревают до температуры 450–500°C, чтобы обеспечить гибкость материала и не допустить растрескивания. Нагретая заготовка подается в стан, проходя через ряд валков для уменьшения толщины заготовки. Параметры температуры, скорости и давления должны контролироваться и поддерживаться оптимальным образом, сводя к минимуму дефекты и обеспечивая равномерную деформацию [76]. Если скорость прокатки слишком высокая, это может легко привести к растрескиванию поверхности из-за быстрых перепадов температуры, которые трудно контролировать. С другой стороны, если температура прокатки высокая, это повлияет на качество поверхности, в противном случае материал будет твердым и его будет трудно деформировать. Полученная прокатная заготовка имеет большую толщину и требует обработки на следующем этапе.

5 этап. Дополнительная обработка прокатных заготовок

После горячей прокатки прокатанная заготовка подвергается термической и механической обработке, а также контролируемому охлаждению [28, 119]. На этом этапе, когда выполнены температурные требования и завершена обработка поверхности прокатанной заготовки, ее продолжают подвергать холодной прокатке с получением пластин, рулонов, полос и алюминиевой фольги [9].

Процесс беслитковой прокатки

Для процесса беслитковой прокатки шаги 1 и 2 такие же, как описано выше. После расплавления жидкая металлическая смесь разливается непосредственно через валки. Здесь происходят процессы кристаллизации, охлаждения и прокатки

[25, 118]. Далее следует дополнительная обработка прокатной заготовки, как и при традиционном способе производства.

Производственный процесс с использованием технологии бесслитковой прокатки имеет существенные преимущества по сравнению с традиционными производственными процессами. Это можно рассматривать как усовершенствованный процесс производства методом непрерывного литья. После этапа плавки, промежуточный процесс пропускается, а совмещенный процесс литья и прокатки производятся напрямую [39]. В данной работе не рассматривается влияние стадии прокатки после получения прокатной заготовки, а учитываются только факторы, влияющие на процесс получения прокатной заготовки. Исключение процессов охлаждения и нагрева после литья приводит к экономии энергии и сокращению времени производства [45, 109]. Получаемая заготовка отличается меньшим количеством дефектов, более точным контролем толщины и других физических свойств. Сравнение некоторых аспектов двух методов производства показано в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Сравнение технических параметров метода бесслитковой прокатки и традиционного метода [42, 68]

| Критерии | Метод бесслитковой прокатки | Традиционный метод |
|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Скорость замерзания (°C/с) | 1 - 10 | 50 - 100 |
| Скорость прокатки (м/мин) | 0,05-6 | 30 - 60 |
| Потребление энергии (кВтч/тонну) | 500 - 800 | 200 - 400 |
| Давление прокатки (МПа) | 20 - 100 | 5 - 50 |
| Шероховатость поверхности (Ra, мкм) | 0,5 - 3,0 | 1,5 - 5,0 |

Однако при использовании метода бесслитковой прокатки готовое изделие часто имеет много воздушных раковин, высокую шероховатость поверхности и низкую структурную однородность [113]. Для решения этой проблемы необходимо найти коэффициенты температуры, скорости прокатки, давления прокатки, толщины и т. д., а также точно контролировать эти параметры на протяжении всего процесса производства.

Существует три способа подачи расплавленного материала сверху, снизу и горизонтально, как показано на рисунке 1.2.

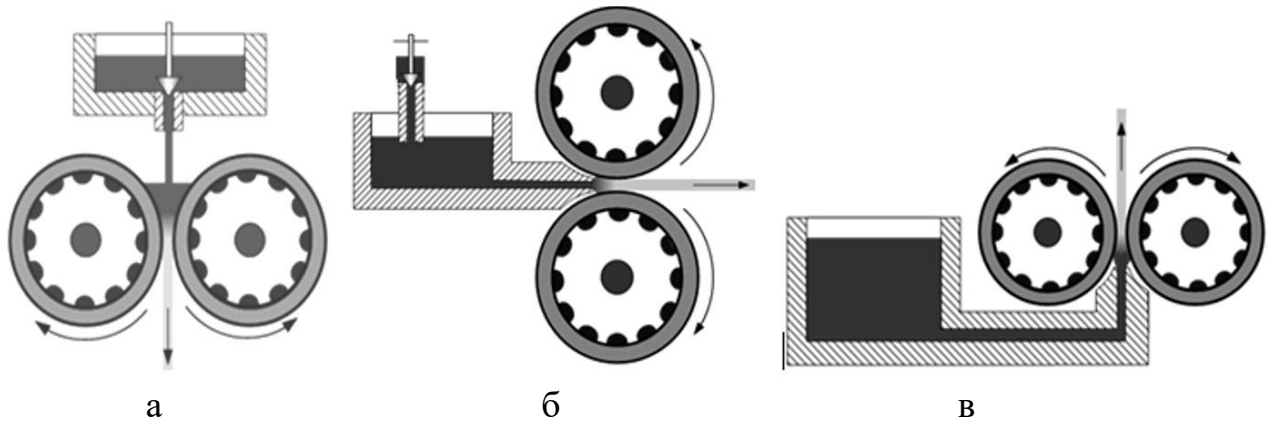


Рисунок 1.2 – Способы подачи расплава к валкам-кристаллизаторам:

а – сверху; б – сбоку; в – снизу [7]

Все три способа подачи расплавленного материала в прокатный стан имеют свои преимущества и недостатки [23]. При способе подачи материала сверху конструкция проста, но сложно контролировать скорость потока. Метод нижней подачи более сложен по конструкции, поскольку требует дополнительных насосов для поддержания постоянного потока. В настоящее время большинство заводов, использующих технологию бесслитковой прокатки во Вьетнаме, используют метод подачи материалов сбоку. Данный метод позволяет легко поддерживать скорость потока, минимизировать образование пузырьков воздуха и снизить шероховатость поверхности, если контролировать заданные технические параметры [117].

Общая компоновка технологической линии, реализованной на металлургическом предприятии Вьетнама, приведена на рисунке 1.3.

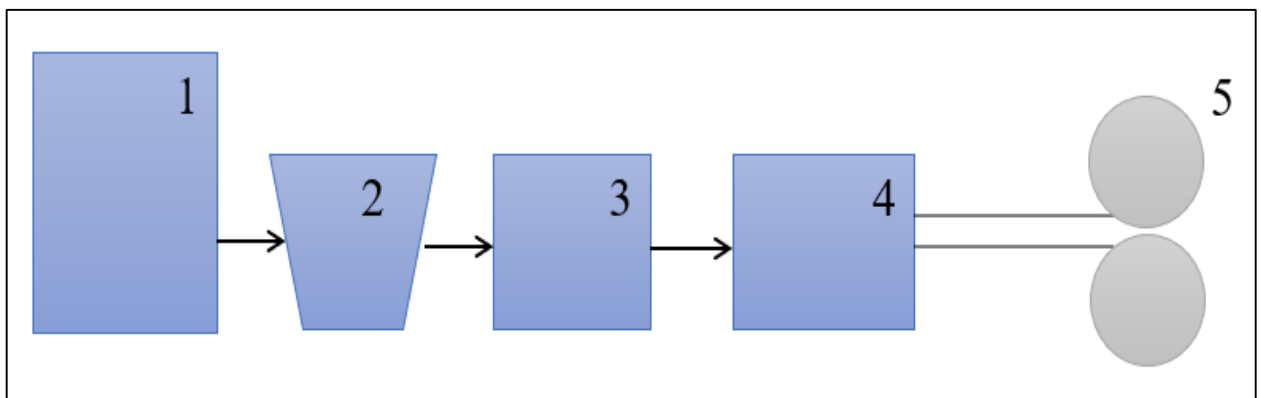


Рисунок 1.3 – Компоновочная схема линии производства прокатных заготовок методом бесслитковой прокатки: 1 – отражательная печь; 2 – литейный ковш;

3 – электрический миксер; 4 – проточная емкость; 5 – прокатная клеть

(составлено автором)

Агрегаты бесслитковой прокатки, как правило, эксплуатируются совместно с отражательными либо индукционными печами. После завершения плавки расплав транспортируется разливочным ковшом в электрический миксер. Конструкция миксера включает металлический каркас, ванну и технологические окна, предназначенные для перемешивания расплава, удаления шлака и очистки внутренних поверхностей. Внутри ванны располагается перегородка из огнеупорной кладки, обеспечивающая сохранение требуемого теплового состояния перед разливкой и поддержание чистоты металла при переливе из ковша или плавильного агрегата. Установлено, что мощность такого оборудования составляет 125–325 кВт, а удельное энергопотребление находится в пределах 150–175 кВт*ч [45]. Процесс подогрева и контроля температуры осуществляется автоматически с использованием хромель-алюмелевых термопар, погруженных в жидкий металл, а результаты измерений фиксируются электронным потенциометром. После доведения алюминиевого сплава до заданной температуры из смесительного сопла он подается в проточную емкость для фильтрации, а затем переносится и равномерно распределяется по всей ширине рабочей зоны. В результате контакта с поверхностью кристаллизатора жидкий металл будет кристаллизоваться, деформироваться в горячем состоянии непосредственно в зазоре вращающихся валков-кристаллизаторов и охлаждаться.

В зависимости от мощности машины площадь, занимаемая комплексом бесслитковой прокатки, обычно составляет около 80–100 м². Вышеуказанная производственная линия состоит из печи, резервуара для хранения, смесительного бака, фильтрующей мембраны, трубы и прокатного вала. Компактное оборудование, низкое энергопотребление и меньшие требования к обслуживающему персоналу обеспечивают высокую эффективность производства.

1.1.1 Глобальные тенденции развития производства алюминиевых прокатных заготовок

В последние десятилетия мировая алюминиевая промышленность развивается в условиях одновременного роста спроса на качественные полуфабрикаты и ускоренной модернизации металлургических производств. По

данным международных отраслевых ассоциаций, потребление прокатной алюминиевой продукции увеличивается в среднем на 3–4 % в год, что обусловлено развитием энергетики, транспорта, аэрокосмической техники, электроники и строительного комплекса. Указанные отрасли предъявляют повышенные требования к стабильности геометрических параметров, структурной однородности и эксплуатационным свойствам алюминиевых лент, полос и фольги, вследствие чего возрастают требования к качеству исходной прокатной заготовки.

Рост мирового рынка полуфабрикатов из алюминия соответствует модернизации технологий. В частности, увеличивается использование сплавов серий 3xxx, 5xxx и 8xxx, обладающих хорошей коррозионной стойкостью, формуемостью, а также возможностью достижения требуемой прочности путем утонения [71, 118]. Расширять ассортимент таких сплавов не так просто – нужна гораздо более строгая температура при плавке, литье и прокатке. Даже небольшие ошибки могут сделать металл жидким, вызвать поры и привести к его неоднородности.

Сейчас в отрасли все чаще переходят от полунепрерывного или даже непрерывного литья к БП производства заготовок. Такой процессы дают серьезные технологические плюсы: металл держится в равномерном термическом состоянии и производство идет быстрее, без лишних этапов. Заводы по всему миру постепенно отказываются от привычной цепочки «плавка – литье – гомогенизация – горячая прокатка», предпочитая интегрированные линии, где литье и прокатка идут вместе после плавки [68]. Такой подход почти в два-три раза сокращает время производства и делает параметры готовых заготовок более стабильными.

Одним из приоритетных направлений развития отрасли является внедрение технологий бесслитковой прокатки [23, 111]. Эти процессы объединяют стадии кристаллизации и деформации в едином технологическом контуре, обеспечивая формирование структуры металла при одновременном снижении термических напряжений [28]. Однако реализация преимуществ бесслитковой прокатки возможна только при строгом соблюдении параметров теплового режима, скорости подачи расплава и характеристик деформации. По этой причине особую значимость

приобретает точное автоматизированное управление, обеспечивающее устойчивость процесса при высоких скоростях охлаждения и значительных температурных градиентах.

Технологическая модернизация сопровождается глобальной цифровизацией металлургических производств. Предприятия внедряют интеллектуальные системы мониторинга, датчики высокой точности, оптоэлектронные средства контроля поверхности и микроструктуры, а также цифровые двойники оборудования, позволяющие прогнозировать поведение технологических параметров [44, 57, 91]. В результате управление процессами становится все более ориентированным на анализ больших данных, упреждающее регулирование и адаптивные алгоритмы, что принципиально отличает современное производство от традиционных схем, основанных преимущественно на опыте оператора.

Экономика отрасли алюминия определяется и технологическими параметрами производства, и влиянием ряда внешних факторов: стоимости энергоносителей, доступности сырья, экологических требований и нормативов качества выпускаемой продукции [62]. В этих условиях рост эффективности – это экономия энергии, уменьшение отходов, оптимизация технологического процесса.

В странах с большими запасами бокситов, таких как Вьетнам, строительство полного производственного цикла имеет стратегическое значение, так как это шаг от экспорта сырья к экспорту продукции с большей добавленной стоимостью. Формирование современных литейных и прокатных производств ведет к совершенствованию качества полуфабрикатов, росту уровня автоматизации, приближению производства к мировым стандартам.

В этих условиях крайне необходимо устойчивое формирование структуры заготовки. Даже небольшие изменения температуры в области между расплавленным металлом и прокатным станом изменяют толщину затвердевающей корки, что повлияет на равномерность процесса затвердевания и увеличит риск образования воздушных полостей или неметаллических примесей. Качество заготовки существенно влияет на качество процессов горячей и холодной прокатки, анодирования и экструзии [71]. Именно здесь возникают риски, связанные с

производственным процессом. Большинство современных исследований сосредоточено на моделировании тепловых процессов и анализе влияния параметров производственного процесса на формирование структуры металла.

Таким образом, для дальнейшего развития алюминиевой промышленности необходимо модернизировать технологические процессы путем: обновления существующих производственных линий и внедрения интеллектуальных систем управления. Параметры производственного процесса, такие как температура, скорость прокатки, скорость охлаждения, давление и расход расплава, должны точно контролироваться в режиме реального времени. Для достижения этой цели необходимы дальнейшие исследования требований к качеству заготовки, международных стандартов, уровня автоматизации и существующих решений.

1.1.2 Требования к качеству прокатной заготовки и их связь с параметрами технологического процесса

Ключевыми показателями качества прокатной заготовки являются:

- однородность химического состава;
- минимальный уровень пористости и внутренних дефектов;
- структурная равномерность по толщине;
- стабильность размеров и формы;
- минимальная шероховатость поверхности;
- отсутствие трещин, расслоений и включений.

Указанные показатели качества формируются не на отдельной стадии, а в результате совокупного воздействия операций плавки, литья, охлаждения и прокатки. Основные этапы производства с их влиянием на формирование свойств прокатной заготовки, что представлено в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Перечисленные параметры формируются на всех этапах [14, 29, 43]

| Этап | Влияние на качество |
|------------|--|
| Плавка | однородность состава, количество растворенного водорода, склонность к газовой пористости |
| Литье | скорость кристаллизации, образование жидкой и полужидкой зон, геометрия слитка |
| Охлаждение | остаточные напряжения, стабильность толщины |
| Прокатка | формирование структуры, измельчение зерна, устранение внутренних дефектов |

Детальный анализ показывает, что даже незначительные отклонения в температуре расплава ($\pm 5\text{--}10^\circ\text{C}$), скорости вытягивания ($\pm 2\text{--}3\%$), давлении в зоне деформации (± 10 МПа) могут приводить к значительным дефектам, особенно при работе с тонкими лентами толщиной 0,2–0,4 мм [24, 69].

Поэтому современная практика требует внедрения систем точного автоматизированного контроля, способных обеспечивать высокую согласованность между технологическими стадиями, минимизировать человеческий фактор и адаптироваться к изменению условий.

1.1.3 Физико-металлургические процессы при кристаллизации алюминиевых сплавов

Процесс кристаллизации алюминиевых сплавов в условиях бесслитковой прокатки включает [36]:

- нестационарный теплоперенос;
- переход жидкой фазы в полутвердое состояние;
- эволюцию зоны затвердевания;
- деформацию незатвердевшего слоя металла.

Физико-металлургический подход к этому процессу строится на нескольких ключевых идеях. Сначала, уравнение Стефана помогает понять, как движется фронт кристаллизации. Потом, идут модели роста дендритов (Ivantsov, Kurz–Fisher) – они берут в расчет переохлаждение расплава и насколько стабильно себя ведет структура во время формирования [58, 77, 96]. Есть еще теория жидкофазной деформации, которая объясняет, как выходит остаточная жидкая фаза. Плюс, критерии подобия Nu , Re , Pr дают способ точно оценить, насколько сильна конвекция и как происходит теплоотдача.

При обработке алюминиевых сплавов серии 8xxx очень важно следить за температурой обработки. У этих сплавов широкий диапазон кристаллизации: от 40 до 80°C. Это сильно усиливает процессы ликвации в системе Fe–Si и приводит к появлению металлических примесей.

1.1.4 Международные стандарты и нормативы в производстве алюминиевых заготовок

Международных стандартов в производстве алюминиевой полосы довольно много. Например, ISO 6361 описывает требования к алюминиевым листам и полосам. В Европейском Союзе действуют EN 573 и EN 485 – они регулируют состав и свойства материала. Американские стандарты ASTM B209 и B221 касаются химических и механических характеристик алюминия. А еще есть стандарты AA от Ассоциации алюминия, которые помогают классифицировать и регулировать алюминиевые материалы. Стандарты вроде ISO 6361, ASTM B209 и EN 485 предъявляют достаточно строгие требования к качеству продукции.

Для оценки пригодности прокатной заготовки к последующей обработке необходимо выделить показатели, характеризующие уже сформированное состояние металла после литья и прокатки. К таким показателям относятся отклонение по толщине, пористость, размер зерна, шероховатость поверхности и наличие неметаллических включений. Обобщенные предельные значения указанных выходных параметров качества представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Основные выходные параметры качества алюминиевых прокатных заготовок [14, 29, 43]

| Параметр | Допустимое значение |
|-----------------------|--------------------------|
| Отклонение по толщине | $\pm 1-3 \%$ |
| Пористость | $< 0,5 \%$ |
| Размер зерна | $\leq 40-60 \text{ мкм}$ |
| Шероховатость Ra | $0,2-0,5 \text{ мкм}$ |
| Наличие включений | Не допускается |

Судя по действующим стандартам, требования становятся все более жесткими. Особенно это касается таких параметров, как: однородность структуры материала, стабильность геометрических параметров, ограничение пористости до минимально допустимого уровня, в частности толщины, и экология производства, включая сокращение выбросов CO₂ и увеличение переработки металлов [62]. Для предприятий, особенно работающих в развивающихся странах, такое ужесточение требований создает дополнительную нагрузку, поскольку часть действующих технологических линий остается морально устаревшей.

1.1.5 Современные технологические линии: уровни автоматизации и цифровой интеграции

Современные литейно-прокатные комплексы, как правило, включают:

- интеллектуальные датчики температуры с частотой опроса 200–500 Гц;
- высокоскоростные камеры для регистрации колебаний лунки расплава;
- системы прогнозирования теплопереноса на основе MPC (Model Predictive Control);

- самообучающиеся регуляторы, построенные с использованием нейросетевых методов;

- цифровые двойники валков, учитывающие их термоупругие деформации.

Использование цифрового двойника агрегата позволяет рассчитывать:

- температуру поверхности валков на протяжении полного оборота;
- толщину затвердевающей корки в любой точке межвалкового зазора;
- допустимый интервал скоростей, соответствующий минимальному уровню

пористости;

- распределение напряжений в полутвердой зоне металла.

Тем самым формируется основа для оптимизации параметров процесса в реальном времени, что является одним из ключевых компонентов современной АСУ ТП.

1.1.6 Основные проблемы традиционных технологий получения заготовок

Несмотря на развитие оборудования и средств контроля, традиционные способы получения прокатных заготовок сохраняют ряд существенных ограничений, снижающих устойчивость технологического процесса и качество готовой продукции. К наиболее значимым из них относятся:

- нестабильность теплового режима: температура расплава и валков изменяется в широких пределах вследствие ограниченных возможностей оперативного контроля. Даже небольшие колебания вызывают пористость, структурную неоднородность и поверхностные дефекты. Недостаточная точность регулирования повышает чувствительность процесса к внешним воздействиям и увеличивает долю брака;

- ограниченный контроль химического состава: во многих традиционных схемах плавки и разливки отсутствуют средства непрерывного мониторинга состава сплава. В результате колеблется содержание легирующих элементов, определяющих механические свойства заготовки. Дополнительным негативным фактором остается неполное удаление растворенного водорода и неметаллических включений;

- неравномерная подача расплава: при разливке возникают колебания расхода и скорости потока, что вызывает локальные зоны перегрева либо переохлаждения. Это нарушает равномерность затвердевания и способствует образованию внутренних дефектов, особенно при производстве тонких лент;

- технологические задержки и высокая зависимость от оператора: традиционные линии требуют постоянного участия обслуживающего персонала. Значительная часть корректирующих действий выполняется вручную, что повышает вероятность ошибок, а устойчивость всего процесса во многом определяется квалификацией оператора;

- ограниченные возможности предиктивного управления: классические системы, как правило, не обеспечивают раннего прогнозирования рисков и своевременного выявления отклонений параметров. Изменения температуры, давления или скорости прокатки нередко фиксируются уже после того, как их влияние сказалось на качестве продукции, что снижает эффективность регулирования.

К типичным дефектам, возникающим в традиционных технологиях, относятся [87]:

- воздушные пузыри и газовая пористость;
- трещины и расслоения;
- повышенная шероховатость поверхности;
- разнотолщинность;
- наличие неметаллических включений.

Эти дефекты возникают вследствие несовершенной системы контроля параметров процесса, недостаточной синхронности операций плавки, разливки и

прокатки, а также из-за несогласованности температурных режимов и недостаточной точности регулирования.

Перечисленные проблемы демонстрируют необходимость перехода от традиционного управления к современным автоматизированным системам, способным обеспечивать точный контроль технологических параметров, адаптацию к изменяющимся условиям и снижение влияния человеческого фактора. Именно такие задачи ставятся и решаются в последующих разделах исследования.

1.1.7 Сравнительный анализ традиционного и бесслиткового метода производства

Для более глубокого понимания преимуществ бесслитковой прокатки представим расширенную таблицу сравнения (таблица 1.5).

Таблица 1.5 – Сравнение традиционного и бесслиткового методов производства прокатных заготовок [42, 68, 121]

| Параметр | Традиционное литье + отдельная прокатка | Бесслитковая прокатка |
|----------------------|---|--------------------------|
| Количество стадий | 5–7 | 2–3 |
| Потери металла | 3–6 % | <1 % |
| Энергопотребление | 700–900 кВт·ч/т | 400–600 кВт·ч/т |
| Доля персонала | высокая | низкая |
| Стабильность толщины | средняя | высокая |
| Вероятность дефектов | высокая | умеренная |
| Сложность управления | низкая | высокая (требует АСУ ТП) |

Таким образом, бесслитковая технология представляет собой более прогрессивное решение, но требует сложных алгоритмов контроля и управления – именно этим посвящены главы 2 и 3.

1.2 Состояние АСУ ТП в производстве прокатной заготовки из алюминиевых сплавов

На современных заводах на каждом этапе производственного процесса используется множество современных систем оборудования. На этапе плавки алюминиевых сплавов применяют высокопроизводительные плавильные агрегаты и печи непрерывной гомогенизации, обеспечивающие строгое поддержание температурных и временных параметров процесса.

Для оптимизации стадии охлаждения используются современные системы теплоотвода, в том числе специализированные водоохлаждаемые линии, позволяющие стабилизировать температурное состояние полосы и оборудования.

Автоматизированные системы инспекции и сортировки базируются на лазерном сканировании и машинном зрении [20]. Использование таких комплексов позволяет своевременно обнаруживать поверхностные и геометрические дефекты и тем самым снижать долю несоответствующей продукции [97].

Системы управления играют ключевую роль в оптимизации технологических операций, снижении числа ошибок и повышении производительности. Структура управления при производстве прокатных заготовок из алюминиевых сплавов включает несколько взаимосвязанных подсистем и в обобщенном виде может быть представлена тремя основными уровнями, показанными на рисунке 1.4.




| | |
|-----------|--|
| 3 уровень |  |
| 2 уровень |  |
| 1 уровень |  |

Рисунок 1.4 – Уровни автоматизации на заводе [86, 107]

Уровень 1 – полевой уровень. На этом уровне располагаются первичные средства измерения и исполнительные механизмы: кнопки, переключатели, датчики температуры, скорости, давления и толщины, а также двигатели, клапаны, цилиндры и другие устройства. Именно здесь формируются входные данные о состоянии процесса и реализуются команды, поступающие от системы управления. Таким образом, полевой уровень представляет собой аппаратную основу технологического комплекса, непосредственно взаимодействующую с объектом управления.

Уровень 2 – уровень управления. Его основными элементами являются ПЛК и ПИД-регуляторы. На этом уровне выполняются сбор данных с полевых устройств, сравнение текущих значений с заданными уставками и формирование управляющих воздействий. Встроенные ПИД-контуры обеспечивают регулирование температуры, расхода, давления и других непрерывных параметров в тех случаях, когда простое дискретное управление по принципу «включено/выключено» не обеспечивает требуемого качества процесса [63]. Например, при задании требуемого расхода ПИД-регулятор формирует сигнал на исполнительный орган таким образом, чтобы поддерживать параметр на установленном уровне.

Уровень 3 – уровень мониторинга. Здесь применяются системы SCADA [60, 78, 88], предназначенные для централизованного наблюдения за процессом и передачи команд на уровень управления. Основными устройствами, используемыми в SCADA, являются экраны HMI, ПК-станции и т. д. Они будут отображать всю информацию о системе, которой мы управляем, и в то же время позволят нам легко управлять исполнительными механизмами. SCADA, по сути, представляет собой комбинацию устройств предыдущих уровней и используется для доступа к данным и управления системой в одном месте [84]. Кроме того, SCADA может контролировать и управлять несколькими системами одновременно, а не только одним HMI и одной системой.

Для повышения качества прокатываемой заготовки необходимо уделять внимание синхронному управлению механизмом подачи материала, прокатным валом и механизмом охлаждения. Общая схема системы управления представлена на рисунке 1.5.

В данном исследовании основное внимание уделяется анализу метода бесслитковой прокатки. Технология бесслитковой прокатки для производства прокатной заготовки, являясь одной из самых перспективных на данный момент, получила свое распространение и развитие главным образом за рубежом. Вместе с тем количество зарубежных исследований, направленных на совершенствование и улучшение качественных показателей бесслитковой прокатки как за счет

конструктивных и технологических изменений, так и за счет разработок систем автоматического управления, включающих системы контроля температурного режима валки-кристаллизации, постоянно увеличивается. Системы управления, получившие наибольшее распространение, можно систематизировать по способу управления на статические и динамические.

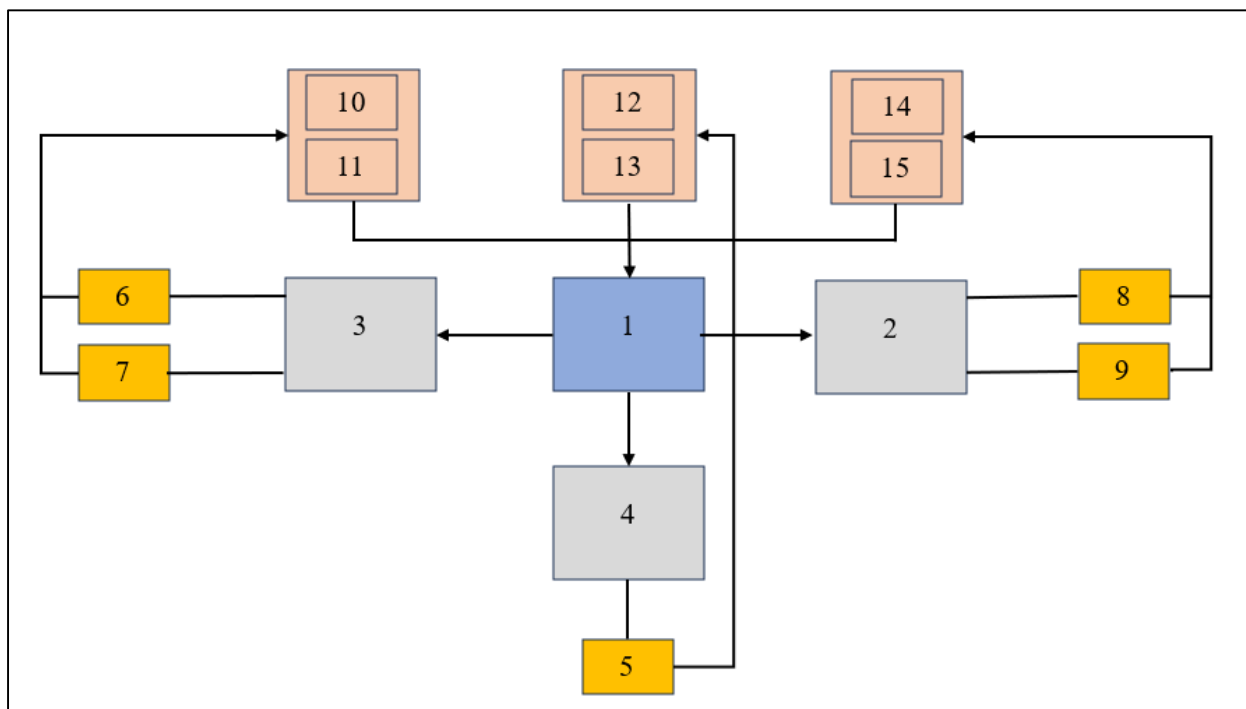


Рисунок 1.5 – Общая схема системы управления механизмом подачи, прокатки и охлаждения расплава: 1 – блок управления; 2, 3, 4 - исполнительный механизм; 5 – двигатель вращения 2 валок; 6 – система передачи расплава; 7 – система фильтрации и дегазации; 8 – система водяного охлаждения; 9 – система обработки после прокатки; 10 – датчик расхода, измеряющий скорость потока расплава; 11 – датчики давления, контролирующие давление в насосных системах или трубопроводах для расплава; 12 – датчик силы прокатки; 13 – датчик скорости вращения валки; 14 – инфракрасный датчик, измеряющий температуру поверхности валков; 15 – датчик расхода охлаждающей жидкости
(составлено автором)

Статические методы управления обеспечивают достижение заданного состояния процесса только в установившемся режиме беслитковой прокатки, не учитывая переходные процессы между стационарными состояниями. При этом не рассматриваются такие важные аспекты, как динамика процесса, инерционные

характеристики и временные задержки, присущие любому технологическому процессу.

Регулирование осуществляется за счет корректировки зазора в зоне контакта валков на основе данных о температуре поверхности полосы, измеренной датчиком на выходе из кристаллизатора. Однако этот метод управления имеет серьезный недостаток – снижение качества продукции, в частности появление разнотолщинности полосы. Еще одним минусом является то, что регулирование производится только на основании отклонения температуры полосы от заданных технологическими картами значений, что негативно влияет на конечное качество продукции.

Использование статической модели в системе управления ограничивает эффективность регулирования в динамических режимах работы агрегата. Поскольку температурно-скоростные режимы бесслитковой прокатки и последующей прокатки напрямую зависят от динамических характеристик процесса, игнорирование переходных состояний приводит к существенным недостаткам в управлении. При работе статических систем управления параметры регулирования изменяются дискретно, без учета высокой динамики процесса бесслитковой прокатки алюминиевых сплавов. Это может вызывать нарушения устойчивости, выход за пределы управляемости и сбои в технологическом процессе. В связи с этим, учитывая ограничения статических методов, большинство современных систем управления тепловым режимом ориентированы на использование динамических моделей.

Динамическое управление направлено не только на достижение заданных параметров по завершении переходного процесса, но и на контроль траектории изменения регулируемых величин во времени. Системы динамического управления температурным режимом при непрерывном литье классифицируются по типам математических моделей в контуре регулирования – это могут быть детерминированные либо экспериментально-статистические модели.

Экспериментально-статистический подход рассматривает объект как «черный ящик», в котором отсутствует точное знание взаимосвязей между

входными и выходными параметрами. Такой метод применяется при нехватке информации о переходных процессах. В этом случае на основе наблюдений или экспериментов устанавливается корреляция между управляющими воздействиями и выходными характеристиками объекта.

Существует, например, система динамического управления охлаждением полосы, основанная на нейросетевой модели процесса и регуляторе, использующем принципы теории нечетких множеств. Модель в реальном времени передает расчетные данные в блок управления, который на их основе формирует управляющие сигналы. Нейросетевая модель относится к экспериментально-статистическим и использует алгоритмы искусственных нейронных сетей для аппроксимации зависимости между входами и выходами, имитируя принципы работы мозга.

Преимущество нейросетевых моделей в системах управления состоит в их способности адаптироваться к конкретным условиям в процессе работы. Тем не менее, проектирование таких моделей носит зачастую эвристический характер и не имеет единственно верного решения. Экспериментально-статистические модели подходят только для устойчивых и отлаженных процессов, так как основаны на ранее полученных данных. При изменении технологии или режимов их необходимо заново актуализировать. Поэтому для новых или модернизируемых валковых установок такие модели малоэффективны.

В отличие от них, детерминированные модели базируются на фундаментальных физических принципах и описываются через балансовые уравнения, отражающие тепломассоперенос и процессы затвердевания. Содержательно детерминированные модели значительно превосходят экспериментально-статистические, поскольку основаны на описании физических процессов и причинно-следственных связей, а не на формальной зависимости между входными и выходными параметрами.

Изменение технологических параметров непосредственно отражается на тепловом состоянии отливаемой полосы. Такие изменения могут быть описаны с помощью детерминированных моделей, что делает построение модели процесса

перспективной основой для разработки систем регулирования температуры в условиях бесслитковой прокатки.

Несмотря на существенный прогресс современных систем автоматического управления и их непрерывное совершенствование с учетом производственных требований, ряд технических проблем по-прежнему остается нерешенным.

Во Вьетнаме значительная часть малых и средних предприятий проводит модернизацию поэтапно, что затрудняет интеграцию нового оборудования с существующей инфраструктурой. Для крупных производств приобретение зарубежных линий и специализированного программного обеспечения связано с высокими капитальными затратами и может снижать конкурентоспособность. Дополнительным ограничением остается дефицит квалифицированных специалистов, способных обеспечивать адаптацию, модернизацию и развитие систем управления.

Кроме того, для прокатных заготовок по-прежнему характерны дефекты в виде воздушных пузырей и неровностей поверхности, возникающие при неоптимальных значениях расхода, скорости прокатки, давления и, прежде всего, температуры [113]. Производство металлической фольги включает многократное деформирование заготовки, поэтому толщина готовой продукции напрямую связана с дефектами, возникающими на предшествующих стадиях. В большинстве случаев дефекты алюминиевых полос обусловлены отклонением от регламентированных технологических условий либо техническими неисправностями оборудования.

В производственных условиях контроль температуры валков и заготовки нередко затруднен. Действующие АСУ ТП, как правило, не обеспечивают раннего выявления рисков при отклонении технических параметров от требуемого диапазона. Это приводит к росту доли брака и повышает вероятность серьезных технологических нарушений.

Задача состоит в том, чтобы точно учесть моделирование процесса формирования конечного продукта. Проблему производства качественной, стабильной и предсказуемой продукции необходимо решать путем автоматизации

контроля входных и выходных параметров. Проблемы программного управления сложными технологическими процессами обсуждаются давно. Обзор и анализ научной литературы позволяет наметить цели и направления разработки оптимальной системы управления производством сортового проката из алюминиевых сплавов.

1.3 Современные тенденции развития АСУ ТП в производстве прокатной заготовки из алюминиевых сплавов

В современном производстве системы управления уже не ориентированы исключительно на автоматизацию основных процессов, но также должны иметь возможность быстро адаптироваться к изменяющимся условиям производства, быть саморегулирующимися и прогнозирующими. В настоящее время предложено много идей по созданию автоматизированных систем управления технологическими процессами при производстве сортового проката из алюминиевых сплавов методом прямой прокатки. Некоторые из основных тенденций включают в себя [6, 66, 72]:

- создание математических моделей технологических процессов и процессов управления для адаптации к новым условиям производства и экспериментальным данным;

- использование аналитических моделей и программного обеспечения цифрового моделирования для поиска оптимальных технических параметров производственного процесса. Для этого используются методы программного 3D-моделирования с контролируемыми технологическими параметрами и условиями окружающей среды. Такой подход позволяет тестировать различные производственные сценарии перед фактической реализацией, минимизируя риски и затраты;

- разработка дополнительного программного обеспечения, которое повышает гибкость и точность автоматизации, опираясь на лучшие технологические параметры. Такое ПО должно уметь собирать данные и подстраиваться под особенности каждого этапа производства;

- использование высокоточных датчиков и измерительных систем с быстрым откликом, которые обеспечивают постоянную и достоверную обратную связь с управляющими контурами.

При постановке задач для системы управления важна оптимизация процесса. Все основные этапы производства прокатных заготовок из алюминиевых сплавов связаны и имеют свои особенности. Поэтому интегрированная система управления должна обеспечивать слаженную работу не только отдельных операций, но и всего производственного комплекса в целом.

1.4 Цели и задачи исследования

Цель работы: повышение эффективности процесса бесслитковой прокатки высоколегированных алюминиевых сплавов в заданных интервалах температуры процесса с учетом изменения химического состава.

Задачи исследования:

1. Выполнить параметрический анализ на основе существующих технологий литья и прокатки алюминиевых сплавов и изучить опыт применения АСУ ТП, используемых в производстве листовой заготовки и проката;
2. Обосновать выбор дополнительных участков контроля температуры для создания цифровой платформы АСУ ТП на всех этапах процесса литья и прокатки с учетом математического моделирования температурного режима литья и прокатки заготовки;
3. Разработать алгоритм и программное обеспечение контроля основных параметров теплового режима процесса бесслитковой прокатки для интеграции в существующие системы АСУ ТП на основе созданной цифровой платформы;
4. Обосновать внедрение дополнительной системы контроля химического состава на всех стадиях процесса бесслитковой прокатки для повышения качества заготовки.

1.5 Выводы по главе 1

В главе 1 диссертации дается обзор процесса производства прокатных заготовок из алюминиевого сплава от входных материалов до готовой продукции. Изделия из прокатной заготовки обладают множеством преимуществ, поэтому их

продолжают перерабатывать и использовать во многих ключевых отраслях промышленности. Особое внимание уделяется производственному процессу с использованием технологии прямой прокатки, что позволяет минимизировать этапы производства и снизить себестоимость продукции. Однако современная технология производства по-прежнему не может соответствовать все более строгим экономическим и техническим требованиям, поскольку производственный процесс по-прежнему включает в себя множество ручных этапов, которые не автоматизированы, технические параметры производственного процесса не контролируются и не корректируются точно, что приводит к высокому уровню брака готовой продукции, что приводит к снижению производственных затрат, но незначительно. Поэтому разработка автоматических систем управления является целью, которую необходимо достичь для повышения эффективности производства. В целом результаты главы 1 помогают лучше понять ситуацию с производством прокатных заготовок из алюминиевого сплава, используемый технологический процесс и одновременно дают направления для исследований и разработок.

ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ В БЕССЛИТКОВОЙ ПРОКАТКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

2.1 Современные подходы к выбору способа управления температурным режимом

Процесс бесслитковой прокатки отличается значительным транспортным запаздыванием, что существенно осложняет задачи управления. Согласно положениям теории автоматического регулирования, устойчивость и качество регулирования в значительной степени определяются отношением времени запаздывания τ к постоянной времени объекта T .

Постоянное время объекта T (2.1):

$$T = \frac{\rho c V}{h A} \quad (2.1)$$

где ρ – плотность материала валка, кг/м³;

c – удельная теплоемкость материала валка, Дж/(кг·К);

V – объем валка, м³;

h – коэффициент теплоотдачи в системе «валок - вода», Вт/(м²·К);

A – площадь поверхности теплообмена с водой, м².

В рассматриваемом случае запаздывание определяется временем контакта расплава с валками до момента кристаллизации; ориентировочно $\tau \approx 5$ с, а $T \approx 10$ с. Это соотношение используется как критерий выбора структуры и закона регулирования. При $\tau/T > 0,5$ традиционные регуляторы П, И, ПИ, ПД и ПИД нередко не обеспечивают требуемых показателей качества [63, 90]. В подобных условиях необходимо либо уменьшать отношение τ/T , либо применять более сложные системы управления, основанные на модели объекта.

В рамках современной теории автоматического управления особое внимание уделяется так называемым интеллектуальным системам – таким, которые способны не только автоматически реагировать на изменения внешней среды, но и адаптироваться к ним, используя накопленные знания и опыт. К числу таких систем относятся те, что основаны на методах анализа, обобщения и применения

информации, извлеченной из наблюдаемых данных. Это позволяет им более гибко и эффективно справляться с неопределенностью, сложностью и вариативностью технологических процессов.

Одним из наиболее перспективных направлений в разработке интеллектуальных систем стали нейронные сети, которые моделируют принципы работы нервной системы живых организмов [13, 15]. Их развитие началось с фундаментальной работы Уоррена МакКаллока и Уолтера Питтса, опубликованной в середине XX века, в которой впервые была представлена математическая модель нейрона и описаны основы логического функционирования искусственных нейронных структур. С тех пор нейронные сети превратились в мощный инструмент для обработки сложных взаимосвязанных данных, и их применение в задачах автоматического управления продолжает активно расширяться. Нейросеть – это модель, имитирующая мышление человека, где структура задается разработчиком, а веса связей настраиваются в процессе обучения. Она может выступать универсальным аппроксиматором, моделируя объекты как «черный ящик». Однако отсутствие строгой теории выбора структуры и трудности формирования обучающих выборок остаются значительными ограничениями.

Одним из типов интеллектуальных систем управления являются системы на основе нечетких регуляторов [49, 90]. Исследование строится на правилах вида «если..., то...», сформулированных в терминах теории нечетких множеств. Такие системы могут эффективно функционировать даже при недостатке точной информации об объекте управления. Основой для построения нечетких регуляторов часто служат экспертные знания, накопленные в процессе практической эксплуатации.

При разработке интеллектуальных систем также применяются генетические алгоритмы – метод, вдохновленный естественными процессами эволюции и отбора. Идея была впервые предложена Н.А. Баричелли, а современную теорию сформулировал Дж. Холланд. В отличие от классических оптимизационных методов, генетические алгоритмы работают с закодированными параметрами,

используют популяционный подход, ориентируются на значения целевой функции и применяют вероятностные методы поиска.

В настоящее время генетические алгоритмы рассматриваются как эффективный инструмент для решения задач оптимизации, однако их применение ограничено: они малопригодны для точного поиска глобального оптимума, работы с множественными решениями и многоэкстремальными задачами.

Широкий спектр исследований подтверждает эффективность интеграции нейронных сетей с методами нечеткой логики [49]. Подобный синтез позволяет объединить способность искусственной сети к самообучению и адаптации с прозрачностью и интерпретируемостью правил нечеткого регулятора. В практических реализациях такая схема обычно представлена многослойной нейронной архитектурой прямого распространения сигналов, в которой механизм обновления весовых коэффициентов основан на алгоритме обратного распространения ошибки.

Также активно исследуется интеграция генетических алгоритмов с нейросетями. Такое объединение может быть вспомогательным – например, при формировании начальной популяции или оптимизации параметров обучения, – либо равноправным, когда оба метода работают совместно, например, для эволюционного подбора топологии и весов сети.

Методологические подходы, основанные на нейронных сетях, теории нечетких множеств и эволюционных алгоритмах, обладают потенциалом для применения при управлении тепловыми процессами в технологиях бесслитковой прокатки. Их эффективность возможна при условии наличия достаточного объема информации о динамике системы, позволяющего корректно формировать обучающие выборки и модели. Однако, учитывая, что данная технология в стране является новой и еще не прошла этап полноценной апробации, получение необходимых данных пока невозможно. В связи с этим указанные методы не представляются целесообразными для использования в текущих условиях.

Сложность процесса кристаллизации и охлаждения заготовки при бесслитковой прокатке требует применения подходов управления, способных

учитывать инерционность системы, запаздывание отклика и физические ограничения. Традиционные методы регулирования в таких условиях зачастую демонстрируют низкую эффективность, поскольку реагируют преимущественно на уже произошедшие изменения. Поэтому в качестве перспективного решения рассматривается использование упреждающего управления – подхода, при котором управляющее воздействие формируется не только на основе текущего состояния системы, но и с учетом предполагаемого будущего поведения объекта.

Ключевая особенность данного подхода заключается в способности учитывать временные задержки и прогнозировать развитие параметров, обеспечивая тем самым более точную и стабильную работу системы в реальных условиях [15]. В научной литературе упреждающие методы классифицируются на две основные категории: те, которые предполагают поиск оптимального управляющего воздействия в режиме реального времени (поисковые), и те, которые обходятся без такого поиска, используя заранее сформулированные законы управления (беспоисковые).

Одним из наиболее известных представителей беспоисковых стратегий являются системы с использованием предикторов. Эти системы были разработаны специально для объектов, характеризующихся значительной транспортной задержкой – то есть таких, у которых между моментом воздействия и реакцией проходит значительное время. Первая модель подобной системы была предложена О.Дж. Смитом в конце 1950-х годов. В дальнейшем подход был расширен и адаптирован к различным типам систем: для непрерывных процессов его усовершенствовал Дж. Ресвик, а для дискретных систем важный вклад внес Я.З. Цыпкин. Обобщенная схема классической системы управления, использующей предиктор Смита, приведена на рисунке 2.1 и отражает базовые принципы компенсации транспортного запаздывания в объекте. В схеме выделяют стандартный регулятор R , модель объекта без запаздывания и канал, описывающий задержку вида $e^{-p\tau}$. Модель M содержит дробно-рациональную часть, аппроксимирующую динамику объекта. Ключевым свойством предиктора Смита является исключение влияния транспортного запаздывания на формирование

управляющего воздействия: расчет осуществляется по модели без задержки, в то время как сама задержка учитывается на этапе восстановления выходного сигнала.

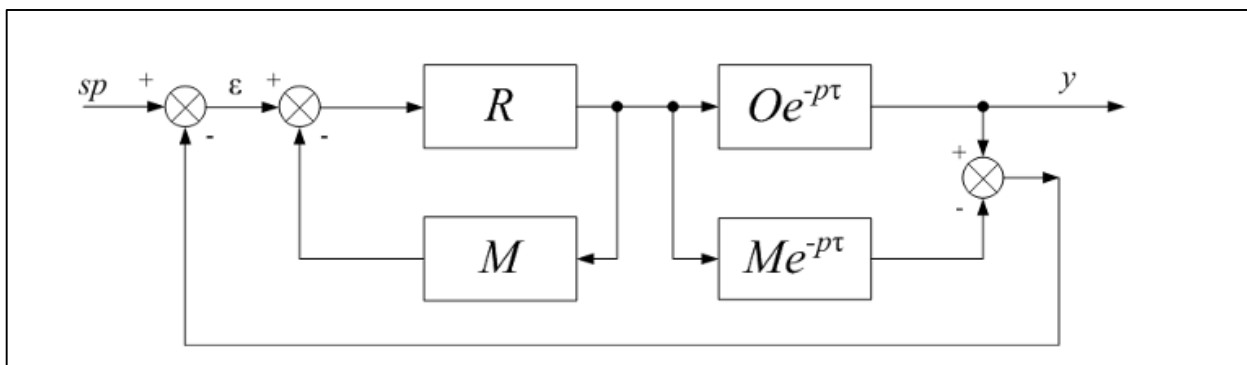


Рисунок 2.1 – Структурная схема системы управления с предиктором Смита [81, 102, 112]

Особенность предиктора Смита заключается в том, что звено запаздывания не оказывает влияния на динамику всей системы. Управление осуществляется на основе модели без учета запаздывания, которое затем просто добавляется к вычисленному управляющему воздействию.

В последние десятилетия разработано значительное количество вариантов структур, основанных на предикторе Смита. Например, регуляторы типа РРІ получили широкое распространение в автоматизации промышленных процессов благодаря способности повышать устойчивость систем с ярко выраженной задержкой [63]. Основной недостаток таких систем – высокая требовательность к точности соответствия модели объекта управления для достижения нужного качества регулирования.

В своих трудах А.А. Красовский предложил подход к построению систем управления, основанный на концепции так называемой «комплексной системы контроля», в которую входят три ключевых компонента: этап оценки состояния объекта, процедура его идентификации, а также механизм корректировки управляющих воздействий. Главным достоинством такой системы является применение обобщенных показателей эффективности, что обеспечивает устойчивость управления даже при значительных изменениях во внешней среде или в характеристиках самого объекта. Благодаря этому подходу система оказывается достаточно гибкой и универсальной, что позволяет применять ее при

управлении сложными непрерывными технологическими процессами, где необходима высокая адаптивность.

Развивая идеи в области теории оптимального управления, В.Н. Буков разработал оригинальную концепцию прогнозирующего управления динамическими системами. Ее центральная идея заключается во включении в систему управления специализированной подсистемы, которая, опираясь на эталонную и прогнозную модели объекта, позволяет заблаговременно предсказывать поведение управляемого процесса. Такой подход способствует повышению точности и эффективности регулирования. Вместе с тем, у подобного рода систем существуют и ограничения. Наиболее эффективно они работают при наличии линейной динамики и непрерывного характера протекающих процессов. В условиях, когда система подвержена жестким технологическим ограничениям или резким нелинейным изменениям параметров, применение таких методов может оказаться затруднительным или требовать существенной адаптации.

Двухшкальные системы управления относятся к поисковым предиктивным методам, применяемым для управления промышленными процессами с большой временной задержкой. Первоначально концепция этих систем была разработана Г. Зиболзом и Г.М. Паунтером, а впоследствии получила более широкое теоретическое обоснование и развитие в работах исследователей Н.М. Александровского, С.В. Егорова и В.П. Мешалкина. Принцип работы таких систем заключается в предварительном поиске оптимального управляющего воздействия путем перебора допустимых вариантов с использованием так называемой «быстрой модели» объекта, воспроизводящей его поведение в ускоренном масштабе времени. Это позволяет прогнозировать динамику процесса и оценивать эффективность управляющих воздействий до их фактической реализации, что особенно важно для объектов с выраженным запаздыванием.

При проектировании динамической системы управления необходимо последовательно решить несколько задач. Прежде всего формируют математическую модель, адекватно описывающую свойства объекта, его динамику и реакцию на внешние воздействия. Далее задают начальные условия,

соответствующие фактическому состоянию системы, поскольку от их корректности зависит достоверность моделирования. После этого анализируют возможные сценарии развития процесса при различных управляющих воздействиях и на этой основе синтезируют оптимальную стратегию управления с учетом технологических, ресурсных и временных ограничений. Для управления процессом беслитковой прокатки в качестве базовой может быть использована модернизированная модель А. А. Перельмана (рисунок 2.2).

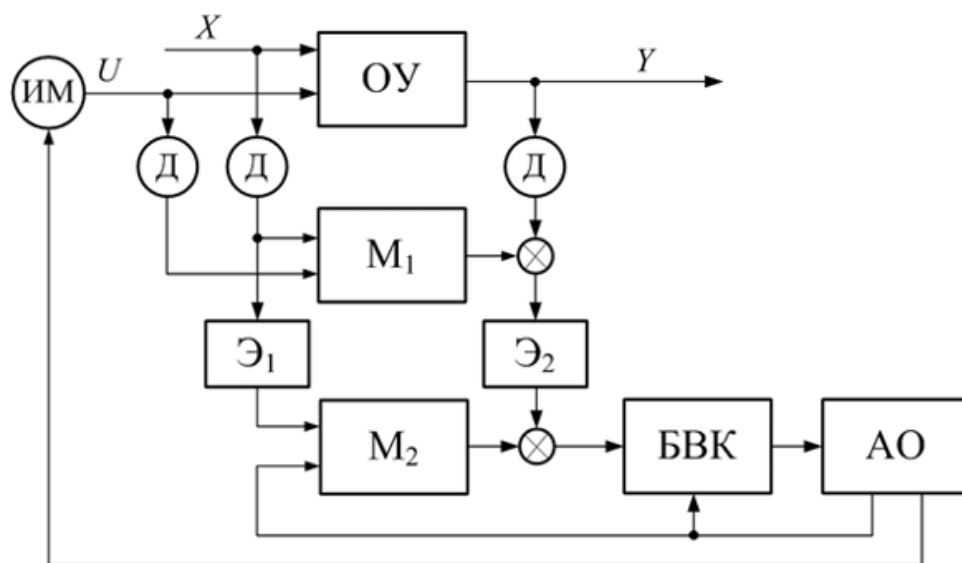


Рисунок 2.2 – Структурная двухшкальная предиктивная система

Перельмана А.А. [5, 31]

Основное отличие рассматриваемой системы от традиционной динамической системы управления заключается в использовании двух различных моделей объекта управления. Первая модель, функционирующая в режиме реального времени (M_1), предназначена для анализа и оценки влияния неконтролируемых возмущений параметров процесса, которые невозможно контролировать напрямую. Это позволяет своевременно реагировать на изменения условий работы системы и учитывать их при расчетах. Вторая модель – так называемая вспомогательная модель быстрого реагирования (M_2) – ориентирована на вычисление оптимальных управляющих воздействий. За счет своей высокой скорости и прогностических возможностей она способна учитывать не только текущее состояние системы, но и прогнозируемое развитие событий, что существенно повышает эффективность управления.

Рассматриваемая система управления принципиально отличается от классических тем, что опирается на две взаимодополняющие модели объекта [31, 48]. Модель $M1$ описывает тепловое состояние с учетом текущего воздействия внешних факторов в реальном времени, тогда как модель $M2$ используется для заблаговременного расчета оптимальных управляющих воздействий. Такое разнесение функций позволяет учесть инерционные и стохастические свойства процесса и повысить качество регулирования при наличии запаздываний.

Информационная база системы формируется по данным датчиков, регистрирующих управляющее воздействие U , регулируемую величину Y и контролируемые внешние воздействия X . Модель $M2$ получает входные данные из двух источников: от экстраполятора $\mathcal{E}1$, формирующего прогноз траекторий управляющих сигналов, и от алгоритма оптимизации AO , который рассчитывает ожидаемые изменения внешних возмущений и оптимальные управляющие воздействия. За счет совместного использования адаптивной модели $M1$ и предиктивной модели $M2$ обеспечивается устойчивое и точное управление тепловым режимом агрегата.

В данной системе выход, полученный от модели $M2$, объединяется с прогнозом, рассчитанным экстраполятором $\mathcal{E}2$, который оценивает влияние неконтролируемых внешних возмущений. Результирующий сигнал поступает в блок вычисления критерия управления (БВК), где проводится оценка эффективности текущей стратегии управления процессом БП. Используя полученную информацию, оптимизационный алгоритм определяет выбор управляющего воздействия для каждого временного интервала в пределах установленного горизонта прогнозирования [5].

Подобные подходы широко распространены за рубежом и известны как системы предиктивного управления, использующие математическое описание управляемого процесса. Суть метода заключается в том, что модель объекта применяется в роли инструмента предсказания, который на основе актуальных и архивных данных по управляющим воздействиям, внешним параметрам и текущему состоянию системы позволяет оценивать, как объект будет вести себя в

будущем. Благодаря этой стратегии система получает возможность действовать не только реактивно, но и проактивно, адаптируя управляющие сигналы заранее, с учетом возможных изменений и отклонений в технологическом процессе.

При управлении температурными режимами в процессе непрерывной прокатки алюминиевых сплавов использование систем предиктивного управления типа модели предиктивного управления (MPC) демонстрирует целый ряд преимуществ [48, 83]. Прежде всего, такие системы позволяют эффективно работать с технологическими объектами среднего и большого масштаба, в которых между параметрами существует тесная взаимосвязь, а динамика отличается значительными временными запаздываниями.

При расчете управляющих воздействий метод MPC четко учитывает физические и технологические ограничения. Таким образом, перегрев или недогрев в процессе термической обработки не происходят, а структура и качество металла не страдают. Интегрированная прогностическая модель предоставляет фактические значения температуры и теплового потока, а также прогнозируемые значения, обеспечивая стабильную и бесперебойную работу системы [93].

В процессе бесслитковой прокатки температурное поле демонстрирует нелинейность и инерцию. Линии ликвидуса и солидуса значительно различаются по тепловым и физическим характеристикам. В частности, теплоемкость падает, а теплопроводность удваивается, что увеличивает тепловую инерцию системы и обратную связь. В зависимости от интенсивности охлаждения и теплового состояния валков, все операции управления в реальных условиях проходят переходный период, который может длиться от нескольких секунд до десятков секунд. По мере накопления тепла на их поверхностях зона кристаллизации перемещается в сторону зазоров между валками, вызывая дальнейшие колебания температуры. Следовательно, это необходимо учитывать при выборе структуры и параметров контроллера MPC.

Результаты численного моделирования показывают, что без температурной компенсации температура может изменяться на 30–40 °C [10]. Последствия могут включать: неравномерное утолщение затвердевшей корки и асимметричное

распределение, что увеличивает риск поверхностных дефектов [113]. Регуляторы, такие как P, PI или PID регуляторы, не учитывают нелинейность процесса и задержку обратной связи. Поэтому применение традиционных регуляторов недостаточно эффективно.

В этом процессе зона нагрева смещается и обычно находится на расстоянии 5–10 мм от оси симметрии. В зависимости от метода подачи расплава, скорости вращения валков и интенсивности охлаждения ее положение будет меняться. Это значение необходимо контролировать для стабилизации толщины кромки полосы и предотвращения влияния на микроструктуру [3].

Современные методы прогнозирующего управления, в основном использующие MPC, учитывают тепловую инерцию и компенсируют задержки обратной связи системы [21]. Данная модель снижает амплитуду колебаний температуры и поддерживает температуру в диапазоне 3–5% за счет прогнозирования будущего состояния процесса.

2.2 Исследование и создание математической модели температурного режима зоны контакта между расплавом и валками-кристаллизаторами в процессе бесслитковой прокатки

В данном разделе анализируются особенности теплового режима, формирующегося в зоне кристаллизации и последующей деформации при бесслитковой прокатке алюминиевых сплавов [10, 16]. Исследование основано на сочетании экспериментальных наблюдений и численных методов, что позволяет комплексно описать поведение материала в различных термических условиях. Целью работы является построение надежной математической модели, адекватно описывающей процессы теплопереноса в различных зонах технологической линии [30, 92]. Для этого выполнен анализ распределения температуры в полосе и валках-кристаллизаторах, определены критические участки с максимальными температурными градиентами и проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных для повышения точности управления тепловыми параметрами в условиях реального производства.

Для построения модели необходимо в первую очередь проанализировать основные физические явления, происходящие в ходе процесса. Это нестационарный процесс теплопередачи в изменяющейся материальной среде, то есть среде, в которой такие параметры, как удельная теплоемкость и теплопроводность, изменяются в зависимости от температуры и физического состояния (твердое/жидкое). Кроме того, наличие скрытой теплоты на стадии кристаллизации делает задачу нелинейной [120].

Чтобы упростить задачу, но при этом сохранить необходимую точность, принимаются некоторые допущения:

- передача тепла происходит преимущественно в одном направлении, перпендикулярном поверхности контакта;
- структура материала считается однородной в макроскопическом масштабе;
- влияние теплового излучения пренебрежимо мало по сравнению с теплопроводностью и вынужденной конвекцией;
- геометрическое изменение в процессе прокатки можно включить в качестве зависимой переменной времени или пространства.

Исходя из сделанных выше предположений, основной системой уравнений, используемой для описания процесса теплопередачи, является одномерное нестационарное уравнение теплопередачи с учетом внутреннего источника тепла [13, 30]. Это уравнение выведено из закона сохранения энергии, где левая часть представляет собой накопление тепла в материале, а правая часть включает в себя два компонента: кондуктивный поток тепла и тепло, выделяемое при кристаллизации. В частности, при фазовом переходе часть энергии не используется для повышения температуры, а преобразуется в скрытую теплоту, рассчитываемую через скорость кристаллизации и функцию распределения твердой фазы.

Производительность агрегатов бесслитковой прокатки и характеристики скоростного режима в значительной степени определяются теплофизическими параметрами металла, свойствами материала валков и особенностями системы охлаждения. Такие параметры, как степень деформации полосы, давление в зоне

контакта и температура поверхности валка, формируются как зависимые величины, обусловленные текущими тепловыми и механическими условиями [24, 26, 76].

Совершенствование конструкции оборудования и повышение качества заготовки требуют обоснованного выбора режимов работы, обеспечивающих стабильный теплообмен, оптимальную скорость литья и необходимую структуру металла [61]. Для решения подобных задач применяется комплекс математических моделей, включающий:

- моделирование температурных полей валков;
- анализ энергетических характеристик оборудования;
- расчет параметров процесса и поиск конструктивных решений для повышения эффективности агрегатов.

Характер кристаллизации металла и формируемые механические свойства алюминиевой полосы задаются распределением температур в зоне литья и в валках-кристаллизаторах [61, 73, 94]. Температурное поле рассчитывают на основе уравнения теплового баланса и данных измерений, выполненных методом вмораживания термопар при контролируемых граничных условиях в зоне «расплав–валок».

Основное оборудование, использованное в эксперименте [50]:

- кристаллизаторы-валки с внутренними каналами охлаждения;
- система подачи расплава (питающий лоток + сопло);
- источник принудительного воздушного охлаждения;
- система водяного охлаждения (насос, расходомер, манометры, термометры на входе/выходе);
- термопары хромель–алюмель (тип К), диаметр 1.0–1.5 мм; монтажные держатели и защитные трубки (асбестовые/керамические);
- контактные термопары для измерения температуры поверхности валка;
- потенциометр КСП-4;
- система сбора данных с входами для термопар и каналами дискретного ввода/вывода;
- усилители/адаптеры для термопар, блок холодного спая;

- механические фиксаторы для термопар, клей/пасты для термоконтакта;
- средства измерения геометрии.

На рисунке 2.3 показаны точки измерения и места расположения термопар.

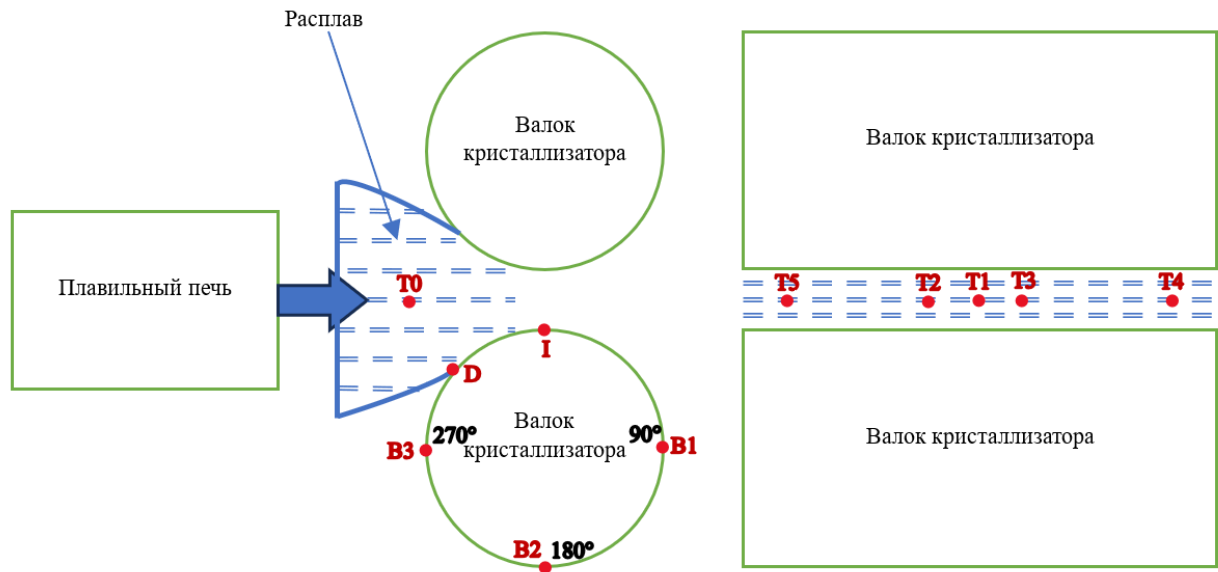


Рисунок 2.3 – Точки измерения и места расположения термопар

T0-T5 - место расположения термопар; точка D - начальный контакт поверхности расплава с валком; точка I - зона кристаллизации, где металл полностью перешел из жидкого в твердое состояние; D, I, B1, B2, B3 - точки измерения температур на поверхности валки (составлено автором)

Измерение температуры полосы

T0 (перед соплом): термопара устанавливалась в питающем канале расплава на осевой линии на расстоянии 10–20 мм от выхода сопла. Для защиты от воздействия потока применялась керамическая гильза диаметром 3–4 мм. Датчик фиксировался в держателе с винтовым зажимом, что исключало смещение при колебаниях потока.

T1 (центр полосы): термопары для измерения температуры расплава помещались в защитные керамические или асбестовые гильзы и закреплялись в держателе над гнездом для литья. Контактные спаи располагались на расстоянии 1–2 мм от поверхности металла. При начале заливки расплава измерительный наконечник погружался в жидкий металл, спустя несколько секунд металл начинал затвердевать, фиксируя гильзу и датчик в заготовке. Внешняя часть проводов

оставалась вне металла, следуя по держателю из зоны нагрева и соединяясь с измерительной аппаратурой.

Термопары T2 и T3 симметрично расположены на расстоянии приблизительно 45-50 мм от центра. Термопары T4 и T5 расположены у края полосы, на расстоянии 1-8 мм от края. Все термопары устанавливаются до подачи расплава, после чего проверяется цепь и компенсируются электрические соединения. Погрешность измерения составляет $\sim \pm 5^\circ\text{C}$.

Измерение температуры валков-кристаллизаторов

Контактный датчик закреплен на поверхности валки термостойким клеем и слюдяным листом. В точке контакта с расплавом, в одном и том же месте, валка поворачивалась на 90° , 180° и 270° относительно положения кристаллизации.

В ходе эксперимента были получены значения температуры по всей ширине литой металлической полосы, а также температуры расплавленного материала в точке контакта с роликом и в точке затвердевания. Кроме того, было определено температурное поле по всей поверхности валка ролика. Эти данные позволяют провести детальный анализ распределения температуры и ее изменения во времени. Это улучшает контроль процесса, обеспечивая более равномерное охлаждение и затвердевание, а также снижая риск дефектов продукции.

Опережающее движение закристаллизованной части заготовки в зоне деформации, а также изменения геометрии формируемой полосы существенно влияют на тепловое поле процесса. Распределение температур определяется теплопроводностью материала валков и полосы, благодаря чему допускается рассмотрение модели в одномерной постановке.

Применение нелинейных уравнений обусловлено сложной конфигурацией активной зоны теплообмена и наличием фазовых переходов, сопровождающихся выделением скрытой теплоты [23, 120]. Для описания процессов теплообмена и кристаллизации используется система уравнений, отражающая взаимодействие теплопроводности, источников тепла и изменения фазового состава металла [78].

В общем виде нестационарная теплопроводность с учетом внутренних источников тепла описывается выражением (2.2):

$$\rho \cdot \left(\frac{Di}{d\tau} \right) = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}(t)) + q_v \quad (2.2)$$

где ρ – плотность металла, кг/м³;

t – температура, °C;

λ – теплопроводности металла, Вт/(м·°C);

$\frac{Di}{d\tau}$ – полная производная энтальпии по времени;

q_v – плотность внутренних источников тепла, Вт/м³, включая скрытую теплоту кристаллизации.

В двухфазной области, ограниченной температурами ликвидуса и солидуса, применяются усредненные значения теплофизических свойств. Для неподвижной среды с постоянными параметрами уравнение принимает форму (2.3):

$$\rho \cdot C \cdot \left(\frac{Dt}{d\tau} \right) = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}(t)) + q_v \quad (2.3)$$

где C – удельная теплоемкость металла, Дж/(кг·°C).

С целью учета скрытой теплоты кристаллизации вводится параметр ψ (2.4):

$$\psi = \frac{V_T}{V_0} \quad (2.4)$$

где ψ – Относительное затвердевание ($0 \leq \psi \leq 1$);

V_T – объем затвердевшей (твердой) фазы;

V_0 – полный объем кристаллизующегося расплава.

Величина плотности внутреннего источника тепла равна (2.5):

$$q_v = q_{кр} \cdot \rho \cdot C \cdot \left(\frac{D\psi}{d\tau} \right) \quad (2.5)$$

где $q_{кр}$ – скрытая теплота кристаллизации, Дж/кг;

$\frac{D\psi}{d\tau}$ – скорость затвердевания сплава.

Для учета скрытой теплоты кристаллизации применяется эффективная теплоемкость (2.6) [21]:

$$C_{эфф} = C_{ж}(1 - \psi) + C_{т}\psi + \frac{q_{кр}}{t_{л} - t_c} \quad (2.6)$$

где t_c – температура солидуса, °C;

$C_{\text{ж}}$ – теплоемкость жидкого металла, Дж/(кг·°С);

$C_{\text{т}}$ – теплоемкость твердого металла, Дж/(кг·°С);

$t_{\text{л}}$ – температура ликвидуса, °С.

Эффективная теплопроводность в двухфазной зоне в интервале температур $(t_{\text{л}} - t_{\text{с}})$ определится как (2.7):

$$\lambda_{\text{эфф}} = \lambda_{\text{т}} \cdot \psi + \lambda_{\text{ж}} \cdot (1 - \psi) \quad (2.7)$$

где $\lambda_{\text{ж}}$ – теплопроводности для жидкого металла, Вт/(м·°С);

$\lambda_{\text{т}}$ – теплопроводности для твердого металла соответственно, Вт/(м·°С).

Теплопроводность жидкой фазы как функция теплопроводности твердой (2.8):

$$\lambda_{\text{т}} = \varepsilon \cdot \lambda_{\text{ж}}(t) \quad (2.8)$$

где ε – коэффициент увеличения теплопроводности жидкой фазы за счет конвективных потоков.

Эффективная плотность металла в интервале температур $(t_{\text{л}} - t_{\text{с}})$ определится как (2.9):

$$\rho_{\text{эфф}}(t) = \rho_{\text{ж}} \cdot \psi + \rho_{\text{т}} \cdot (1 - \psi) \quad (2.9)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкого металла, кг/м³;

$\rho_{\text{т}}$ – плотность твердого металла, кг/м³.

Обобщенное уравнение нестационарной теплопроводности (2.10) [15]:

$$\rho_{\text{эфф}}(t) \cdot C_{\text{эфф}}(t) \cdot \frac{dt}{d\tau} = \text{div}(\lambda_{\text{эфф}}(t) \cdot \text{grad}(t)) \quad (2.10)$$

Схемы координат для дискретизации задачи, применяемые в совмещенном процессе литья и прокатки, представлены на рисунке 2.4. Одной из принципиальных характеристик рассматриваемого подхода является инвариантность безразмерных распределений одноименных величин. Это означает, что различия между соответствующими параметрами в двух геометрически и физически подобных процессах носят, по сути, масштабный характер: значения одноименных величин в фиксированных координатах пространства и времени могут быть приведены друг к другу посредством постоянного коэффициента.

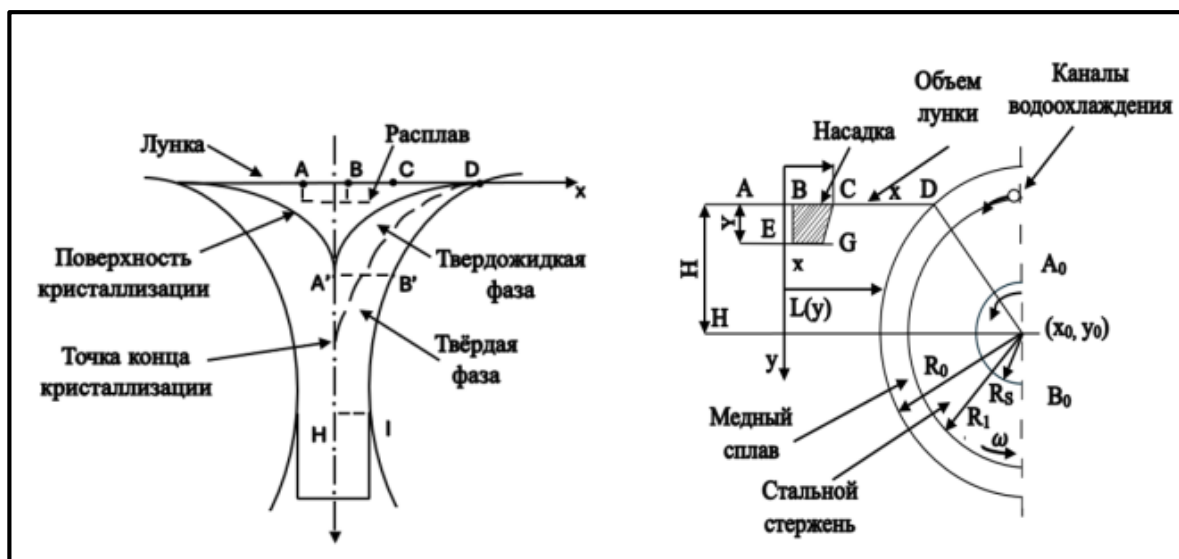


Рисунок 2.4 – Схемы координат в области деформации полосы: а) контактная зона «металл-валок»; б) контактная зона «насадка-валок» [51]

На практике постановка задачи усложняется необходимостью корректного учета резких перестроек температурного поля в активной зоне, обусловленных изменением геометрии формируемой полосы. Именно в этой области, где одновременно протекают кристаллизация и пластическая деформация металла, наблюдаются наибольшие локальные вариации температуры [32]. Причиной служит неоднородность теплоотвода по толщине и ширине полосы, а также сложный, нестационарный характер теплообмена в контакте «расплав – валки-кристаллизаторы», включающий изменение условий контакта и интенсивности охлаждения [59]. Возникающие здесь температурные градиенты существенно влияют на кинетику затвердевания и на формирование структуры материала, что обуславливает необходимость расширенного моделирования активной зоны и усиленного контроля термических параметров [54, 114].

Важным элементом математического описания совместного процесса литья-прокатки является учет неравновесности температурных полей. В реальной технологической зоне распределение температуры по объему заготовки и по поверхности контакта с инструментом существенно неоднородно: на него влияют локальная скорость охлаждения, термофизические свойства сплава (теплопроводность, теплоемкость, скрытая теплота кристаллизации), а также граничные условия теплоотдачи на интерфейсе «расплав – рабочие валки». В

совокупности эти факторы определяют кинетику затвердевания и последующую термомеханическую обработку металла [47, 56].

Существенное различие условий теплообмена по длине технологической линии требует отдельного рассмотрения кристаллизационной и деформационной зон [25]. В области затвердевания, где расплав по мере продвижения в кристаллизаторе последовательно переходит из жидкого состояния в двухфазное, а затем полностью твердое, теплоотвод протекает интенсивно и, как правило, в нестационарном режиме. В зоне деформации, где осуществляется обжатие уже затвердевшей полосы, тепловой режим формируется за счет работы пластической деформации, тепловыделения при трении в очаге деформации, а также продолжающегося теплообмена с валками и окружающей средой. Игнорирование этих отличий приводит к существенным погрешностям при расчете температурных полей и, следовательно, к некорректному выбору оптимальных параметров режима литья и прокатки.

Пластическая деформация, сопровождающаяся изменением геометрических размеров и внутренней структуры отливки, представляет собой еще один ключевой фактор, определяющий качество готового проката [26, 28]. При прохождении через валки заготовка испытывает значительные контактные напряжения и высокие градиенты деформации, что вызывает перераспределение толщины, изменение формы поперечного сечения и эволюцию микроструктуры материала [24, 55]. Поэтому при построении вычислительной модели необходимо одновременно учитывать как геометрическое переформирование полосы, так и сопряженные с ним термические эффекты.

Для систематизации описания и последующей оптимизации указанных взаимосвязанных процессов целесообразно использовать аппарат теории подобия и безразмерных критериев. Формирование соответствующих критериев подобия позволяет сопоставлять различные экспериментальные и промышленные режимы, устанавливать масштабные соотношения между ними и переносить результаты моделирования с лабораторных установок на реальные агрегаты. Это, в свою очередь, снижает объем натурных испытаний, упрощает настройку режима работы

машин бесслитковой прокатки и прокатки и повышает предсказуемость целевых характеристик готового продукта.

Критерий Нуссельта (Nu) используется для оценки теплопереноса в активной зоне в зазоре валков-кристаллизаторов (2.11):

$$Nu = \frac{l \cdot \alpha_T}{\lambda} \quad (2.11)$$

где l – характерный размер, м;

α_T – коэффициент теплообмена, Вт/м² · град;

λ – теплопроводности, Вт/м · град.

Уравнение течения Прандтля-Рейсса оценивает пластические и упругие деформации в ходе совмещенного процесса литья и прокатки (2.12) [24]:

$$\varepsilon_\chi = \frac{3}{2} \cdot \frac{\varepsilon_e}{\sigma_e} (\sigma_\chi - \sigma_0) \quad (2.12)$$

где ε_χ – скорость деформации по оси;

ε_e – интенсивность деформации;

σ_e – интенсивность напряжений;

σ_χ – нормальное напряжение;

σ_0 – напряжение течения.

Турбулентный режим движения расплава в кристаллизационной лунке формируется в результате проникновения в нее широкого спектра гидродинамических пульсаций из основного потока жидкого металла [53]. В близком к поверхности вязком слое передача импульса и тепловой энергии объясняется безразмерным числом Прандтля, которое показывает связь между молекулярной теплопроводностью и вязкой передачей. Согласно исследованию О Рейнольдса переход от ламинарного к турбулентному потоку происходит при достижении определенного критического значения безразмерного параметра Re который характеризует соотношение инерционных сил и сил вязкого сопротивления. В реальных условиях металлургических расплавов нарушение постоянства потока и сильное развитие турбулентных движений сразу связано с превышением критического числа Рейнольдса поэтому этот параметр имеет важное

значение при изучении режимов потока и при моделировании гидродинамического и теплового обмена в области кристаллизации.

Воздействие на жидкий и кристаллизующийся металл сильно влияет на эффективность литейного процесса. Современные методы производства фольги сложны и требуют много времени и ресурсов, что часто приводит к потерям металла и снижению качества продукции. При получении полосы на агрегате БП возникает целый комплекс взаимосвязанных тепловых и гидродинамических явлений [25, 65]. Среди них – движение расплава по литниковой системе, формирование турбулентного и конвективного течения в зазоре между валками-кристаллизаторами, контактный и бесконтактный теплообмен с элементами установки, переохлаждение жидкого металла, зарождение и рост кристаллов, диффузионное перераспределение примесей, образование новых фаз и неметаллических включений, а также усадочные процессы при охлаждении [77]. В традиционных схемах литья эти процессы развиваются в основном под действием гравитации.

С развитием совмещенной технологии литья и прокатки внимание смещается на управляемые теплосиловые воздействия – внешнее давление, электромагнитные поля, вибрационные нагрузки и другие факторы, которые позволяют целенаправленно влиять на структуру и свойства металла [37, 38]. При этом важно учитывать ряд принципиальных положений:

- повышение внешнего давления в литниковой системе предотвращает развитие кавитации в перемешиваемом расплаве и способствует более стабильному течению металла;

- изменение схемы подвода расплава к насадке и в зону зазора между валками приводит к перераспределению уровней турбулентности и, соответственно, к иной картине перемешивания металла в кристаллизующемся слое;

- применение вибрации в сочетании с эффективной системой теплоотвода в специальном резервуаре способствует увеличению интенсивности конвективного теплообмена и изменению параметров;

- управление толщиной диффузионного пограничного слоя вблизи фронта кристаллизации дает возможность регулировать интенсивность перераспределения легирующих и вредных примесей в процессе затвердевания сплава;

- увеличение скорости кристаллизации достигается за счет возрастания температурного градиента на границе «жидкое–твердое», что обеспечивается вибрационным воздействием и интенсификацией перемешивания расплава;

- морфология и пространственная ориентация дендритных кристаллов в отливке определяется совокупным влиянием толщины диффузионного пограничного слоя, направления и интенсивности конвективных потоков, характера теплоотвода, а также действием гравитационных и наложенных внешних сил. Если гравитационное воздействие не учитывается, процесс кристаллизации сплава определяется воздействием поверхностного натяжения расплава;

- контроль за чистотой междендритных пространств от ликвирующих примесей осуществляется за счет увеличения скорости подачи металла и создания отрицательного давления на границе затвердевания сплава;

- вибрационное воздействие, как правило, улучшает плотность и сплошность отливки, повышает ее текучесть и трещиностойкость, уменьшает размер и количество усадочных дефектов, что ведет к снижению доли брака;

- регулирование скорости перемещения расплава вдоль фронта затвердевания позволяет управлять скоростью роста кристаллов и углом ориентации дендритов в объеме отливки или полосы;

- для достижения высоких квантанционных давлений, необходимых для дробления уже сформировавшихся кристаллов и образования дополнительных центров кристаллизации, применяют предварительную дегазацию и рафинирование сплавов; кроме того, воздействие вибрации в интервале температур между линиями ликвидуса и солидуса сокращает продолжительность стадии кристаллизации;

- интенсификация перемешивания расплава при продувке инертными газами (например, аргоном) усиливает тепло- и массоперенос, ускоряет затвердевание,

способствует измельчению структуры и снижает склонность металла к макро- и микронеоднородности.

При анализе процессов обработки металлов давлением широко применяются модели плоского деформированного состояния. В подобной постановке задача решается на основе системы уравнений равновесия с учетом условий пластического течения, уравнения несжимаемости материала, а также конститутивных соотношений, устанавливающих связь между компонентами тензора напряжений и полем перемещений. В области контакта системы «расплав – насадка–рабочий валок» на базе этих предпосылок формулируется соответствующая совокупность математических уравнений, описывающих напряженно-деформированное и кинематическое состояние среды [7, 51].

Расположение точки входного контакта валков-кристаллизаторов [HI] (2.13):

$$u = 0, v = v_{\text{вход}}, \frac{dT}{dy} = 0 \quad (2.13)$$

Расположение контакта распределительной насадки с валками кристаллизаторами [AB], [EG], [CG] (2.14–2.16):

$$u = 0, v = v_p, T = T_p \text{ в } \overline{AB} \quad (2.14)$$

$$u = v = 0, T = T_p \text{ в } \overline{EG} \quad (2.15)$$

$$u = v = 0, T = T_p \text{ в } \overline{CG} \quad (2.16)$$

где T_p – температура расплава, град.

Расположение контакта лунки расплава [CD] (2.17):

$$\frac{du}{dy} = 0, v = 0, \frac{dT}{dy} = 0 \quad (2.17)$$

где u – расстояние по горизонтали от центральной оси валков до точки входного контакта, мм;

v – расстояние по вертикали от базовой линии до точки входного контакта, мм.

Зона контакта между лункой и поверхностью валка [DI] (2.18, 2.19):

$$u = (y - y_0)\omega, v = -(x - x_0)\omega \quad (2.18)$$

$$-k \frac{dT}{dn} = h_{\text{конт}}(T - T_K) \quad (2.19)$$

где k – теплопроводность материала валка, Вт/(м·К);

$h_{\text{конт}}$ – коэффициент теплопереноса, Вт/(м²·К);

T_K – температура поверхности валков в зоне контакта с расплавом, град;

ω – скорость вращения валков, об/мин.

Режимы управления и параметры настройки бесслиткового прокатного агрегата в значительной степени определяют кинематику вращения валков-кристаллизаторов. Изменение частоты и характера их вращения напрямую связано с реализуемым значением опережения прокатки, которое фактически задает граничные условия в зоне контакта металла с рабочей поверхностью валков.

Введенный в расчет коэффициент теплопередачи h_{const} используется для описания совокупного влияния тепловых процессов в этой области контакта [53, 95]. Он служит обобщенной характеристикой изменения условий теплообмена между металлом и валками-кристаллизаторами и применяется при определении локальных тепловых потоков и температурных полей в зоне деформации. Температура расплава при литье и прокатке заготовки из сплава 8011 составляет 690°С и сплава 8006–710°С, температура воды в каналах стержня валка-кристаллизатора остается постоянной как на входе, так и на выходе, а также сбалансированы тепловложение и теплоотдача.

Применение условий радиального и конвективного охлаждения для оценки температуры поверхностей валков, не контактирующих с расплавом (2.20, 2.21):

$$-k \frac{dT}{dn} = h_w(T - T_w) \quad (2.20)$$

$$\frac{dT}{dn} = 0, 0 \leq \phi \leq 2\pi \quad (2.21)$$

где T_w – температура поверхностей валков, град;

n – нормаль к поверхности контакта;

h_w – коэффициент теплопереноса от валков, Вт/(м²·К).

Тепловые изменения внутри валка выражаются следующим образом (2.22, 2.23):

$$-kr \frac{dT}{dr} = h_{\text{конт}}(T - T_x) + h_{\text{вращ}} \quad (2.22)$$

$$(T - T_x), \frac{\pi}{2} \leq \phi \leq (\pi - \phi_1) \quad (2.23)$$

где r – диаметр валка, м;

ϕ – угол наклона валков относительно горизонтали, градусы;

$h_{\text{вращ}}$ – коэффициент теплоотдачи при вращении валка.

Температуры поверхности валков в зоне контакта с расплавом в лунке рассчитывают по соотношению (2.24) [78]:

$$-k \frac{dT}{dn} = h_{\text{конт}}(T_K - T), (\phi_1 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}) \quad (2.24)$$

В зоне контакта валка с расплавом поток водоохлаждения можно рассматривать как турбулентный. Это позволяет оценить, как вода обменивается теплом с лункой расплава в потоке, используя коэффициент теплопереноса (J) [73, 78].

Связь между критерием подобия Nu и коэффициентом теплопереноса выражается следующим образом (2.25–2.28) [53]:

$$Nu = \frac{(f/8)RePr}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1) \frac{h_w D_w}{k_w}} \quad (2.25)$$

$$f = (1,821 \log_{10} Re - 1,64)^{-2} \quad (2.26)$$

$$Re = \rho_w U D_h / \mu_w \quad (2.27)$$

$$Pr = \mu_w C_w / k_w \quad (2.28)$$

где D_w – характерный размер, м;

k_w – коэффициент теплопроводности расплава Вт/(м·К);

Pr – число Прандтля;

f – коэффициент гидравлического трения;

U – характерная скорость, м/с;

D_h – гидравлический диаметр, м;

C_w – удельная теплоемкость среды, Дж/(кг·К);

μ_w – динамическая вязкость среды, кг/(м·с);

ρ_w – плотность среды, кг/м³;

Re – число Рейнольдса.

На рисунке 2.5 представлена цифровая диаграмма температурных полей валков-кристаллизаторов, построенная по результатам измерений, выполненных непосредственно в процессе литья и прокатки алюминиевых сплавов 8011 и 8006 [7, 95]. Экспериментальные данные получены с использованием контактных термопар, а также методом вымораживания термопар в межвалковом зазоре перед остановкой агрегата после выпуска партии заготовок.

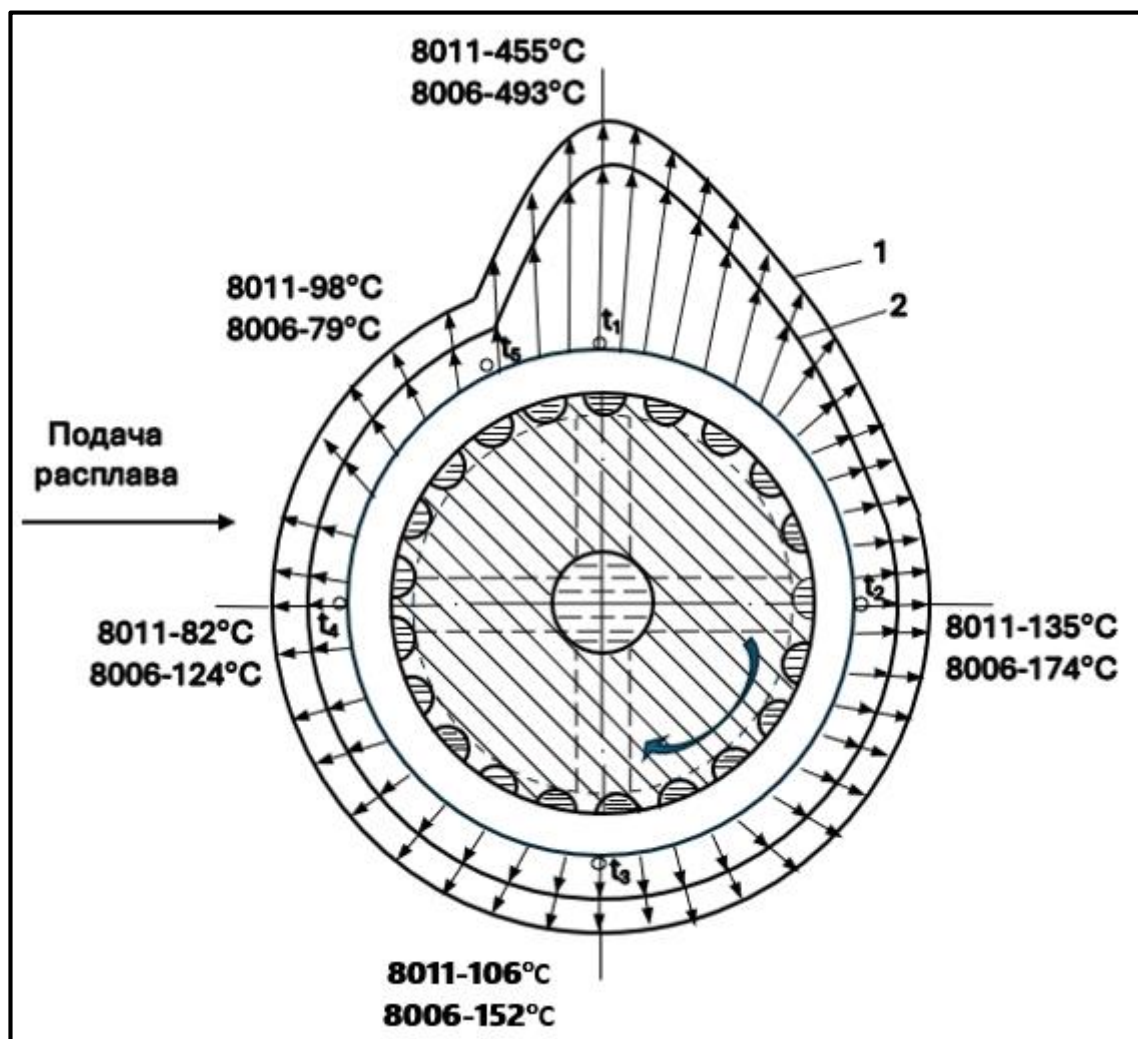


Рисунок 2.5 – Цифровая диаграмма температурных полей валков-кристаллизаторов для алюминиевых сплавов: 1 – для сплава 8011; 2 – для сплава 8006 [51]

При постановке и численном решении рассматриваемой задачи необходимо учитывать выраженную изменчивость температурного поля в зоне деформации, обусловленную совокупным влиянием температуры ликвидуса и солидуса, химического состава сплава, а также преобразования геометрии полосы в активной области валков-кристаллизаторов [32, 54]. В полностью затвердевших сечениях

полосы пластическая деформация распределяется практически по всей толщине, что приводит к перераспределению температур и формированию характерного температурного профиля по высоте сечения [26, 28]. В области, где металл находится в полутвердом (двухфазном) состоянии, механизм деформирования иным образом определяется: основную роль играет выдавливание жидкой фазы из межкристаллитных промежутков, при этом толщина уже сформировавшейся твердой корки остается практически постоянной. Еще одной специфической особенностью процесса является относительное проскальзывание между поверхностью полосы и поверхностью вала после завершения кристаллизации в характерной точке А. Для корректного описания кинематики в этой зоне вводят переменную скорость ω_x , согласованную с условием постоянства секундных объемов. Такой подход позволяет одновременно учесть геометрическую эволюцию деформируемого сечения и нестационарный характер протекания процесса во времени.

Уточнение модели температурного поля осуществлялось путем сопоставления результатов численных расчетов с экспериментально измеренными значениями температуры в ряде характерных контрольных точек. Такое сравнение проводилось для совмещенного процесса литья и прокатки и последующей прокатки полосы из деформируемых алюминиевых сплавов марок 8011 и 8006.

Применение математического моделирования на агрегатах типа БП дает возможность восстанавливать пространственно-временную картину температурного состояния как в теле формируемой полосы, так и в бандаже вала-кристаллизатора при различных сочетаниях технологических режимов и конструктивных параметров оборудования [56]. При анализе изменения температуры поверхности бандажного вала на протяжении одного оборота можно выделить следующие особенности:

- при контакте с расплавом поверхностная температура валков достигает пика в пределах 450–500°C;
- после поворота вала на 90° температура снижается до 130–175°C;

- в точке начала контакта с литниковой системой была зафиксирована минимальная температура, которая составляет 90–110°C.

Формирование температурного поля в зоне процесса определяется совокупным воздействием ряда технологических и конструктивных факторов [32, 73]. К ним относятся уровень температуры ведения процесса, термофизические характеристики материала банджа валков, физико-металлургические свойства применяемого сплава (в частности, величина и форма интервала кристаллизации), параметры и схема системы охлаждения, а также конструкция, диаметр и режим работы валков. При совмещенном литье и прокатке условия теплообмена на границах раздела зависят, помимо прочего, от толщины формируемой отливки, ее кристаллического строения, состояния поверхности, наличия или отсутствия дефектов, а также от степени стабильности режимов, определяющих протекание процесса.

В условиях бесслитковой прокатки особое значение имеет контроль перегрева расплава ($T_{пер}$) относительно температуры ликвидуса. Для алюминиевых сплавов допустимый перегрев обычно ограничивается интервалом 15–35°C, и соблюдение этого диапазона необходимо для устойчивого формирования полосы и получения требуемой структуры. Обычно поверхность валков-кристаллизаторов перед входом в расплав держат нагретой до 65–110°C. Если температура падает ниже 65°C, корка затвердевающего металла формируется хуже, и процесс становится нестабильным [79]. На выходе из зазора между валками температура материала почти всегда приближается к солидусу сплава – именно эта точка показывает, завершилась ли кристаллизация.

Выбор правильных технологических и конструктивных параметров для совмещенного литья и прокатки улучшает тепловой режим в работе валков, повышает качество фольговой заготовки и в то же время увеличивает производительность. Поскольку процессы теплообмена и деформации многомерны, для анализа используют трехмерное моделирование – только так учитывают не прямые, нелинейные факторы и их влияние на температурные поля.

Анализ показал – температурный режим в зоне литья и прокатки сильно меняется во времени и пространстве. Температура в межвалковом зазоре меняется сложно: в данном случае влияют фазовое превращение, неравномерность теплообмена, особенности пластической деформации. Сформировать температурное поле помогают три основных фактора: скорость подачи расплава, температура валков, и интенсивность охлаждения.

Особенности теплового режима, которые выявили при моделировании – инерционность, задержки, нелинейное изменение свойств материала – показывают, что система теплотехнически сложна. Для таких объектов, как подробно описано в разделе 2.1, больше всего подходят структуры предиктивного управления. Это объясняет, почему для дальнейшего синтеза системы регулирования выбран подход MPC.

Бесслитковая прокатка отличается сложным взаимодействием между потоками расплава, охлаждением валков и затвердеванием металлургической корки [65]. Даже небольшие отклонения в динамике потока приводят к тому, что структура жидкой лунки меняется, образуя зоны повышенной турбулентности, где граница между жидкой и полутвердой фазами становится размыта.

Дополнительные исследования показали, что на форму лунки сильно влияют [19, 59]:

- рециркуляционные вихри у входа в зазор;
- пульсации давления, возникающие при колебаниях уровня расплава;
- боковая асимметрия потоков из-за неоднородности в канале подачи.

Численные модели, построенные с использованием трехмерного моделирования, подтвердили, что распределение вязкости в зоне ликвидус–солидус имеет высокую чувствительность к скорости деформации [64, 92, 114]. Так, при увеличении скорости литья на 10 % доля жидкой фазы возрастает в среднем на 6–8%, что существенно увеличивает подвижность фронта кристаллизации [96].

В реальном производстве это приводит к образованию:

- участков локального перегрева;

- зон с ускоренным ростом дендритов;
- неоднородности структуры по толщине заготовки.

Одним из новых результатов исследования стало выявление эффекта радиального теплового дрейфа, при котором максимум температуры смещается не вдоль ширины полосы, а по радиусу валков. Это связано с особенностями турбулентного охлаждения воды внутри валков. Установлено, что уменьшение расхода воды на 5% вызывает повышение температуры внутренних слоев валка на 18–22°C и приводит к росту температуры его поверхности на 7–10°C через 3–4 мин работы.

Следовательно, адекватная модель теплопереноса должна учитывать:

- нелинейный характер распределения коэффициента теплопроводности;
- изменение доли жидкой фазы в процессе кристаллизации;
- структуру вихревых течений в гидродинамическом пограничном слое;
- температурную инерцию массивного тела валка.

Учет перечисленных факторов позволил существенно повысить точность модели и обеспечить ее согласование с экспериментальными данными. Тем самым результаты моделирования и измерений, представленные в разделе 2.2, формируют теоретическую и прикладную основу для построения системы управления температурным режимом, адаптированной к условиям бесслитковой прокатки. Дальнейшее развитие этой задачи рассматривается в следующем разделе.

2.3 Анализ и верификация математической модели температурного режима в бесслитковой прокатке

Для проверки правильности и эффективности математической модели, построенной в разделе 2.2, задача теплопередачи была решена численно методом конечных разностей [30, 33, 93]. Расчетная область дискретизировалась по координате и времени, а производные в уравнении теплопроводности заменялись разностными отношениями, что позволило перейти от дифференциальной постановки к системе алгебраических уравнений, удобной для вычислительной реализации.

В рамках численной реализации пространственная область была разбита на узлы с шагом Δx , а процесс во времени – на шаги Δt . Для аппроксимации уравнения теплопроводности использована явная разностная схема. Коэффициент температуропроводности α рассчитывался как отношение коэффициента теплопроводности к произведению плотности на удельную теплоемкость; для обеспечения устойчивости расчета выполнялось условие Куранта–Фридрихса–Леви, связывающее шаги Δt и Δx . Для аппроксимации уравнения теплопроводности использована явная схема (2.29):

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} (T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) + \frac{\Delta t \cdot q_v}{\rho \cdot C_{\text{эфф}}} \quad (2.29)$$

где T_i^{n+1} – температура в узле i в момент времени n ;

$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_{\text{эфф}}}$ – коэффициент теплопроводности.

Данное выражение показывает, что температура в каждом узле на новом временном шаге вычисляется на основе значений в том же и соседних узлах на предыдущем шаге [3]. Для обеспечения устойчивости расчетов соблюдалось условие Куранта–Фридрихса–Леви $\frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2}$. На границах области учитывался конвективный теплообмен с поверхностью валков по закону Ньютона [78]. В ряде расчетов рассматривались также неявные схемы и схема Кранка–Николсона, обеспечивающие безусловную устойчивость.

Математическая модель была реализована в программе Python с использованием библиотек NumPy для работы с массивами и матричными вычислениями, SciPy для решения систем уравнений, Matplotlib для визуализации результатов, Tkinter для создания интерфейса и т. д. При моделировании значения типа температуры расплава, скорости литья, скорости охлаждения и т. д. заполняются в соответствии с экспериментальными параметрами, значения типа длины валков, радиуса валков, расстояния между валками фиксируются и будут рассчитывать значения температуры в соответствии с положением на поверхности валков кристаллизаторов. Результаты моделирования показаны на рисунках 2.6 и 2.7.

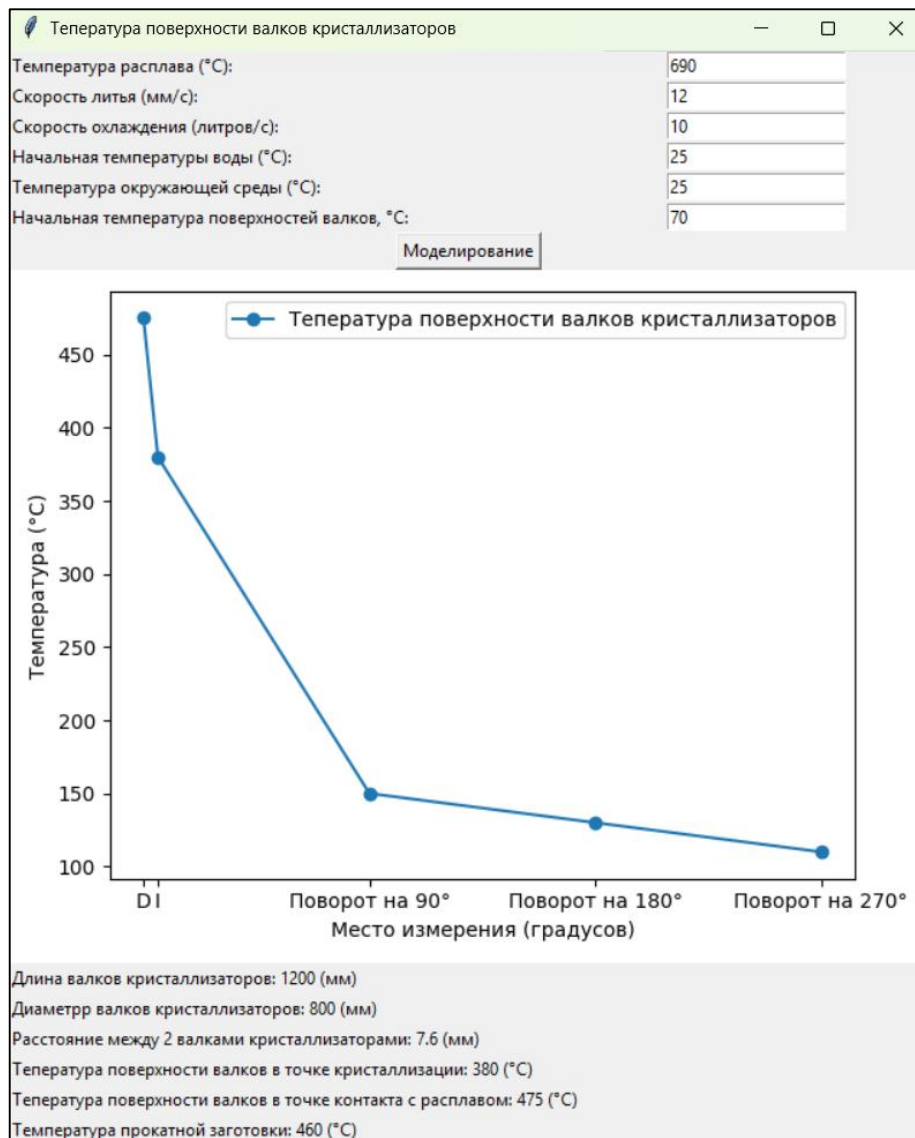


Рисунок 2.6 – Зависимость температуры поверхности валков кристаллизаторов при нижних граничных условиях (составлено автором)

Температура поверхности ролика определяется в начальной точке контакта в точке D (начальный контакт поверхности расплава с валком). Здесь температура достигает самого высокого значения – около 440–475°C. После достижения точки кристаллизации (точка I - зона кристаллизации, где металл полностью перешел из жидкого в твердое состояние) температура снижается до 360–380°C. Затем, по мере того как валки продолжают вращаться и проходят углы 90°, 180° и 270°, температура постепенно снижается до 145°C, 120°C и 100°C соответственно. Температура полученной заготовки после выхода из зоны кристаллизации составляет 445–460°C.

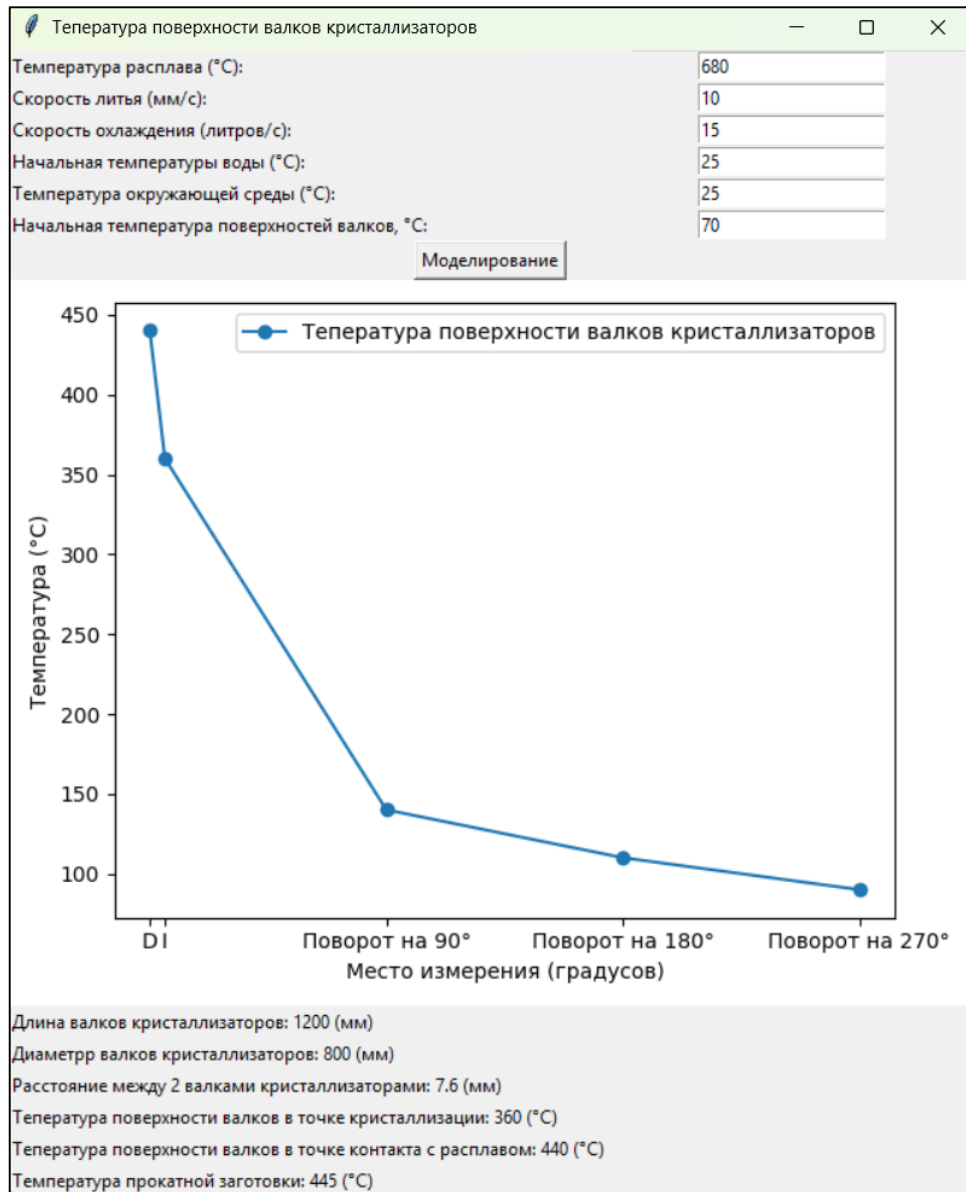


Рисунок 2.7 – Зависимость температуры поверхности валков кристаллизаторов при верхних граничных условиях (составлено автором)

В таблице 2.1 представлены результаты сравнения температур, полученных по модели, и экспериментальных значений, измеренных с помощью контактных термопар в точках поверхности валков.

Таблица 2.1 – Сравнение результатов моделирования и эксперимента (по данным автора)

| Входные данные | Параметр | Значение | ΔT (°C) | ΔT (%) |
|-------------------------------|--------------------------|----------|-----------------|----------------|
| | Температура расплава, °C | 680–690 | - | - |
| | Скорость литья, мм/с | 10–12 | | |
| Скорость охлаждения воды, л/с | 10–15 | | | |

Продолжение таблицы 2.1

| Входные данные | Параметр | Значение | | ΔT (°C) | ΔT (%) | | | | |
|---|---|----------|-------------|-----------------|----------------|---------------|---------|-----------------|----------------|
| | Начальная температура воды охлаждения, °C | 25 | | - | - | | | | |
| | Температура среды, °C | 25 | | | | | | | |
| | Длины валков кристаллизаторов, мм | 1200 | | | | | | | |
| | Диаметр валков кристаллизаторов, мм | 800 | | | | | | | |
| | Расстояние между 2 валками кристаллизаторами, мм | 7,6 | | | | | | | |
| | Скорость подачи расплава, кг/с | 5–6 | | | | | | | |
| | Начальная температура поверхностей валков, °C | 70–90 | | | | | | | |
| | Скорость воздушного охлаждения, м ³ /с | 2 | | | | | | | |
| | Выходные данные | Параметр | Эксперимент | | | Моделирование | | ΔT (°C) | ΔT (%) |
| Диапазон | | | Среднее | | | Диапазон | Среднее | | |
| Температура валков в точке кристаллизации, °C | | 370–400 | 385 | 360–380 | 370 | 15 | 3.89 | | |
| Температура валков при начальном контакте с расплавом, °C | | 450–500 | 475 | 440–475 | 457.5 | 17.5 | 3.68 | | |
| Температура валков после поворота на 90 градусов, °C | | 130–175 | 152.5 | 140–150 | 145 | 7.5 | 4.92 | | |
| Температура валков после поворота на 180 градусов, °C | | 100–150 | 125 | 110–130 | 120 | 5 | 4 | | |
| Температура валков после поворота на 270 градусов, °C | | 80–120 | 100 | 90–120 | 105 | 5 | 5 | | |
| Температура прокатной заготовки, °C | | 450–480 | 465 | 445–460 | 452.5 | 12.5 | 2.69 | | |

Из приведенных выше результатов сравнения видно, что использованная математическая модель имеет высокую точность. Максимальная разница составляет не более 5%, что вполне приемлемо в рамках технического анализа [13]. Математические модели могут использоваться для разработки цифровых систем управления, а также для предиктивной настройки параметров процесса [20].

Верификация математической модели требует сравнения расчетных результатов с экспериментальными и проверки ее устойчивости при изменении

входных параметров. В данном исследовании была проведена серия экспериментов с различными значениями ряда параметров, а именно:

- начальная температура валков;
- расход воды;
- скорость расплава;
- степень перегрева сплава перед входом в насадку.

Просто сравнить температуру на поверхности ролика мало – нужны подробные данные о погрешностях. Для анализа смотрим на три вещи:

- форму температурной кривой;
- положение точки начала кристаллизации;
- толщину корки в трех ключевых сечениях.

Параметры реально влияют на точность модели. Если поднять температуру расплава на 20°C, граница солидуса сдвигается на 6–8 мм вперед. А если увеличить критерий Рейнольдса в канале охлаждения на 15%, модель стабильно недооценивает коэффициент теплоотдачи примерно на 12%. В случаях, когда охлаждение валков несимметрично, ошибка прогнозируемой температуры возрастает до 5–7%. Результаты уточняют, как далеко можно применять модель, и показывают, в какую сторону ее стоит развивать дальше.

Дополнительно оценивали пригодность модели для работы в составе MPC-алгоритма. Показано, что расчет одного временного шага на стандартном промышленном контроллере занимает 0,3–0,5с. Это позволяет выполнять прогноз на 10–15 шагов вперед в реальном времени и подтверждает применимость модели в составе цифровой системы управления.

2.4 Выводы по главе 2

Таким образом, выполненные исследования позволили раскрыть особенности тепловых процессов в зоне совмещенного литья и прокатки алюминиевых сплавов и выделить основные факторы, определяющие температурный режим. Показано, что в условиях выраженной пространственно-временной неоднородности системы «валки - заготовка» наиболее высокие показатели точности и устойчивости обеспечивает предиктивное управление.

В работе выполнено детализированное математическое моделирование теплопереноса в зоне совмещенного литья и прокатки с учетом фазовых превращений, скрытой теплоты кристаллизации и температурной зависимости теплофизических свойств сплава; разработана численная схема решения соответствующей краевой задачи. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показало удовлетворительное совпадение температур валков и заготовки. Выявленные расхождения не превышают допустимых технологических допусков, что подтверждает корректность предложенной модели и возможность ее использования для инженерных расчетов и настройки системы управления тепловым режимом.

На основе моделирования получено количественное описание температурных полей в ключевых зонах процесса. Уточнены зависимости между скоростью охлаждения, глубиной жидкой лунки, температурой поверхностей валков и качеством формируемой корки. Это позволило выявить критические режимы, при которых возрастает риск образования дефектов структуры и неустойчивости процесса.

Кроме того, разработан комплексный подход к выбору системы регулирования, основанный на свойствах объекта, величине запаздывания, динамике тепловых процессов и результатах моделирования. Установлено, что наиболее эффективным решением для условий бесслитковой прокатки являются системы класса MPC, которые способны учитывать прогнозируемые состояния объекта и ограничения технологического процесса.

ГЛАВА 3 ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ БЕССЛИТКОВОЙ ПРОКАТКИ

На основе температурных моделей, точность которых была проверена в разделе 2.3, в этой главе основное внимание уделяется разработке системы контроля температуры посредством проектирования функциональной структуры, алгоритма работы и программирования модели.

3.1 Изучение структурно-функциональной организации системы управления процессом бесслитковой прокатки

Технологический процесс бесслитковой прокатки можно представить в виде структурной схемы объекта управления, изображенной на рисунке 3.1.

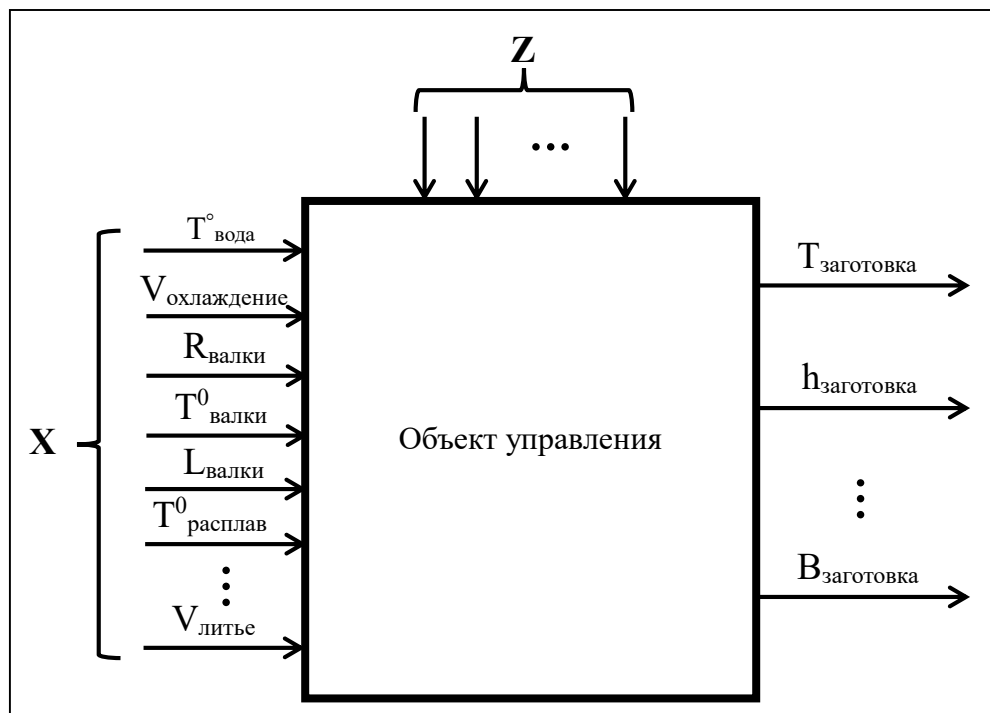


Рисунок 3.1 – Схема входных и целевых выходных данных технологического процесса бесслитковой прокатки для цифровой платформы (составлено автором)

Входные контролируемые управляемые параметры X , как:

- начальная температура охлаждающей воды $T^0_{\text{вода}}$;
- скорость воздушного охлаждения в миксере $V_{\text{охл. воз.}}$;
- скорость подачи водоохлаждения в валки кристаллизации $V_{\text{охл. вода}}$;
- скорость литья $V_{\text{литье}}$;
- температура расплава перед контактом с валками кристаллизации $T^0_{\text{расплав}}$;

- начальная поверхностная температура валков кристаллизации перед контактом с расплавом $T^0_{\text{валки}}$;
- длина валков кристаллизации $L_{\text{валки}}$;
- скорость подачи расплава $V_{\text{расплав}}$;
- радиус валков кристаллизации $R_{\text{валки}}$.

Входными неконтролируемыми и неуправляемыми переменными Z внешние воздействия, такие как температура, влажность воздуха; стабильность напряжения; стабильность работы оборудования.

На выходе получают ожидаемые достигнутые параметры. Этими параметрами являются температура $T_{\text{заготовка}}$, толщина $h_{\text{заготовка}}$, ширина $B_{\text{заготовка}}$ и качество поверхности полученной заготовки.

Структурно-функциональной организации системы управления процессом бесслитковой прокатки представлена на рисунке 3.2.

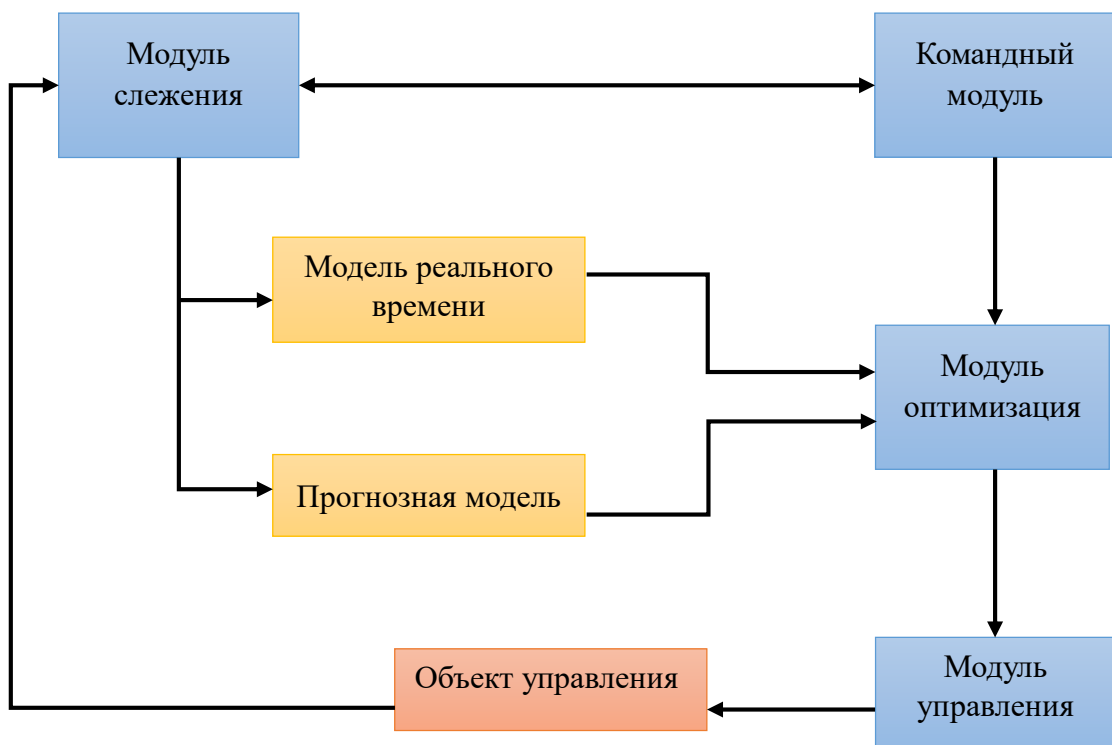


Рисунок 3.2 – Структурная организация цифровой системы управления процессом бесслитковой прокатки (составлено автором)

Система управления процессом бесслитковой прокатки состоит из 4 основных модулей: модуль управления, модуль оптимизации, командный модуль и модуль слежения [20]. Разделение на модули направлено на оптимизацию

производительности каждого этапа управления, такого как прием сигнала, обработка сигнала и генерация сигнала, обеспечивая при этом гибкость и простоту изменения команд при возникновении проблем или необходимости корректировки.

Командный модуль отвечает за прием входных параметров от оператора и последующую отправку элементарных команд другим модулям. Эти параметры предлагаются в поле ввода параметров, чтобы оператор мог немедленно начать производство или внести изменения. В то же время командный модуль отвечает за обеспечение порядка выполнения команд в правильном порядке, а именно:

- формирование последовательностей шагов управления;
- передача каждого шага команды в модуль управления;
- мониторинг логического потока всей последовательности команд.

Кроме того, командный модуль также отправляет оператору общую информацию о состоянии процесса и выдает предупреждения о несоответствии спецификациям [100].

Модуль мониторинга имеет следующие основные задачи:

- получение данных от командного модуля и последующее отображение на экране желаемых параметров управления объектом в реальном времени;
- получение обратной связи от исполнительных механизмов, данных датчиков и последующее отображение фактических параметров управления на экране управления;
- сравнение фактического состояния параметров управления и желаемого состояния и непрерывная передача данных в командный модуль и модуль оптимизации.

Основная задача модуля оптимизации – найти параметры управления, которые наилучшим образом соответствуют запрограммированным требованиям и техническим параметрам, полученным от командного модуля. В процессе работы информация о параметрах управления постоянно обновляется и затем сравнивается с требуемыми параметрами. Данные о плане оптимизации передаются в модуль управления.

Основными задачами модуля управления являются:

- преобразование полученных сигналов в фактические сигналы управления, такие как импульсы ШИМ, ток 4–20 мА, напряжение 0–10 В, цифровые сигналы или управление через промышленную шину;

- автоматическая компенсация небольших отклонений, быстрых колебаний, физических помех без необходимости вмешательства других модулей.

- поддержание рабочих параметров машины в пределах безопасного порога.

Дополнительно к перечисленным функциям система управления процессом бесслитковой прокатки и прокатки алюминиевых сплавов должна обеспечивать выполнение ряда требований, связанных как с качеством регулирования, так и с интеграцией в общую архитектуру автоматизированной системы управления технологическим процессом.

Во-первых, на уровне технологического объекта необходимо поддерживать температуры расплава и валков в заданных интервалах с минимальными динамическими отклонениями. Особо важным является контроль температуры расплава перед валками и температуры в зоне кристаллизации, поскольку именно эти параметры определяют положение фронта кристаллизации, структуру и дефектность заготовки. Допустимые отклонения по температуре, как правило, не должны превышать 3–5% от заданного значения.

Во-вторых, система управления должна обеспечивать стабилизацию геометрических параметров бесслитковой заготовки – толщины и ширины – в пределах допусков, заданных технологическим регламентом. В реальных условиях изменения скорости литья, состава сплава, интенсивности охлаждения приводят к изменению деформационного режима в зазоре валков и, соответственно, к отклонениям толщины и ширины. Задача системы управления заключается в том, чтобы компенсировать влияние этих возмущений за счет своевременной корректировки температурного и деформационного режима.

В-третьих, к числу важнейших требований относится предотвращение возникновения дефектов поверхности и внутренней пористости [29, 50]. Устойчивое ведение температурного режима в сочетании с правильно подобранными скоростями литья и охлаждения позволяет минимизировать

вероятность образования горячих трещин, усадочных раковин, полосчатости структуры и других дефектов, приводящих к увеличению доли брака [69, 75, 87].

Наконец, система должна быть адаптивной по отношению к изменению марок сплава и режимов производительности агрегата. Это означает, что при переходе на другую марку алюминиевого сплава с отличающимися теплофизическими свойствами или при изменении требуемой толщины и скорости литья система управления должна сохранять заданный уровень качества регулирования без длительных ручных перенастроек.

К основным количественно измеряемым показателям качества управления относятся статическая точность поддержания температурных и геометрических параметров, величина перерегулирования при переходных процессах, время перехода к установившемуся режиму, робастность к внешним возмущениям и параметрическим неопределенностям, а также энергоэффективность, характеризующая удельное энергопотребление на тонну готовой продукции [45]. В таблице 3.1 представлены основные показатели качества системы управления процессом бесслитковой прокатки.

Таблица 3.1 – Основные показатели качества системы управления процессом БП [5]

| Показатель | Обозначение | Требуемый уровень |
|---|----------------|-------------------|
| Отклонение температуры расплава перед валками | ΔT_p | не более 2–3 % |
| Отклонение температуры в зоне кристаллизации | ΔT_k | не более 3–4 % |
| Отклонение толщины заготовки | Δh | не более 1–2 % |
| Время переходного процесса по температуре | $t_{пер}$ | не более 20–30 с |
| Сбой регулирования по температуре | $\sigma_{пер}$ | не более 3–5 % |
| Снижение доли брака | – | не менее 15–25 % |
| Снижение удельного энергопотребления | – | не менее 5–10 % |

Перечисленные показатели далее используются в качестве критериев при выборе структуры модулей системы, алгоритмов регулирования и параметров их настройки.

Структурно-функциональная схема, описывающая работу системы управления, включает командный модуль, модуль мониторинга, модуль оптимизации и модуль управления. Для согласованной работы этих компонентов

необходимо четко формализовать информационные потоки между ними, а также связи с полевым уровнем – датчиками и исполнительными механизмами. На этой основе обеспечивается замкнутость контуров управления и реализуются принципы предиктивного регулирования.

Информационные потоки можно условно разделить на несколько групп. К первой группе относятся измерительные данные от объекта управления: температуры расплава в характерных точках (в миксере, перед валками, в зоне кристаллизации, на выходе из зазора валков), температура поверхности валков, расход и температура охлаждающей воды и воздуха, скорость литья и скорость вращения валков, а также толщина и ширина заготовки в нескольких сечениях. Эти данные с заданным шагом дискретизации поступают в модуль мониторинга, где подвергаются первичной фильтрации и диагностике, и параллельно передаются в модуль оптимизации и модель реального времени.

Ко второй группе относятся управляющие воздействия, которые формируются модулем управления: задания на скорость подачи расплава и скорость вращения валков, задания на расход охлаждающей воды и воздуха, задания на расход смазки и, при необходимости, на усилие прижатия валков [76, 84]. Эти сигналы передаются на ПЛК и далее на исполнительные механизмы по стандартным промышленным протоколам. При этом модуль управления обязан контролировать соблюдение ограничений по амплитуде и скорости изменения управляющих воздействий, чтобы исключить перегрузку приводов и гидросистем.

Третью группу образует командно-диспетчерская информация, задаваемая оператором или системой верхнего уровня. Сюда относятся технологические задания (марка сплава, требуемая толщина и ширина заготовки, диапазоны допустимых температур, плановая производительность), режимы работы агрегата (пуск, останов, режим пониженной производительности, переход на другую марку сплава), а также параметры настройки алгоритмов управления (горизонт прогнозирования, весовые коэффициенты критерия оптимизации, пределы допускаемых отклонений). Командный модуль преобразует эту информацию в набор внутренних заданий для модуля оптимизации и модуля управления.

К четвертой группе относятся диагностическая и сервисная информация: состояние датчиков и исполнительных механизмов, результаты проверки достоверности измерительных каналов, статистика выхода параметров за допустимые пределы, протокол действий оператора и системы. Эти данные используются для построения трендов, анализа надежности, планирования профилактического обслуживания и формирования отчетной документации.

С точки зрения теории автоматического управления совокупность перечисленных информационных потоков формирует разветвленную систему обратных связей, в которой наряду с традиционными обратными связями по измеряемым параметрам объекта значительную роль играют не прямые связи через модель объекта, модуль оптимизации и экономические показатели. Именно благодаря этому становится возможной реализация предиктивных алгоритмов, учитывающих ожидаемое поведение объекта на горизонте прогнозирования.

Особенностью рассматриваемой системы является ее интеграция с подсистемой оперативного контроля химического состава расплава. Результаты контроля содержания основных легирующих элементов и примесей используются для уточнения области допустимых температурных режимов [103]. Например, при повышенном содержании железа или марганца по отношению к регламенту целесообразно корректировать температуру перегрева и скорость подачи расплава таким образом, чтобы уменьшить риск образования грубых интерметаллидных фаз и сегрегации. Обмен данными между подсистемой контроля химического состава и модулем оптимизации позволяет перейти от локальной оптимизации температурного режима к совместной оптимизации структуры и свойств заготовки с учетом химического состава сплава.

Таким образом, дополнение структурно-функциональной схемы четко определенными информационными потоками и учет ограничений, связанных с химическим составом расплава, повышают полноту описания системы управления и создают предпосылки для реализации действительно интегрированного подхода к управлению процессом бесслитковой прокатки.

3.2 Алгоритм контроля основных параметров процесса бесслитковой прокатки

В обобщенном виде задачу предиктивного управления процессом бесслитковой прокатки можно представить как задачу минимизации функционала качества, учитывающего многокритериальный характер технологии [18, 103]. При этом в состав функционала, помимо отклонения температуры от заданного значения, целесообразно включать отклонения толщины и ширины заготовки. В качестве целевой функции для реализуемого алгоритма управления процессом бесслитковой прокатки принимается совместная минимизация отклонения фактической температуры от заданной и величины изменений управляющих воздействий (3.1).

$$\min \sum_{i=1}^N (T_{\text{факт}}(t+i) - T_{\text{зад}}(t+i))^2 + \lambda \sum_{i=0}^{N-1} \Delta u(t+i)^2 \quad (3.1)$$

где $T_{\text{факт}}$ – фактическая температура;

$T_{\text{зад}}$ – заданная температура, необходимая для соблюдения технических условий литья. Определяется технологическими требованиями и вводится оператором через командный модуль;

$\Delta u(t+i)$ – изменение управляющего воздействия (скорости подачи расплава, скорости охлаждения воды, воздуха...);

λ – весовой коэффициент, регулирующий баланс между точностью слежения за температурой и плавностью управляющих сигналов;

N – горизонт прогнозирования. Обычно устанавливается в пределах 5–20 шагов. В этом случае $N=10$.

На функционал накладывается система ограничений, отражающих технологические и конструктивные пределы. Температурные ограничения могут быть заданы в виде (3.2, 3.3):

$$T_{\min}(\Pi) \leq T_{\text{фак}}(\Pi)(t+i) \leq T_{\max}(\Pi) \quad (3.2)$$

$$T_{\min}(\mathcal{K}) \leq T_{\text{фак}}(\mathcal{K})(t+i) \leq T_{\max}(\mathcal{K}) \quad (3.3)$$

где « Π » относится к температуре расплава перед валками;

«к» – к температуре в зоне кристаллизации. Аналогично вводятся ограничения по толщине и ширине заготовки.

Управляющие воздействия ограничиваются диапазоном допустимых значений и максимальными скоростями изменения (3.4, 3.5):

$$u_{min} \leq u(t+i) \leq u_{max} \quad (3.4)$$

$$|\Delta u(t+i)| \leq \Delta u_{max} \quad (3.5)$$

В целом рассматриваемая задача сводится к квадратичной оптимизации с линейными и нелинейными ограничениями, которую решают с помощью стандартных численных методов, адаптированных к требованиям работы в реальном времени.

Выбор горизонта прогнозирования N и шага дискретизации Δt является важным аспектом практического внедрения алгоритма. Если горизонт слишком мал, он не учитывает инерционные характеристики объекта в полном объеме; при избыточно большом горизонте возрастает вычислительная нагрузка и увеличивается чувствительность оптимизации к ошибкам модели. В качестве ориентиров обычно берут время задержки между изменением управляющего воздействия и реакцией температуры, а также постоянную времени объекта. На практике рекомендуют выбирать горизонт прогнозирования, сопоставимый с одной или двумя постоянными времени, а шаг дискретизации подбирать с учетом необходимой скорости реакции системы и вычислительных ресурсов.

Система фиксирует параметры процесса. Для нестационарного режима разумно снимать данные с частотой 10–20 Гц и обновлять вычисления каждые полсекунды–секунду.

Когда появляются типичные возмущения, предиктивное управление уверенно обходит традиционные методы. Например, при следующем возмущении: скорость вращения валков резко увеличилась – это сразу ведет к росту тепловой нагрузки и уменьшению времени контакта с расплавом. Легко получить перегрев заготовки на выходе и сдвиг зоны затвердевания. В таких случаях алгоритм прогнозирует эти колебания и оперативно корректирует работу системы: меняет

температуру металла в смесителе, регулирует подачу охлаждающей воды и подстраивает скорость вращения валков.

Та же картина при изменении температуры воды или марок сплава. Повысилась температура охлаждающей воды – теплоотвод падает. Алгоритм это замечает и компенсирует, увеличивая поток воды или дополнительно корректируя рабочие параметры. Если изменился сплав, изменяются термофизические характеристики и время кристаллизации; модель сразу пересчитывает параметры теплообмена и внутренние источники тепла. В результате автоматическая система стабильно держит качество управления без вредного перерегулирования и затяжных переходных процессов.

Но самая важная часть внедрения – поэтапная отладка и тесты. Сначала собирают данные с крупных реальных агрегатов, строят цифровой двойник, с его помощью настраивают веса, проверяют работу в условиях шума и оценивают устойчивость к ошибкам модели [44, 91, 98]. Потом алгоритм запускают уже на настоящем промышленном контроллере, подключают к объектной модели в реальном времени. Это позволяет имитировать реальные задержки и посмотреть, насколько точен обмен данными.

После цифровых тестов алгоритм работает как советник – дает рекомендации по управлению, а окончательное решение все еще принимают операторы или стандартные системы. Сравнивают действия алгоритма с реальными решениями персонала, анализируют результат, вносят коррективы – только после этого предиктивное управление разрешают перевести в автоматический режим. Все это поддерживается строгими требованиями промышленной безопасности: всегда должен быть быстрый план переключения на ручное или резервное управление. Формулировка четких критериев качества, продуманная система ограничений, обоснованный горизонт прогноза и грамотная отладка обеспечивают внедрение предиктивного управления в реальный промышленный комплекс бесслитковой прокатки.

Чтобы прокатная заготовка соответствовала стандарту, требования к технологии нельзя нарушать. На участке совмещенного литья и прокатки есть три

фазы. Сначала подают расплав в валки-кристаллизаторы, потом идет его кристаллизация в зазоре между валками, а затем – охлаждение и смазка уже сформировавшейся заготовки. На первом этапе обязательно выполнить два условия:

- понизить температуру расплава с 760–800 до 680–690°С;
- поддерживать расход металла на входе в валки на уровне 5–6 кг/с.

На следующем этапе необходимо обеспечить снижение температуры жидкой заготовки с 680–690 до 450–480 °С на участке от зоны контакта с валками до точки завершения кристаллизации. Далее необходимо обеспечить непрерывную смазку с расходом 1–2 л/мин, чтобы заготовка не деформировалась после схода с валков. Алгоритм контроля основных параметров процесса беслитковой прокатки показан на рисунке 3.3 [50].

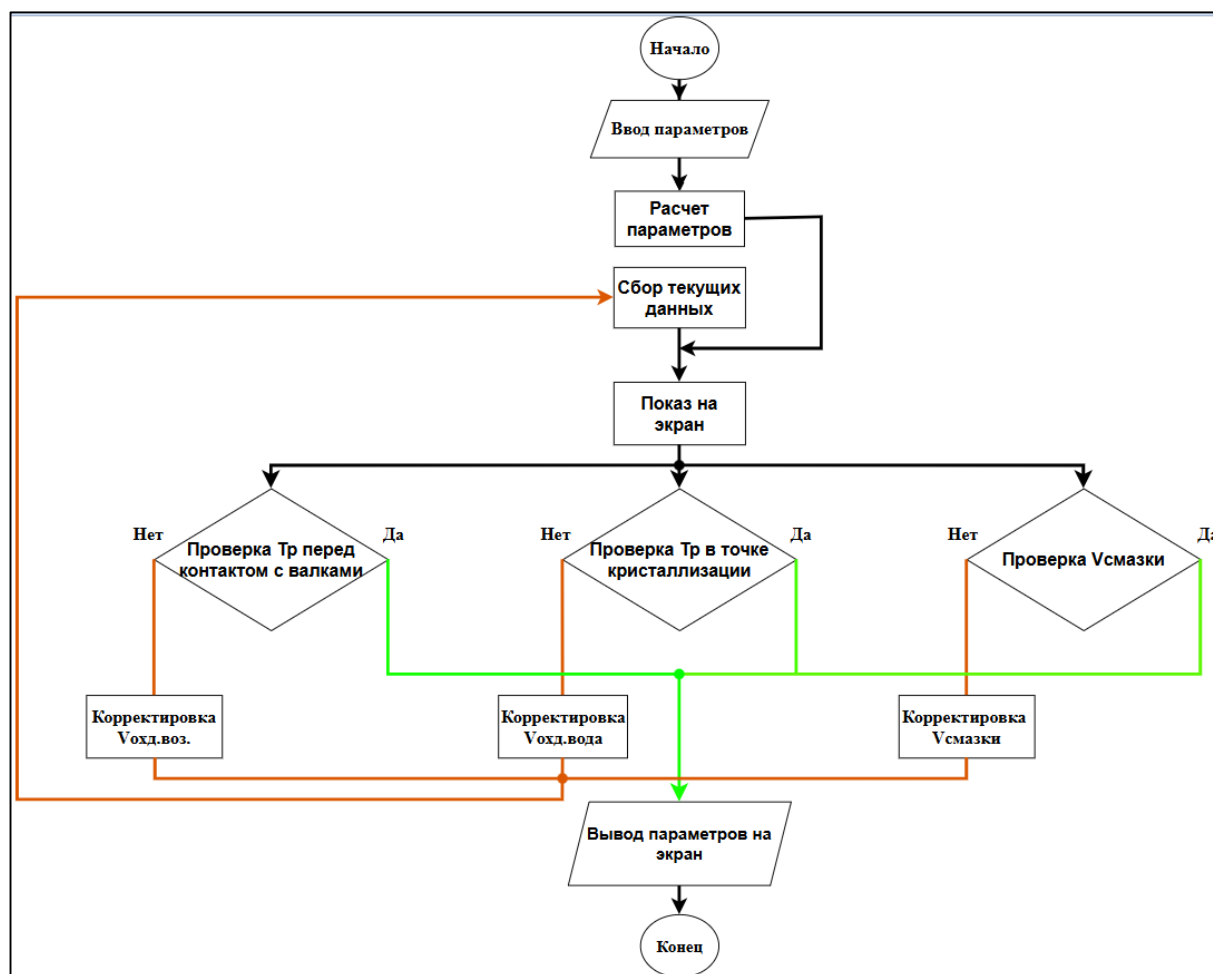


Рисунок 3.3 – Алгоритм контроля основных параметров процесса беслитковой прокатки (составлено автором)

На блок-схеме приняты следующие обозначения:

1. Начало процесса
2. Ввод начальных параметров: скорость литья $V_{\text{литье}}$; скорость охлаждения воды $V_{\text{охл. вода}}$; скорость охлаждения воздуха $V_{\text{охл. воз.}}$; скорость подачи смазки $V_{\text{смазки}}$.
3. Сбор текущих данных от датчиков: температура воздуха и воды; температура расплава перед контактом с валками T_p ; температура расплава в точке кристаллизации (Температура прокатной заготовки); температура поверхности валков; скорость охлаждения воздуха $V_{\text{охл. воз.}}$; скорость подачи смазки $V_{\text{смазки}}$.
4. Показ на экран диаграмм изменения температуры расплава перед контактом с валками и в точке кристаллизации в реальном времени, а также температуры в дальнейшем 10 секунд.
5. Проверка температуры расплава перед контактом с валками в допустимых пределах 680–690°C.
6. Проверка температуры расплава в точке кристаллизации в допустимых пределах 450–480°C.
7. Проверка скорости подачи смазки.
8. Блок корректировки скорости охлаждения воздуха.
9. Блок корректировки скорости охлаждения воды.
10. Блок корректировки скорости подачи смазки.
11. Завершение процесса и вывод параметров на экран.

3.3 Разработка программы контроля основных параметров процесса бесслитковой прокатки

На основе результатов экспериментальных измерений и моделирования разработано программное обеспечение для контроля основных параметров процесса бесслитковой прокатки [35, 50]. Его назначение состоит в раннем предупреждении оператора о неблагоприятных тенденциях, что позволяет предотвращать аварийные ситуации и повышать безопасность производственного процесса.

Разработанное программное обеспечение реализует многоуровневую архитектуру, включающую уровень сбора и предварительной обработки данных, уровень математических моделей и алгоритмов управления, уровень визуализации

и взаимодействия с оператором, а также уровень журналирования и интеграции с внешними системами. Такая структура обеспечивает модульность, расширяемость и удобство сопровождения комплекса.

На этапе сбора и обработки данных система обменивается информацией с контроллерами и измерительными устройствами, переводит сигналы в инженерные единицы, фильтрует шумы и проверяет надежность измерений. Для сглаживания данных используют простые и испытанные методы: скользящее среднее, экспоненциальное сглаживание и медианный фильтр. Так удается убрать высокочастотные выбросы, не теряя основную динамику процесса. При этом система следит, чтобы не было обрывов, зависаний и выходов сигналов за физические пределы.

Если смотреть на эту систему управления с практической стороны, она состоит из связанных между собой блоков, у каждого своя задача. Все вместе они согласуют работу реального производства с вычислительным моделированием.

Модель реального времени контролирует состояние валков и заготовки непрерывно. Она следит за температурой, фиксирует любые отклонения параметров измерений и, если часть данных пропадает, сама восстанавливает текущее состояние процесса с помощью своих внутренних алгоритмов. Прогнозирующая модель формирует развитие системы на N шагов вперед [48]. Это позволяет заранее оценивать возможные изменения температуры и геометрических характеристик, а также учитывать потенциальные риски при выборе управляющих воздействий [66, 103]. На основе прогноза функционирует оптимизационный модуль. Его задача состоит в определении такой комбинации управляющих воздействий, при которой достигается целевая эффективность процесса с соблюдением технологических ограничений. Расчеты выполняются в оперативном режиме.

Дополнительную сложность создает изменчивость производственной среды. Температура охлаждающей воды может отклоняться от номинала, параметры электроснабжения – колебаться, а измерительные сигналы – искажаться под влиянием помех. Анализ показал, что система обладает механизмами

самонастройки и компенсации: отклонения выявляются автоматически, после чего корректирующие воздействия направляются на сохранение устойчивости процесса и требуемого качества продукции. Практическая значимость такой архитектуры состоит в повышении устойчивости бесслитковой прокатки в условиях реального производства. Перенос части функций контроля от оператора к цифровым средствам управления обеспечивает более стабильное и предсказуемое протекание технологического цикла не только в лабораторной, но и в промышленной среде.

Основные функции программы:

1. Мониторинг технических параметров:

Информация, полученная от датчика, будет приниматься и отображаться на экране монитора. К этим параметрам относятся температура воды, температура воздуха, толщина заготовки, скорость прокатки, температура расплава..., обновляемые в режиме реального времени и округляемые до 3-го знака после запятой.

2. Управление параметрами

После ввода необходимых параметров производственного процесса программа автоматически настроится так, чтобы температура расплава перед контактом с валками и температура в точке кристаллизации находились в допустимых пределах.

3. Отображение параметров на графиках в реальном времени

При активации функции проверки посредством соответствующей кнопки осуществляется отображение температура расплава перед контактом с валками в реальном времени. Оператор имеет возможность переключения интерфейса на отображение иных технологических параметров путем нажатия на соответствующие элементы управления

4. Прогнозирование параметров

Программа осуществляет расчет изменения параметров в течение 10 секунд после текущего момента времени и отображает результаты на графике. В случае превышения или приближения параметров к предельным значениям, программа автоматически выполняет корректировку для стабилизации системы.

Для запуска программы оператору необходимо ввести входные данные. В элементах ввода отображаются рекомендованные предустановленные значения, соответствующие допустимым диапазонам. Окно ввода входных параметров показано на рисунке 3.4.

Рисунок 3.4 – Окно ввода входных параметров (составлено автором)

При вводе параметров, не соответствующих рекомендованному диапазону значений или некорректных по формату, на экране отображается предупреждение, требующее корректировки со стороны оператора. Рекомендуемые значения приведены в главе 2. Работа оборудования с параметрами, выходящими за пределы указанных диапазонов, может привести к возгоранию, поломке устройств и нерациональному расходу энергии. Только при условии корректного ввода всех параметров согласно требованиям программа может быть запущена. Пример отображения окна ввода входных параметров при некорректном вводе представлен на рисунке 3.5.

Рисунок 3.5 – Окно ввода входных параметров при неправильном вводе (составлено автором)

Окно, отображающее значения, полученные с датчиков до запуска программы, представлено на рисунке 3.6.

Параметры от датчика

Tвоздух : -- °C ТН₂O : -- °C

Толщина : -- мм

Vлитье: -- мм/с Vподача: -- кг/с

Vохл.воды: -- л/с

Vсмазка: -- л/с Vохл.воздуха: -- м3/мин

Текущая температура расплава перед контакта с валками То.расплав: -- °C

Текущая температура расплава в точке кристаллизации Трасплав: -- °C

Рисунок 3.6 – Окно параметров от датчика до запуска программы
(составлено автором)

После ввода оператором всех параметров в допустимых пределах программа переходит в режим функционирования. На экране отображаются соответствующие параметры, которые обновляются в реальном времени. Окна работы программы контроля основных параметров процесса бесслитковой прокатки и графики изменения основных параметров представлены на рисунках 3.7–3.9.

Ввести входные параметры

Скорость литья Vлитье 10

Скорость подачи водоохлаждения VН₂O 12

Скорость подачи смазки Vсмазка 2

Скорость воздушного охлаждения Vохл.воздуха 2

Проверка Остановка

Параметры от датчика

Tвоздух: 25.000 °C Tвода: 25.000 °C

Толщина изаготовка: 7.600 мм

Vлитье: 9.909мм/с Vподача: 5.507кг/с

Vохл.вода: 12.087л/с

Vсмазка: 1.998л/с Vохл_воздуха: 1.991м3/мин

Текущая температура расплава перед контакта с валками То.расплав: 686.611 °C

Текущая температура расплава в точке кристаллизации Трасплав: 444.073 °C

Рисунок 3.7 – Окно работы программы контроля основных параметров процесса бесслитковой прокатки (составлено автором)

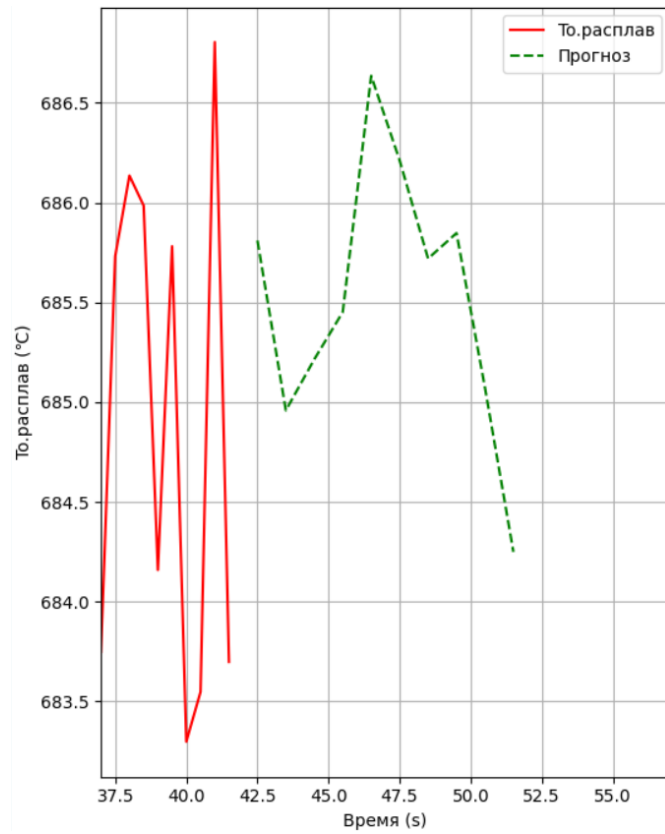


Рисунок 3.8 – График изменения температуры расплава перед контактом с валками в реальном времени (составлено автором)

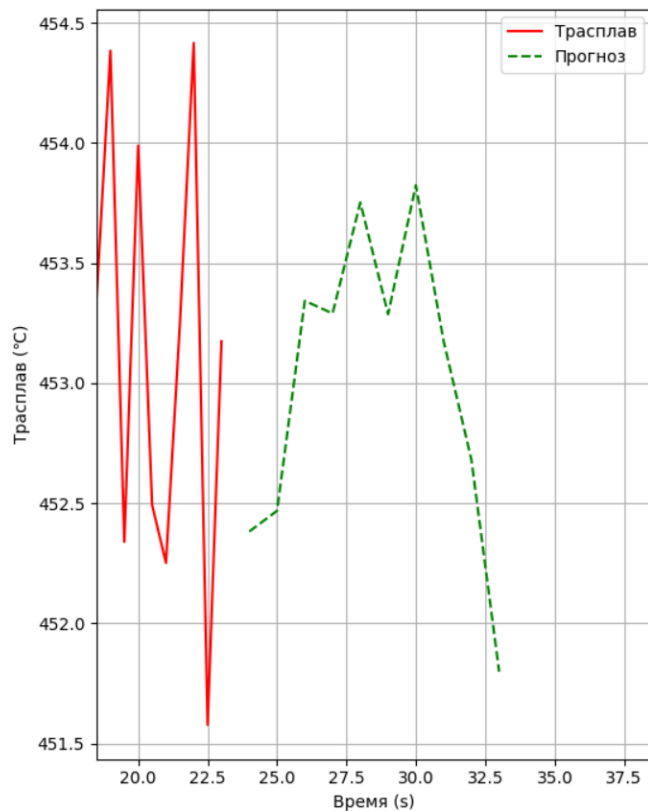


Рисунок 3.9 – График изменения температуры расплава в точке кристаллизации в реальном времени (составлено автором)

Надежность оценивалась по нескольким ключевым пунктам. Во-первых, система не позволяет запуститься, если оператор вводит значения, выходящие за допустимые пределы – на дисплее сразу же отображается соответствующее предупреждение. Во-вторых, при возникновении неисправности в одном из компонентов система не прекращает работу полностью, а уведомляет пользователя и продолжает работать в безопасном режиме. Кроме того, при значительных изменениях параметров процесса данные, отображаемые на дисплее, остаются точными и обновляются без задержек.

Разработанная система может быть модифицирована для управления иными технологическими процессами, в том числе литьем сплавов с различными физико-техническими характеристиками. Для этого необходима адаптация модели и настройка параметров в соответствии с особенностями конкретного материала.

При таком подходе каждый новый цикл делает систему точнее и устойчивее, и все это без постоянной ручной настройки параметров. Система выявляет закономерности, оценивает результаты прошлых партий и прогнозирует возможные отклонения, опираясь на собственный накопленный опыт. Дальше идет интеграция такой системы с корпоративными уровнями MES и ERP [84]. Это дает прямой обмен данными между цехами и отделами, уменьшая зависимость от бумажных документов и долгих промежуточных согласований. В итоге меньше времени уходит на поиск информации и решение проблем между подразделениями, а управление становится предметнее и быстрее.

Цифровая модель процесса, то есть цифровой двойник играет особую роль. Благодаря такой модели можно заранее оценить риски, понять вероятность сбоев и найти слабые места еще до запуска. Это позволяет принимать более обоснованные решения и делает результат надежнее.

3.4 Вывод по главе 3

Исследование показало, что процесс бесслитковой прокатки реально можно держать под контролем, если слаженно работают четыре связанных модуля системы. Каждый отвечает за свое: один мониторит состояние, другой оптимизирует параметры, третий генерирует управляющие команды, а четвертый –

это интерфейс для оператора. Такая схема помогает поддерживать стабильный и безопасный ход процесса, даже если меняются входные данные или происходят внешние возмущения.

В ходе работы разработали решение, которое совмещает и оборудование, и программную часть, а также алгоритм управления ключевыми параметрами процесса. Система отслеживает работу установки в реальном времени и сразу вмешивается, если какой-то параметр выходит за границы нормы. Программа умеет показывать критические параметры операторам, прогнозировать температуру на ближайшее время и быстро подстраиваться к новым режимам и разным типам сплавов.

Для оценки стабильности и надежности предложенной системы управления, а также для учета влияния возмущений и ошибок на входе, было проведено всестороннее тестирование. Результаты показали, что система сохраняет свои рабочие характеристики в различных условиях эксплуатации. Система обеспечивает необходимую точность управления, оперативно оповещая операторов о непредвиденных ситуациях. В результате снижается вероятность ошибок, и аварийные ситуации можно прогнозировать на более ранних стадиях.

На основании этого можно получить достаточно удовлетворительное представление о работе и процессе эволюции системы управления в технологии бесслитковой прокатки. Была разработана единая структурно-функциональная схема, эффективность которой была доказана в реальных производственных условиях. Одновременно были определены потенциальные направления модернизации, такие как интеграция с другими уровнями управления внутри предприятия и применение передовых методов анализа данных для повышения интеллектуальности системы.

ГЛАВА 4 КОНТРОЛЬ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА БЕССЛИТКОВОЙ ЗАГОТОВКИ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 8XXX

Как показано во 2-й и 3-й главах, ключевым фактором обеспечения стабильного качества бесслитковой заготовки является управление температурным режимом по тракту «печь – миксер – кристаллизатор – валки». Однако температурный фактор представляет собой лишь одну из составляющих сложного многопараметрического объекта управления. Не менее существенное влияние на формирование структуры и эксплуатационных свойств конечного материала оказывает химический состав расплава, определяющий фазовый состав, размеры и распределение интерметаллидных частиц, а также склонность материала к порообразованию и развитию дефектов кристаллизации [94]. В настоящей главе рассматриваются закономерности влияния химического состава на формирование структуры и свойств бесслитковой заготовки из сплавов системы Al-Fe-Si-Mn, а также формируются принципы построения контура оперативного управления химическим составом, интегрированного в общую систему автоматического управления процессом бесслитковой прокатки. Такой подход позволяет рассматривать температурный режим и химический состав как взаимосвязанные управляющие воздействия, совместная оптимизация которых обеспечивает требуемый уровень стабильности структуры и свойств готовой продукции [4].

4.1 Влияние химического состава на формирование структуры и свойств

В настоящее время в области исследований алюминиевых сплавов системы Al-Fe-Si-Mn до сих пор нет единого мнения и полного понимания влияния и процесса образования интерметаллических фаз в α -твердом растворе. Интерметаллические соединения, формирующиеся в многокомпонентных алюминиевых сплавах, являются одним из определяющих факторов, задающих характер микроструктуры и уровень механических и эксплуатационных свойств материала [8]. Вместе с тем полноценное описание механизмов их зарождения и эволюции по-прежнему представляет значительную научную сложность. Особенно неоднозначно трактуется влияние взаимного действия легирующих элементов –

алюминия (Al), железа (Fe), кремния (Si) и марганца (Mn) – на условия образования, устойчивость и морфологию интерметаллических фаз в системе Al–Fe–Si–Mn.

Для более реалистичной оценки вклада основных компонентов сплава в указанной системе был накоплен значительный массив экспериментальных и расчетных данных. В его основу легли результаты механических испытаний, детального микроструктурного анализа, а также термодинамического и кинетического моделирования процессов кристаллизации и последующей структурной эволюции [4, 101]. Совокупность полученных данных была целенаправленно систематизирована и подвергнута критическому анализу, что позволило сформировать обобщенное представление о роли отдельных легирующих элементов и их комплексного взаимодействия при формировании интерметаллических фаз, а также наметить пути управляемой оптимизации структуры и свойств сплавов данного класса. Это не только помогает выяснить факторы, влияющие на образование интерметаллических фаз, но и создает предпосылки для разработки алюминиевых сплавов с превосходными механическими свойствами при оптимизации производственных процессов.

В многокомпонентных сплавах интерметаллические соединения могут образовывать двойные, тройные и более сложные фазы. Примером такой сложной фазы является α -(AlFeSi), химический состав которой близок к $\text{Al}_{12}\text{Fe}_3\text{Si}$. Формирующийся твердый раствор, а также присутствие гетерогенных структурных элементов, различающихся по количеству, размеру, форме и распределению, оказывают существенное влияние на физические, химические и технологические свойства алюминиевых заготовок [105]. Влияние легирующих элементов на структуру сплава можно проанализировать с помощью диаграмм состояния, которые помогают определить, как протекает процесс затвердевания и какие фазы при этом образуются.

В системе Al–Fe–Si существует шесть поверхностей первичной кристаллизации: αAl – твердый раствор на основе алюминия, кремний (Si), фаза Al_3Fe и тройные фазы α -(AlFeSi), β -(AlFeSi) и Δ -(AlFeSi) [99]. Фаза Al_3Fe является ключевым элементом, определяющим механические свойства сплава, поскольку

она состоит из 59,17% алюминия и 40,83 % железа [80]. В некоторых исследованиях отмечается, что фаза Al_3Fe может распадаться при охлаждении, образуя соединения Al_7Fe_7 и Al_5Fe_2 и растворяет в незначительном количестве кремний. В исследованиях после первичной кристаллизации фазы α -(AlFeSi) она была разделена на три части, которые соответствуют образованию фаз с различным составом. В данной системе наблюдаются инвариантные превращения [4]:

перитектическое – $Ж + Al_3Fe \leftrightarrow \alpha_{Al} + \alpha - (AlFeSi) - 629^\circ C$;

перитектическое - $Ж + \alpha - (AlFeSi) \leftrightarrow \alpha_{Al} + \beta(AlFeSi) - 611^\circ C$;

эвтектическое - $Ж \leftrightarrow \alpha_{Al} + \beta - (AlFeSi) + Si - 575^\circ C$).

Фаза кремния (Si) обычно кристаллизуется в форме пластин или ромбоидальных кристаллов [40, 99]. Кремний в сплавах алюминия ведет себя по-разному: часть его растворяется в алюминиевой матрице, часть вступает в реакцию с другими элементами, образуя фазы, такие как α -(Mn-Si) и α -(Fe-Si), а оставшийся кремний может существовать в свободной форме. Фазы α -(Mn-Si) и α -(Fe-Si) способны формировать твердые растворы с железом, причем растворение Fe в α -(Mn-Si) не сопровождается заметным изменением формы кристаллов. Важной особенностью является возможность перехода фазы α -(Fe-Si) в β -(Fe-Si) по перитектическому механизму при взаимодействии с жидкой фазой. Такой структурный переход следует рассматривать как один из ключевых факторов, поскольку изменение кристаллографического строения влияет на комплекс механических свойств сплава и его термическую устойчивость. Формирование β -фазы существенно отражается на ходе кристаллизации, микроструктуре и, в конечном счете, на эксплуатационных характеристиках материала.

При совмещенном литье и прокатке сплавов системы Al-Fe-Si с повышенным содержанием железа и при относительно низкой температуре разлива возможно протекание эвтектического превращения с образованием тройной эвтектики α -Al + β -(Fe,Si) + Si [88, 106]. Формирование грубой эвтектической структуры и протяженных игольчатых интерметаллидов β -(Fe,Si) приводит к охрупчиванию сплава и ухудшению его технологической пластичности при деформации [80]. Введение небольших добавок марганца способствует

модифицированию такой структуры: часть β -фазы трансформируется в более стабильную и компактную α -(Fe,Mn,Si)-фазу, уменьшаются размеры и протяженность интерметаллидных частиц, выравнивается их распределение по объему металла, что в конечном счете повышает структурную и эксплуатационную стабильность бесслитковой заготовки [12, 82, 108].

Согласно данным, процесс усвоения компонентов сплава, особенно Mn и Fe, в значительной степени зависит от термодинамических условий и характера конвекции расплава в зоне «печь – миксер – валки-кристаллизаторы» [106]. При естественной конвекции решающим фактором выступает первоначально введенное количество легирующего элемента, тогда как при принудительном перемешивании скорость растворения Mn и Fe существенно возрастает и выравнивается. В этих условиях время перемешивания становится важным регулируемым параметром: его увеличение обеспечивает более полное растворение легирующих добавок, выравнивание их распределения по объему металла и, как следствие, надежное подавление образования нежелательных метастабильных фаз.

Марганец в сплавах системы Al–Fe–Si–Mn играет ключевую роль в ингибировании образования игольчатых β -(Fe,Si)-фаз, структурно несовместимых с матрицей α -Al и выступающих концентраторами напряжений [80, 104]. При достаточном содержании Mn равновесие смещается в сторону формирования более компактной α -(Fe,Mn,Si)-фазы с округлой морфологией и равномерным распределением в объеме металла. Одновременно в структуре фиксируется образование интерметаллидных частиц типа Al_6Mn , β -(Mn,Si) и α -(Mn,Si), которые при дисперсном и равномерном распределении повышают структурную стабильность материала, его жаростойкость, коррозионную стойкость и износостойкость.

Поддержание химического состава на оптимальном уровне в условиях совмещенного литья и прокатки является не просто технологической задачей, а фактически главным условием для выпуска заготовок, обладающих требуемыми эксплуатационными свойствами [2, 11, 12]. В алюминиевых сплавах серии 8xxx любое, даже на первый взгляд незначительное, отклонение в содержании

легирующих компонентов – железа, кремния или марганца – может привести к серьезным структурным изменениям [104]. Например, небольшое превышение доли железа способствует росту грубых интерметаллидных включений, которые становятся источниками концентрации внутренних напряжений и тем самым ослабляют заготовку. Аналогично, дисбаланс кремния вызывает образование нежелательных фаз, обладающих пониженной пластичностью и ухудшающих прокатываемость материала. Влияние марганца также двойко: при его недостатке не удастся стабилизировать структуру, тогда как избыток приводит к образованию труднорастворимых соединений, снижающих однородность сплава.

Особое значение имеет температурный режим, так как фазовые превращения происходят в узких диапазонах и напрямую зависят от соотношения легирующих элементов [13, 17]. Смещение температуры начала или завершения кристаллизации всего на несколько градусов изменяет характер образования интерметаллидных фаз и в конечном счете определяет размеры зерна, а также равномерность распределения частиц в объеме материала. Это, в свою очередь, сказывается на прочностных характеристиках, пластичности и устойчивости к коррозии. Таким образом, контроль химического состава нельзя рассматривать изолированно – он тесно связан с управлением тепловыми и кинетическими параметрами всего технологического процесса [1, 54].

Практика показывает, что своевременная корректировка содержания легирующих элементов на ранних стадиях плавки и перед подачей металла в агрегат бесслитковой прокатки существенно повышает воспроизводимость структуры. При этом обеспечивается более равномерное распределение интерметаллидов, уменьшается вероятность образования метастабильных фаз и формируется мелкозернистая структура. Такой подход позволяет стабилизировать механические свойства заготовки, снизить объем брака и повысить экономическую эффективность производства [74].

При производстве бесслитковых заготовок из сплавов серии 8xxx необходимо контролировать не только основные легирующие элементы, но и микропримеси, присутствующие, в-десятых, и сотых долях процента. Щелочные и

щелочноземельные элементы (Na, K, Ca), а также примеси тяжелых металлов (Ni, Cr, Pb) способны заметно изменять кинетику кристаллизации, поверхностное натяжение расплава и склонность сплава к газовой пористости. В сочетании с повышенным содержанием железа такие примеси усиливают сегрегационные процессы в зоне «расплав – валок», приводя к локальным концентрациям интерметаллидов и формированию зон с пониженной пластичностью [70]. Поэтому в рамках контроля химического состава необходимо учитывать целевой «профиль примесей», а не ограничиваться лишь диапазонами по основным элементам системы Al–Fe–Si–Mn.

Дополнительным фактором, определяющим структуру и свойства заготовки, выступает содержание растворенного водорода в расплаве. В отличие от традиционных слитковых технологий, при совмещенном литье и прокатке время, отведенное на дегазацию, существенно ограничено, а скорость охлаждения существенно выше. При недостаточной глубине дегазации водород, растворенный в алюминиевой матрице, выделяется в процессе затвердевания в виде микропузырьков, формируя газовую пористость и снижая герметичность будущей фольговой продукции [27, 60, 85]. В свою очередь, чрезмерная интенсивность дегазации при неподходящем температурном режиме может вызвать интенсивное окисление и образование неметаллических включений [67]. Это требует согласованного управления процессами дегазации и модифицирования расплава с учетом конкретного химического состава сплава и параметров теплового режима.

Для сплавов системы Al–Fe–Si–Mn, предназначенных для получения фольги, оправдано введение более жестких внутренних допусков по содержанию легирующих элементов по сравнению с нормативной документацией. Практика показывает, что сужение интервалов по Fe и Mn относительно стандартных значений позволяет уменьшить разброс по объему интерметаллидных частиц, а также обеспечить воспроизводимость размеров зерна по ширине полосы.

Для количественной оценки влияния отклонений химического состава на формирование структуры и свойств бесслитковой заготовки целесообразно ввести обобщенные технологические показатели, связывающие содержание основных

элементов и примесей с фазовым составом и механическими характеристиками. Сводные данные представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Влияние отклонения содержания основных элементов на структуру и свойства бесслитковой заготовки (по данным автора)

| Элемент | Характер отклонения | Изменение фазового состава | Влияние на структуру заготовки | Последствия для эксплуатационных свойств |
|---------|-----------------------|---|--|--|
| Fe | Fe > верхнего допуска | Рост объема грубых интерметаллидов Al_3Fe , $\beta-(Fe-Si)$ | Увеличение размеров и протяженности игольчатых частиц, локальная концентрация напряжений | Снижение пластичности, повышение склонности к трещинообразованию |
| Fe | Fe < нижнего допуска | Недостаточное формирование упрочняющих интерметаллидных фаз | Излишне крупное зерно, неоднородность структуры по толщине | Снижение прочности, нестабильность технологической пластичности |
| Si | Si > верхнего допуска | Формирование избыточной эвтектики ($\alpha Al + Si + \beta-(Fe-Si)$) | Крупная вторичная эвтектика по границам зерен, локальное охрупчивание | Ухудшение прокатываемости, снижение стойкости к усталостному разрушению |
| Si | Si < нижнего допуска | Снижение объема эвтектической фазы, неполная реализация легирующего эффекта | Укрупнение дендритной ячейки, рост неоднородности распределения Fe и Mn | Снижение предела прочности и предела текучести, рост анизотропии |
| Mn | Mn < нижнего допуска | Недостаточное подавление $\beta-(Fe-Si)$ -фазы, смещение равновесия в сторону игольчатой морфологии | Развитие игольчатых интерметаллидов, увеличение длины и аспекта частиц | Снижение ударной вязкости, повышенная чувствительность к концентраторам |
| Mn | Mn > верхнего допуска | Образование избыточных фаз Al_6Mn и $\alpha-(Mn-Si)$ | Появление крупных первичных частиц, рост микронеоднородности | Локальное перераспределение деформации, снижение ресурса при циклических нагрузках |

Обобщение литературных данных и результатов термодинамического анализа позволяет выделить в качестве основных управляемых параметров содержания железа, кремния и марганца, а также концентрацию водорода и суммарную долю неметаллических включений в расплаве [3, 11, 12]. Для каждого

из перечисленных элементов могут быть заданы целевые интервалы концентраций, обеспечивающие формирование благоприятной дисперсной структуры без чрезмерного количества грубых интерметаллидных частиц и вторичных эвтектик. Нарушение этих интервалов приводит к увеличению пористости, развитию зон сегрегации и ухудшению механических и коррозионных характеристик полосы [22, 108].

Представленные в таблице 4.1 зависимости «отклонение состава – изменение структуры – изменение свойств» фактически задают базу знаний для построения подсистемы автоматического управления химическим составом: они определяют, какие именно элементы и в каких диапазонах должны стабильно поддерживаться в ходе совмещенного процесса литья и прокатки [18]. Тем самым формируются исходные требования к подсистеме управления: она должна обеспечивать поддержание содержания ключевых элементов с учетом влияния теплового режима и особенностей протекания кристаллизации в зазоре валков-кристаллизаторов.

4.2 Методы и алгоритмы оперативного контроля

Организация эффективного контроля химического состава в условиях совмещенного литья и прокатки является одной из наиболее сложных задач современного металлургического производства [17]. Традиционные методы анализа, применявшиеся на ранних этапах развития технологии, чаще всего основывались на отборе проб из ковша или миксера с последующим лабораторным исследованием. Однако в условиях высокоскоростного процесса, когда металл практически без остановки проходит стадии плавления, разливки и прокатки, такие методы оказываются малоэффективными. К тому моменту, как лаборатория завершает анализ, металл уже превращается в полуфабрикат, и возможность оперативного вмешательства в технологический процесс теряется. Это неизбежно приводит к отклонениям в структуре заготовки и повышенному количеству брака.

Одним из путей решения этой проблемы стало внедрение схемы параллельного отбора проб. В данном случае материал для анализа берется не только из литниковой системы, где можно оценить состав расплава непосредственно перед его поступлением в валки-кристаллизаторы, но и из кромки

литой полосы сразу после выхода ее из зазора валков [11, 104]. Такой подход позволяет получить информацию о химическом составе в динамике: на стадии жидкой фазы и в момент формирования твердой заготовки. В совокупности эти данные дают гораздо более полное представление о том, какие изменения происходят с металлом в реальном времени, и позволяют делать выводы о правильности выбранного температурного режима и скорости охлаждения.

Наряду с традиционным отбором проб все большее значение приобретают методы экспресс-анализа [110]. Они позволяют определять содержание основных легирующих элементов в течение нескольких минут, существенно сокращая интервал между получением информации и принятием корректирующих решений. Вместе с тем результаты такого анализа требуют интерпретации: содержание железа, кремния и марганца следует оценивать во взаимосвязи с температурным режимом и условиями кристаллизации.

Технологические свойства высоколегированных алюминиевых сплавов в значительной степени определяются температурными параметрами фазовых превращений, что обуславливает необходимость углубленного исследования многокомпонентных диаграмм состояния. Анализ показал, что между термодинамическими параметрами системы и ее фазовым состоянием есть устойчивая связь. Это важно, при необходимости прогнозирования, как сплавы поведут себя при разных режимах термической или технологической обработки. Чтобы результаты были точнее, а количество реальных экспериментов уменьшилось, целесообразно применять математическое и компьютерное моделирование – так получится быстрее и эффективнее оптимизировать процесс.

В термодинамическом анализе многокомпонентных систем использовалась специализированная программа Thermo-Calc. Она рассчитывает фазовые равновесия и помогает отслеживать, как меняется структура в широком диапазоне температур и концентраций [108]. Thermo-Calc делает весь метод более надежным и воспроизводимым, а еще – расширяет его применение в научной и промышленной практике. Полученные результаты подтверждают, что Thermo-Calc является эффективным инструментом для анализа, интерпретации и

прогнозирования поведения алюминиевых сплавов при различных технологических воздействиях.

В микроструктуре бесслитковой листовой заготовки с повышенным содержанием железа наблюдаются сложные конгломераты фаз, идентификация которых стандартными методами анализа затруднена [88]. В процессе кристаллизации расплава в межвалковом зазоре образуются как термодинамически устойчивые равновесные фазы (FeAl_3 , Fe_3SiAl , $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{Al}_9$), так и метастабильные неравновесные соединения типа Al_6Fe и Al_mFe [70]. Это обуславливает локальную неоднородность микроструктуры материала. Для всех исследованных составов сплава температуры T_e , T_r и $T_{пп}$ на агрегате бесслитковой прокатки были определены экспериментально по измерениям, выполненным в ряде характерных точек.

Нерастворившиеся частицы, присутствующие в сплаве, играют важную роль в формировании его структуры. В процессе кристаллизации в валках часть элементов и соединений не растворяется в алюминиевой матрице и выделяется в виде отдельных фаз - интерметаллидов. Такие твердые включения могут представлять собой как сложные интерметаллические соединения, так и метастабильные фазы, содержащие несколько компонентов. Для алюминиевых сплавов серии 8xxx характерно образование соединений алюминия с марганцем, железом, магнием и медью. Эти интерметаллидные фазы существенно влияют на прочность, пластичность и коррозионную стойкость материала.

Физико-химические процессы в межвалковом зазоре представляют собой сложную совокупность явлений, включающую термодинамику и кинетику кристаллизации, фазовые превращения, а также механическое воздействие, оказываемое прокаткой на металл в момент его затвердевания.

Формирование мелкодисперсной и равномерной структуры полосы в указанных условиях во многом определяет уровень эксплуатационных характеристик материала: предел прочности (σ_b), предел текучести ($\sigma_{0,2}$), относительное удлинение (δ) и твердость. Мелкие и равномерно распределенные избыточные фазы эффективно препятствуют движению дислокаций, способствуют

более равномерному распределению внутренних напряжений и тем самым повышают прочность и устойчивость к деформации [74]. Напротив, крупные и неравномерно распределенные фазы становятся концентраторами напряжений, ухудшают механические свойства и снижают долговечность материала.

Для практической реализации описанных подходов необходима специализированная информационно-измерительная подсистема, интегрированная в общую структуру АСУ ТП агрегата бесслитковой прокатки, рассмотренную в главе 3. В ее состав входят блок планирования измерений, модуль первичной обработки сигналов, модуль диагностической фильтрации и модуль интерпретации химико-термодинамических данных. Блок планирования определяет моменты отбора проб и запуска экспресс-анализа в зависимости от текущего состояния агрегата - стадии плавки, выдержки в миксере, переходного режима или смены марки сплава. При этом учитываются как время перенастройки оборудования, так и длительность самого анализа, что позволяет сократить интервал между фактическим изменением состава и получением достоверной информации.

Модуль первичной обработки сигналов обеспечивает согласование результатов экспресс-анализа с температурными данными, измерениями расхода и скоростей литья в единой координатной системе [46]. На этом этапе устраняются единичные выбросы, вызванные нестабильностью источника возбуждения либо загрязнением поверхности образцов, а также компенсируются систематические погрешности, выявленные при метрологической аттестации оборудования. Далее данные поступают в модуль диагностической фильтрации, где выполняется сопоставление текущих значений концентраций элементов с их допустимыми диапазонами и «целевыми окнами», задаваемыми технологическим регламентом для конкретной марки сплава и толщины заготовки.

Особое место в структуре подсистемы занимает модуль интерпретации химико-термодинамических данных, использующий результаты расчетов, полученных в Thermo-Calc, и экспериментальную информацию о фазовых превращениях в системе Al-Fe-Si-Mn. На основании текущего состава и температурного состояния расплава модуль формирует прогноз фазового состава

при заданных скоростях охлаждения и деформации, а также оценивает риск образования нежелательных интерметаллидных фаз и газовой пористости [115]. Для оператора результаты представляются в виде набора индикаторов: «состав в норме», «требуется коррекция легирования», «необходима корректировка теплового режима», что упрощает принятие решений и повышает уровень автоматизации процесса контроля химического состава.

Интеграция указанных модулей в составе АСУ ТП агрегата бесслитковой прокатки реализуется в виде информационно-измерительной подсистемы контроля химического состава и газонасыщенности расплава, структура которой показана на рисунке 4.1.

С точки зрения теории автоматического управления формируемый информационно-измерительный комплекс позволяет рассматривать процесс совмещенного литья и прокатки как многомерный объект управления с вектором выходных координат $y(t)$, включающим концентрации основных легирующих элементов, содержание водорода, а также показатели структуры заготовки, регистрируемые по результатам оперативных и последующих измерений. Управляющие воздействия $u(t)$ задаются через расход и состав вводимых легирующих добавок, режимы обработки расплава в печи и миксере, параметры рафинирования и газоудаления, а также режимы охлаждения в зоне кристаллизации и последующей деформации. Таким образом, подсистема реализует принцип замкнутого адаптивного управления химическим составом.

Возмущающими факторами $d(t)$ являются изменения химического состава исходной шихты, колебания тепловых потоков, нестабильность производительности агрегата и другие внешние и внутренние воздействия. Наличие достоверной и синхронизированной во времени информации обо всех компонентах векторов $y(t)$, $u(t)$ и $d(t)$ является необходимым условием для построения эффективных алгоритмов оперативного контроля и корректировки химического состава [115]. В этом смысле информационно-измерительная подсистема выполняет роль измерительного звена замкнутой системы управления, обеспечивая переход от эпизодического лабораторного контроля к непрерывному

мониторингу состояния расплава и раннему выявлению тенденций отклонения состава от регламентированных диапазонов.

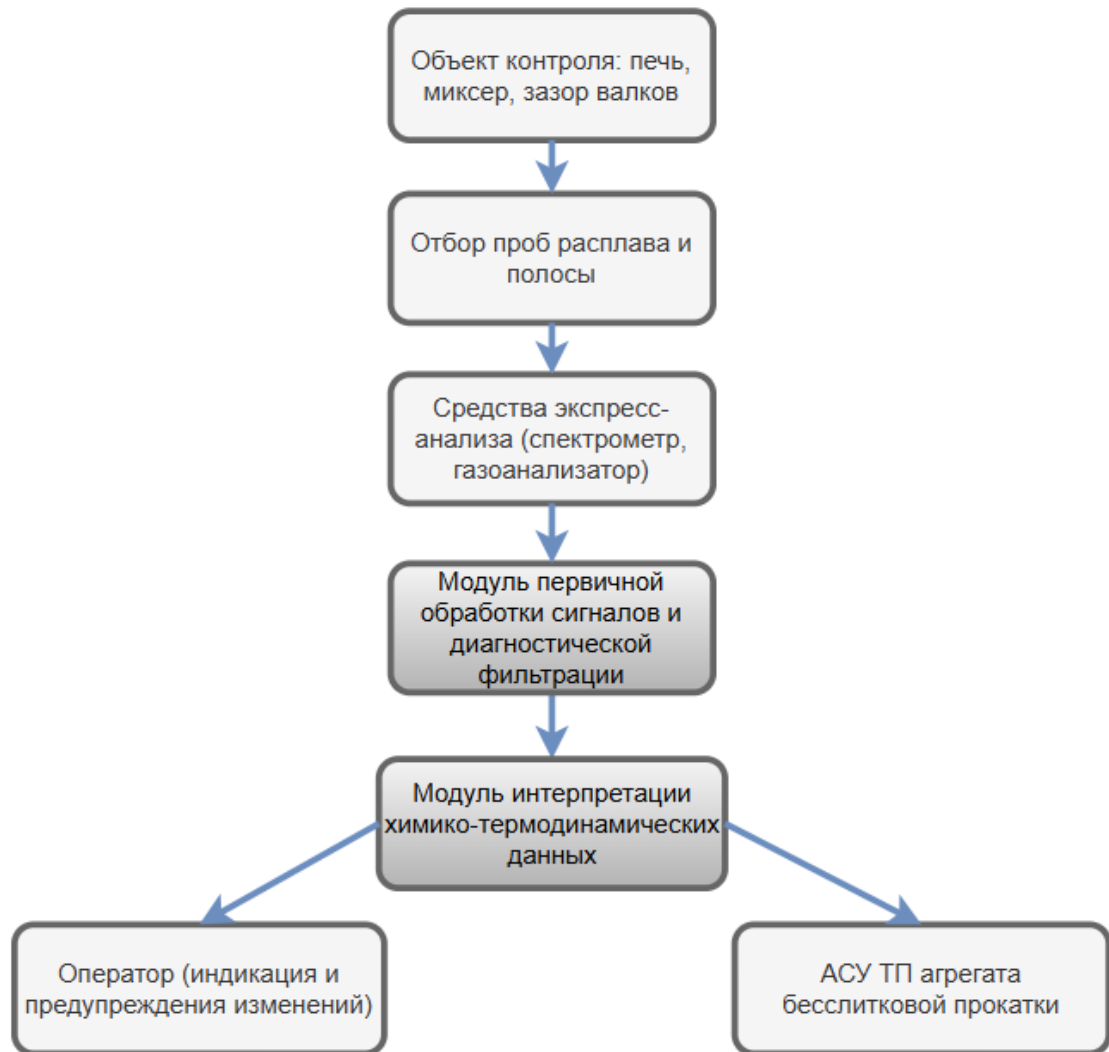


Рисунок 4.1 – Структура информационно-измерительной подсистемы контроля химического состава и газонасыщенности расплава (составлено автором)

Для получения отливки с заданным размером зерна и определенным микростроением необходимо строго контролировать химический состав, поскольку именно он во многом определяет формирование равномерной структуры [52]. Ключевым параметром, влияющим на размер зерна сплава, является скорость охлаждения в зазоре между валками-кристаллизаторами. При ее увеличении возрастает как скорость затвердевания сплава ($V_{затв}$), так и интенсивность формирования отдельных структурных элементов. Это приводит к укорочению и уменьшению разветвленности первичных дендритов, а также к истончению их осей. Дополнительно происходит измельчение эвтектики и других составляющих

структуры. При повышении интенсивности охлаждения, зерна становятся меньше, а дендритные ячейки сжимаются [89].

Если правильно управлять скоростью литья и температурой, можно получить листовые заготовки с нужными механическими свойствами на агрегатах БП. Более интенсивное охлаждение создает сильный температурный градиент, благодаря чему структура получается мелкозернистой, а дендритные ячейки становятся компактнее. В итоге сплав становится крепче и более однородным. Для алюминиевых сплавов направленное управление микроструктурой имеет принципиальное значение, поскольку позволяет согласовать прочностные и пластические характеристики, повысить сопротивление циклическим и ударным нагрузкам и уменьшить склонность к коррозионному разрушению.

Для ряда промышленных систем, включая сплавы серии 8xxx, в широком диапазоне скоростей кристаллизации устанавливается квазилинейная степенная зависимость характерного размера структурных элементов от скорости затвердевания (4.1) [58, 64]:

$$d = B v_{\text{затв}}^n \quad (4.1)$$

где B – коэффициент, характеризующий диффузионную подвижность компонентов в расплаве;

n – показатель степени определяется совокупностью термодинамических и кинетических условий кристаллизации;

d – типичный размер зерна или дендритной ячейки;

$v_{\text{затв}}$ – скорость затвердевания.

Затруднение роста эвтектического зерна при увеличении скорости охлаждения может быть обусловлено различием теплофизических характеристик фаз, формирующих структуру. В условиях, когда одна из фаз обладает более высокой теплопроводностью, кристаллизация другой фазы может быть ограничена, что приводит к измельчению зерна. Для получения более однородной и управляемой микроструктуры разработаны специальные технологические подходы, в частности совмещенный способ литья и прокатки. Данный метод обеспечивает направленное высокоскоростное затвердевание заготовки в валках-

кристаллизаторах, что способствует формированию ориентированной структуры литой полосы вдоль направлений теплоотвода. Следовательно, именно температурный режим в значительной степени определяет структурные особенности материала и состав формирующихся интерметаллидных фаз.

4.3 Разработка алгоритма корректировки химического состава и программного обеспечения

На основе полученных результатов сформирован алгоритм корректировки химического состава. Его сущность заключается в сопоставлении данных анализа и моделирования с эталонными значениями, установленными для конкретной марки сплава. При выявлении отклонений система автоматически вырабатывает рекомендации по введению легирующих добавок или изменению режима перемешивания в миксере. Принципиально важно, что такие действия выполняются в реальном времени, до прохождения металла через валки-кристаллизаторы. Это позволяет предупредить образование грубых интерметаллидных фаз, стабилизировать микроструктуру и получить заготовку с прогнозируемыми свойствами [4]. Поэтапный контроль химического состава и температурного режима на всех стадиях получения фольговой заготовки обеспечивает управление структурой и свойствами материала в условиях действующего производства [34]. Схема алгоритма представлена на рисунке 4.2.

Разработанный алгоритм корректировки химического состава имеет модульную структуру и включает четыре основных блока: идентификации состояния расплава, прогнозно-оценочный блок, блок синтеза корректирующих воздействий и блок верификации результата.

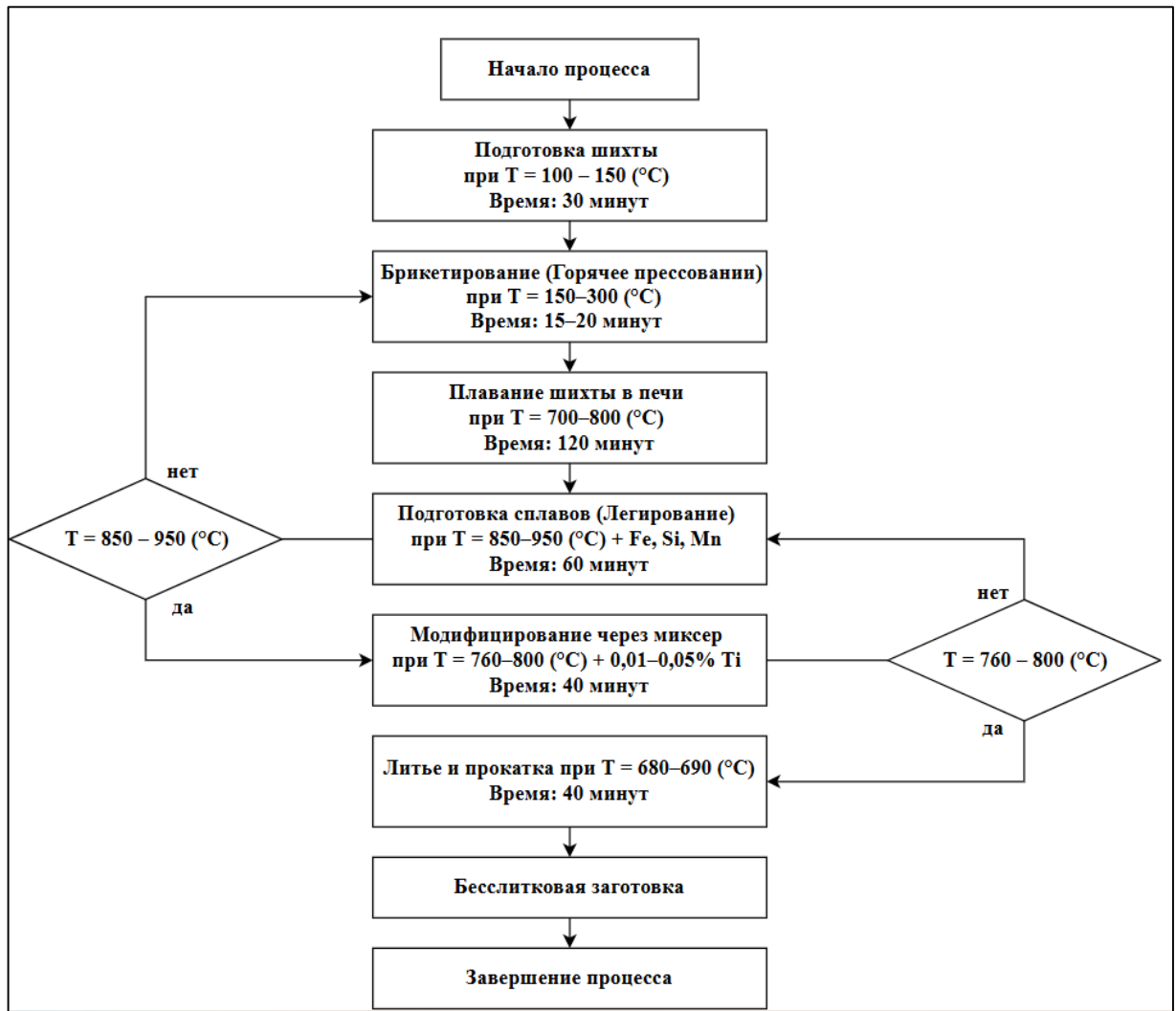


Рисунок 4.2 – Алгоритм интегрированного контроля температурного режима и химического состава (составлено автором)

Детализированная блок-схема алгоритма оперативной корректировки химического состава расплава, реализуемого в модуле оптимизации АСУ ТП, приведена на рисунке 4.3.

В прогнозно-оценочном блоке осуществляется расчет ожидаемого фазового состава и ключевых структурных параметров при сохранении текущего режима ведения процесса. Для этого применяется комбинированный подход: с одной стороны, используются результаты термодинамического моделирования многокомпонентной системы Al-Fe-Si-Mn, а с другой – эмпирические зависимости, полученные в ходе экспериментальных исследований. На основе сопоставления прогнозируемых характеристик заготовки с заданными требованиями по механическим свойствам и структуре формируется интегральный

показатель соответствия, служащий критерием необходимости вмешательства в химический состав.

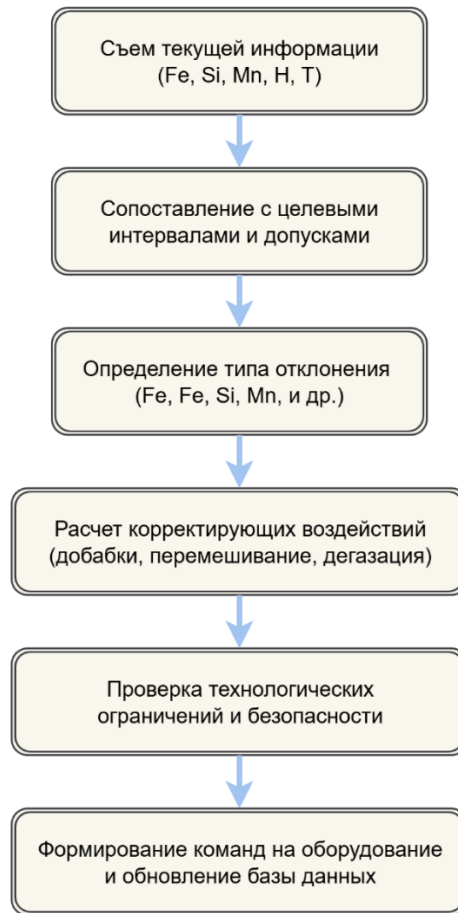


Рисунок 4.3 – Блок-схема алгоритма оперативной корректировки химического состава расплава (составлено автором)

Если интегральный показатель соответствия выходит за допустимые пределы, активируется блок синтеза корректирующих воздействий. В нем рассчитываются дозировки легирующих добавок и рафинирующих материалов, а также задаются изменения режима перемешивания в миксере (интенсивность и продолжительность перемешивания). При этом алгоритм учитывает ограничение по времени, связанное с движением металла по тракту «печь – миксер – проточная емкость – валки», и формирует решения таким образом, чтобы корректирующие действия были реализованы до момента достижения расплавом зоны межвалкового зазора.

Завершает цикл блок верификации, в рамках которого результаты внесенных корректировок оцениваются по данным повторного экспресс-анализа и

температурных измерений. При необходимости осуществляется дополнительная (тонкая) корректировка, либо процесс переводится в состояние «композиция стабилизирована». Фактически алгоритм реализует принцип замкнутого адаптивного управления химическим составом, где роль обратной связи играют как результаты химического анализа, так и показатели структуры и свойств, полученные на этапе последующей обработки полосы.

Типичная динамика изменения отклонения содержания легирующего элемента от заданного целевого значения при работе системы без контура коррекции и с реализованным контуром оперативной корректировки химического состава показана на рисунке 4.4.

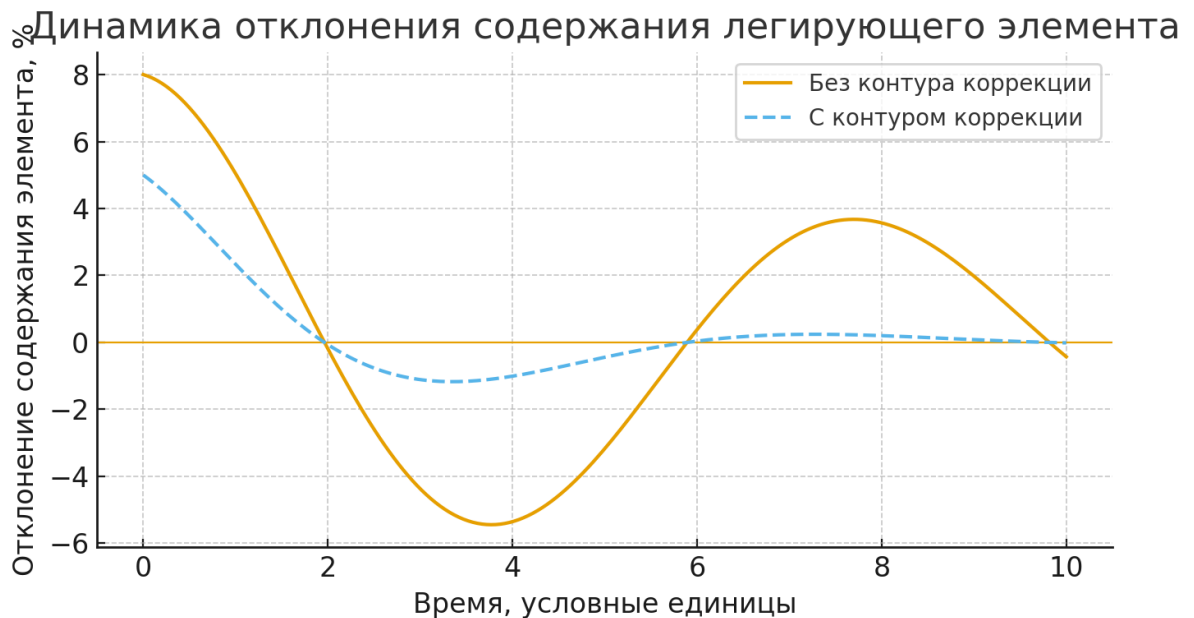
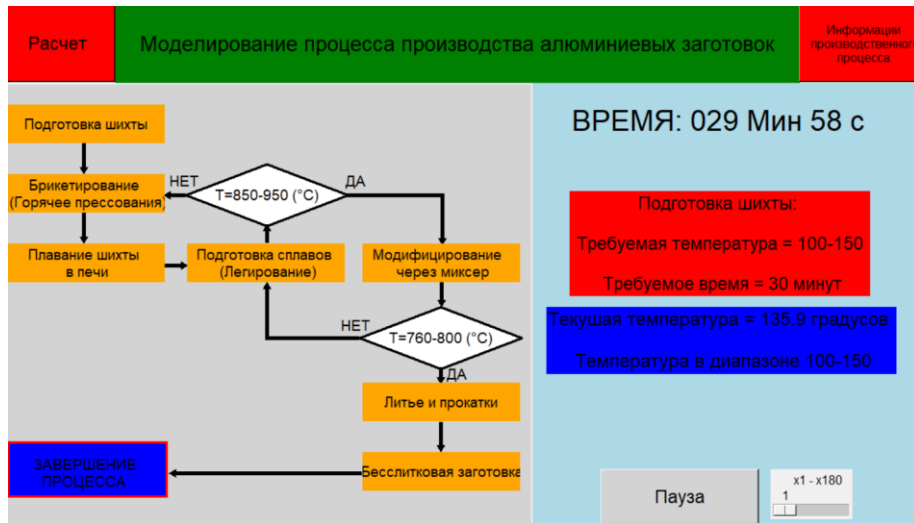


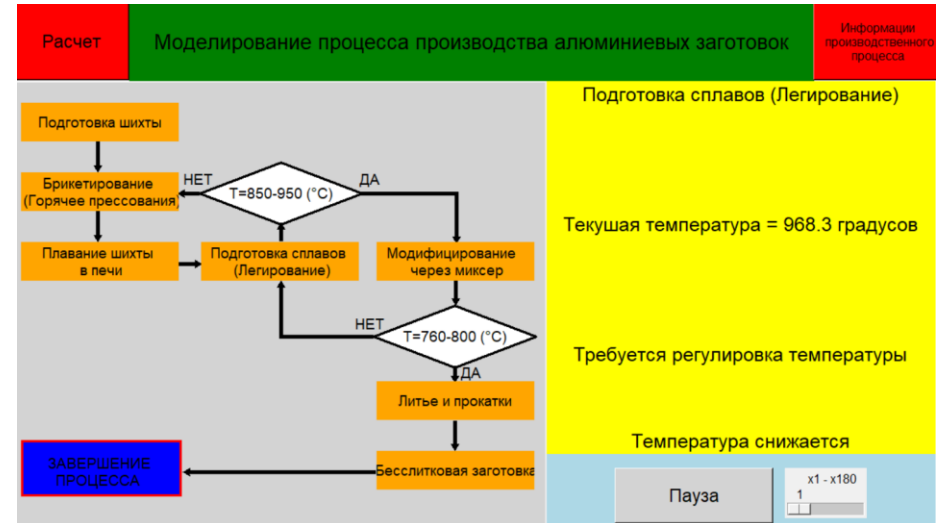
Рисунок 4.4 – Динамика отклонения содержания легирующего элемента при отсутствии и наличии контура коррекции (составлено автором)

На рисунке 4.5 приведен пример рабочего окна программного комплекса, реализующего функции моделирования и визуального контроля температурного режима на основных стадиях технологического процесса производства алюминиевой фольги.

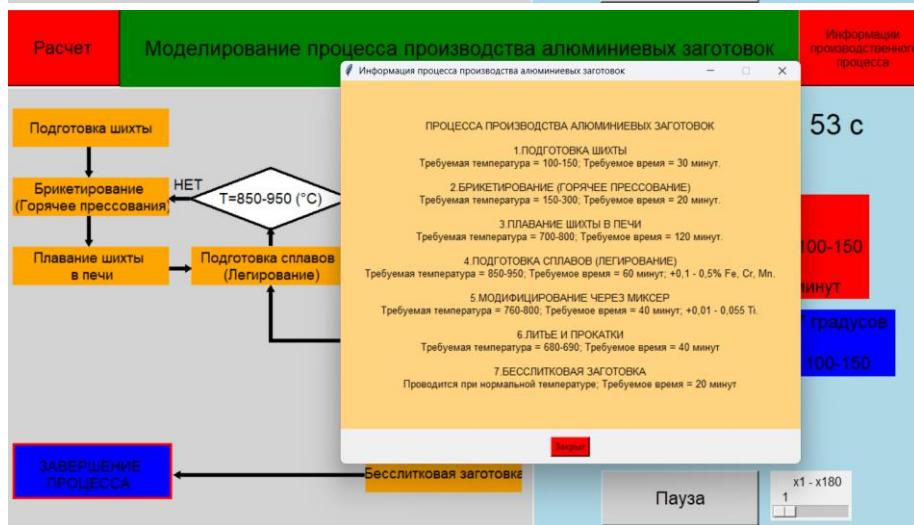
А



Б



В



Г

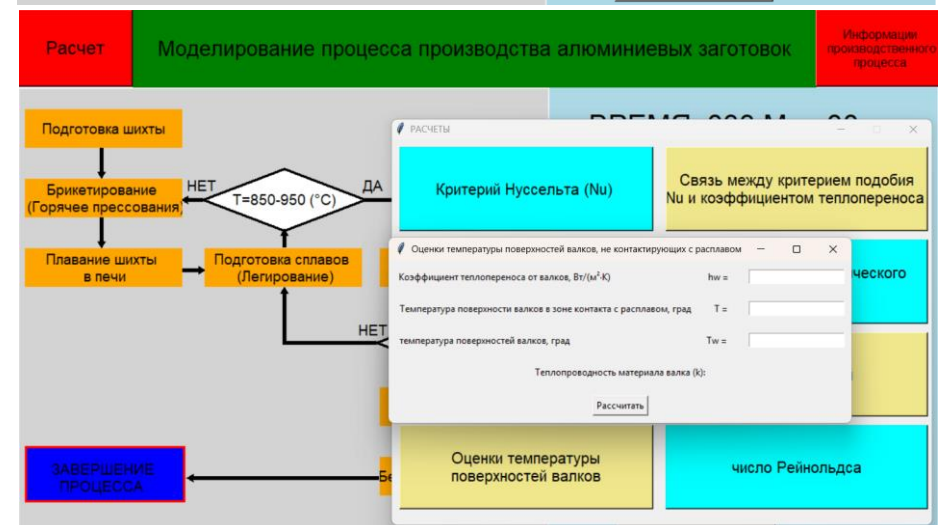


Рисунок 4.5 – Экран программы моделирования процесса производства алюминиевой фольги: А - визуализации и мониторинга температуры, времени на стадиях технологического процесса; Б - визуализации и мониторинга температуры, времени на стадии подготовки сплавов (легирование); В - информация о стадиях производства; Г- расчеты технологических параметров в процессе производства (составлено автором)

4.4 Экономическая эффективность проекта

Оценка экономической эффективности внедрения разработанной системы автоматизированного контроля температурного режима и химического состава при бесслитковой прокатке алюминиевых сплавов показывает, что данный подход способен обеспечить значимое повышение стабильности технологического процесса и снижение производственных затрат на предприятии уровня Вьет Нят, работающем в диапазоне 100–120 тыс. тонн алюминиевой полосы в год. Основные ожидаемые изменения технологических и эксплуатационных показателей сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Изменение технико-экономических показателей при внедрении системы автоматического контроля (по данным автора)

| Показатель | До внедрения | После внедрения | Прогнозируемое изменение |
|------------------------------------|--------------|-------------------|--------------------------|
| Стабильность температурного режима | Низкая | Повышенная | +25–35% |
| Удельное энергопотребление | Повышенное | Оптимизированное | -5–10% |
| Доля брака | Увеличенная | Стабилизированная | -15–25% |
| Частота аварийных остановок | Средняя | Сниженная | -20–30% |
| Трудоемкость ручных корректировок | Высокая | Умеренная | -10–15% |
| Вероятность ошибок оператора | Существенная | Пониженная | -20–25% |
| Производственная устойчивость | Колеблющаяся | Стабильная | +10–12% |

Сопоставление основных технико-экономических показателей до и после внедрения подсистемы автоматического контроля химического состава и температурного режима в обобщенном графическом виде представлено на рисунке 4.6. Полученные значения закономерны и отражают специфику технологического процесса. Так, повышение стабильности температурного режима на 25–35% связано с тем, что система прогнозного управления позволяет сглаживать температурные колебания, возникающие из-за инерционности печей и задержек в реакции операторов. Более равномерное развитие теплового поля в зоне «расплав – валок» формирует условия для устойчивой кристаллизации, благодаря чему

постепенно снижается вероятность образования неравномерных структур или локальных перегревов.

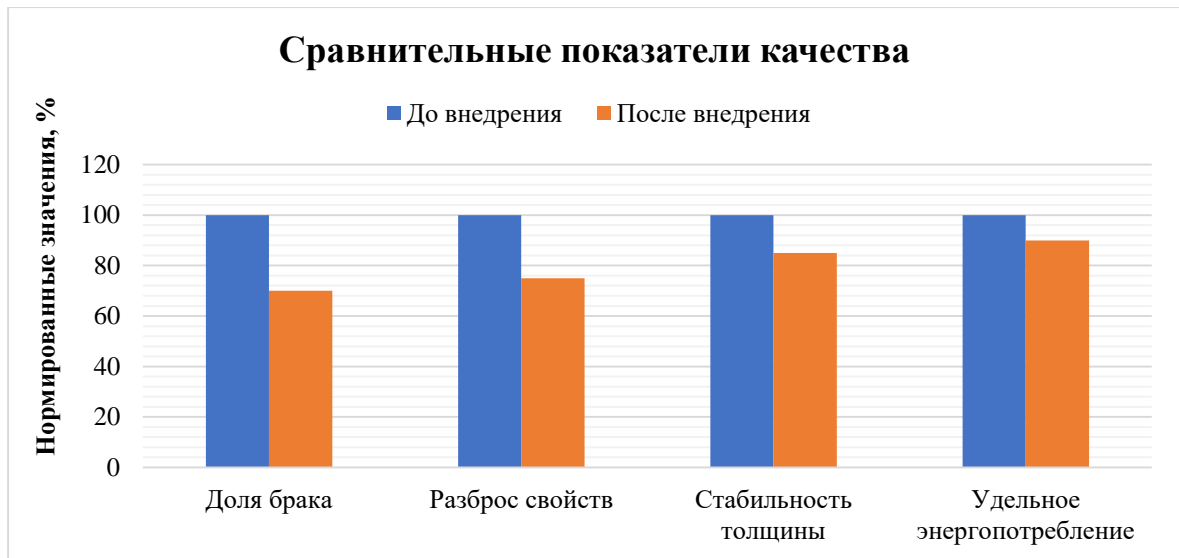


Рисунок 4.6 – Сравнительные показатели качества и экономической эффективности до и после внедрения разработанной системы
(составлено автором)

В свою очередь, снижение доли брака на 15–25% является следствием стабилизации температурного режима, но здесь причинно-следственная связь проявляется комплексно. Сначала уменьшаются тепловые флуктуации, затем снижается число участков с нарушенной кристаллизацией, и лишь после этого наблюдается уменьшение объема продукции, направляемой на передел. На предприятиях сопоставимого уровня часто фиксируются дефекты, порождаемые несвоевременной коррекцией теплового состояния; именно их удастся избежать при помощи внедряемой системы.

Снижение энергопотребления достигается прежде всего за счет устранения причин избыточного расхода энергии, в первую очередь перегрева металла и необходимости компенсировать резкие температурные провалы. Когда режим стабилизируется, можно сэкономить примерно 5–10%. Все дело в том, что нагрев становится предсказуемым, система охлаждения работает стабильно, и затраты энергии приближаются к оптимальному минимуму.

Остановки оборудования сокращаются на 20–30% – и это не случайно: система заранее выявляет опасные моменты, связанные с перегревом расплава,

резким охлаждением валков или смещением лунки расплава. Если параметры корректируют вовремя, можно избежать проблем, которые обычно приводили бы к вынужденным простоям. Для такого производства, как «Вьет Нят», это имеет особое значение. Каждый простой не только снижает выпуск, но и сопровождается значительными дополнительными затратами – приходится тратить больше энергии и металла, чтобы вернуть агрегат к стабильной работе.

Работа операторов становится проще примерно на 10–15%, и риск ошибок снижается на 20–25%. Это благодаря тому, что рутинные задачи – оценка температуры и выбор управляющих воздействий – берет на себя алгоритм предиктивного управления. Оператор осуществляет мониторинг состояния процесса за состоянием через визуализацию и вмешивается только когда нужно. Человеческий фактор заметно уменьшается, а процесс протекает более стабильно и предсказуемо.

Все это вместе дает положительный эффект: производственная устойчивость повышается примерно на 10–12%. Технологический процесс идет ровнее, меньше отклонений, которые могут повлиять на качество и объем продукции. Для предприятий, где средняя производительность за год – вопрос важный, это особенно актуально. Система создает реальные предпосылки для повышения качества продукции, более рационального использования ресурсов и сокращения производственных потерь.

Дополнительным эффектом является: вариативность химического состава по партиям и плавкам снижается. Обычно при стандартном подходе разброс легирующих элементов заставляет расширять допуски по механическим свойствам. Из-за этого номинальную производительность приходится ограничивать, чтобы не получить продукцию, которая не проходит по нормативам. Внедрение системы оперативного контроля и корректировки состава позволяет сузить фактическое распределение по содержанию Fe, Si и Mn, что дает возможность более полно использовать ресурс оборудования, повышать скорости прокатки и уменьшать объем продукции, переводимой в пониженные сорта. Таким образом, часть

экономического выигрыша выражается не только в прямом снижении затрат, но и в увеличении доли продукции высокого качества.

Существенным является и эффект от сокращения числа внеплановых теплометаллургических операций. В условиях нестабильного химического состава и температурного режима часть плавок вынужденно направляется на дополнительную выдержку, повторное модифицирование или глубокую переработку, что сопровождается значительными энергетическими и временными затратами. Автоматизированный алгоритм контроля и корректировки состава позволяет обнаруживать отклонения на ранних стадиях и устранять их в пределах текущего производственного цикла, не доводя ситуацию до необходимости дорогостоящих корректирующих мер. В совокупности это приводит к уменьшению удельных затрат на переработку единицы металлопродукции и сокращению косвенных потерь, связанных с нарушением графика поставок и простоем оборудования у последующих потребителей.

4.5 Вывод по главе 4

Установлено, что параметры химического состава и режимов охлаждения расплава могут быть представлены в виде информативных диагностических признаков и состояний объекта управления, что позволяет включать их в контуры автоматизированного управления процессом совмещенного литья и прокатки и повышать устойчивость функционирования АСУ ТП.

Получено количественное описание взаимосвязи между составом расплава, параметрами охлаждения и формированием структуры заготовки; таким образом, сформированы критерии качества и исходные зависимости для разработки алгоритмов автоматизированного контроля и адаптивной корректировки режимов, ориентированных на задачи теории автоматического управления, а не только на металлургический анализ.

Разработан алгоритм оперативного контроля и корректировки химического состава, интегрированный со специализированным программным обеспечением АСУ ТП, обеспечивающий в реальном времени формирование корректирующих воздействий по легированию и перемешиванию расплава, а также позволяющий

стабилизировать структуру и свойства заготовок при изменении внешних условий и производственных режимов.

Внедрение комплексного подхода к регулированию химического состава и температурного режима в процессе бесслитковой прокатки алюминиевых сплавов серии 8xxx способствует улучшению стабильности качества прокатных заготовок, снижению уровня брака и увеличению технико-экономической эффективности цифровых автоматизированных систем данного технологического процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научная задача – повышение стабильности и эффективности процесса беслитковой прокатки алюминиевых сплавов за счет разработки и внедрения цифровых методов контроля температурного режима и химического состава в системе автоматизированного управления.

По результатам проведенных исследований сформулированы основные выводы:

1. Проведенное аналитическое исследование существующих АСУ ТП, используемых при производстве прокатных заготовок из алюминиевых сплавов, позволило выявить их основные недостатки: отсутствие комплексного контроля температурных и химических параметров, слабую интеграцию с цифровыми моделями и низкую адаптивность параметров при динамических изменениях технологического режима.

2. Предложена и испытана цифровая модель нестационарного теплопереноса в системе «расплав – валки-кристаллизаторы», учитывающая фазовые переходы и скрытую теплоту кристаллизации. Модель выявила критические зоны температурных градиентов, влияющих на равномерность кристаллизации и качество поверхности листовой заготовки. Сравнение с промышленными данными подтвердило точность и адекватность цифровой системы, а также ее пригодность для прогнозирования работы АСУ.

3. Обосновано применение алгоритма и программного обеспечения прогнозирующего управления температурным режимом (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025689974), реализующих корректировку технологических параметров в пределах допустимых отклонений.

4. Разработан программный пакет (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025613075), который расширяет возможности АСУ ТП и позволяет следить за температурными значениями и химическими показателями.

5. Полученные результаты показывают, что внедрение разработанной

цифровой системы управления снижает энергозатраты на 5–10% и сокращает количество брака на 15–25%. Совокупное влияние этих факторов обеспечивает рост общей устойчивости технологического процесса на 10–12%, что подтверждает экономическую целесообразность и практическую значимость предложенного решения для современных предприятий по литью и прокатке алюминиевых сплавов. Эффективность достигнутых изменений обосновывает необходимость дальнейшего внедрения системы в промышленное производство.

Дальнейшее развитие исследования может быть связано с расширением функциональности цифровых методов контроля температурного режима и химического состава при бесслитковой прокатке алюминиевых сплавов. Перспективным направлением является создание цифрового двойника агрегата БП и применение методов интеллектуального анализа данных для повышения точности моделирования и адаптивности системы управления в условиях изменяющихся технологических параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев, Н.Г. Моделирование процессов и объектов в металлургии: учебное пособие / Н.Г. Агеев; под ред. С.С. Набойченко. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2016. – 108 с.
2. Арышенский, В.Ю. Разработка механизма формирования заданной анизотропии свойств в процессе прокатки алюминиевых лент для глубокой вытяжки с утонением: дис. ... д-ра техн. наук. Самара, 2002. – 312 с.
3. Баранов, М.В. Разработка и исследование новой установки непрерывного литья и деформации для производства одно- и многослойного листа из цветных металлов: Дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2000. – 146 с.
4. Бажин, В.Ю. Контроль химического состава бесслитковой заготовки из алюминиевого сплава 8xxx / В.Ю. Бажин, Д.В. Макушин, **Дык Хиеу Чан** // Литейное производство. – 2025. – № 8. – С. 20–28.
5. Бажин, В.Ю. Методика поэтапной верификации и промышленного внедрения двухшкальной модели предиктивного автоматизированного управления агрегата бесслитковой прокатки алюминиевых сплавов / В.Ю. Бажин, **Дык Хиеу Чан**, Л.Н. Никитина // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». – 2026. – № 4-2. – С. 37–41
6. Бажин, В.Ю. Технологии литья и прокатки алюминиевых сплавов: цифровизация и перспективы применения / В.Ю. Бажин, **Д.Х. Чан** // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 2. – С. 860–874.
7. Бажин, В.Ю. Структура и свойства листовой заготовки из алюминиевых сплавов системы Al–Fe–Si–Mn при совмещенном методе литья и прокатки: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.04. – Екатеринбург, 2005. – 153 с.
8. Бажин, В.Ю. Анализ воздействия наноразмерных интерметаллидных частиц при литье и прокатке алюминиевого сплава / В.Ю. Бажин, **Д.Х. Чан** // Нанозифика и наноматериалы : сборник научных трудов Международного семинара, посвященного 300-летию Российской академии наук и 145-летию со дня рождения профессора Горного института Веймарна Петра Петровича, Санкт-

Санкт-Петербург, 20–21 ноября 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2024. – С. 25–33.

9. Бажин, В.Ю. Вопросы технологии и управления производством алюминиевой фольги / В.Ю. Бажин, Д.Х. Чан // Теория и методика фундаментальных и прикладных научных исследований : сборник статей VI международной научной конференции, Санкт-Петербург, 15 ноября 2024 года. – СПб: ГНИИ «Нацразвитие», 2024. – С. 26–27.

10. Бажин, В.Ю. Контроль температурного режима процесса совмещенного литья и прокатки полос / В.Ю. Бажин, Д.Х. Чан // Фундаментальные и прикладные исследования в науке и образовании : сборник статей международной научной конференции, Санкт-Петербург, 07 июня 2024 года. – СПб: ГНИИ «Нацразвитие», 2024. – С. 31–32.

11. Белолипецкий, В.М. Модель скоростного конвективного нагрева металла для использования в алгоритмах АСУТП / В.М. Белолипецкий, Т.В. Пискажова, А.А. Портянкин // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2016. – Т. 17, № 3. – С. 554–561.

12. Герасимова, А.А. Автоматизация непрерывного широкополосного стана горячей прокатки / А.А. Герасимова, С.П. Романов // Computational nanotechnology. – 2020. – № 4. – С. 48–53. – DOI: 10.33693/2313-223X-2020-7-4-48-53.

13. Гречников, Ф.В. Аналитическое исследование температурного поля поверхностного слоя валков горячей прокатки алюминиевых сплавов / Ф.В. Гречников, В.В. Уваров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2003. – Т. 5, № 4. – С. 411–418.

14. Добаткин, В.И. Алюминиевые сплавы. Плавка и литье алюминиевых сплавов: Справочное руководство / В.И. Добаткин. – М. : Metallurgia, 1970. – 416 с.

15. Довженко, Н.Н. Прессование алюминиевых сплавов: моделирование и управление тепловыми процессами: монография / Н.Н. Довженко, С.В. Беляев, С.Б.

Сидельнико, И.Н. Довженко, Е.С. Лопатина, Р.И. Галиев. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2009. – 256 с.

16. Довженко, Н.Н. Исследование способов получения и свойств катанки из сплавов алюминия с переходными и редкоземельными металлами на установке совмещенного литья, прокатки и прессования / Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников, Л.П. Трифоненков, С.В. Солдатов, В.М. Беспалов, Е.С. Лопатина, А.С. Сидельников, А.Л. Трифоненков // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2012. – № 38. – С. 6–10.

17. Дриц, М.Е. Свойства элементов: справочник / М.Е. Дриц, П.Б. Будберг, Г.С. Бурханов, А.М. Дриц, В.М. Пановко. – М.: Metallurgia. – 1985. – 672 с.

18. Иевлев, В.И. Математические модели плоскостности толстолистного проката применительно к АСУ ТП / В.И. Иевлев // Математические машины и системы. – 2018. – № 1. – С. 67–77.

19. Кавалла, Р. Управление структурой и свойствами листовых заготовок из магниевых сплавов в условиях бесслитковой прокатки / Р. Кавалла, В.Ю. Бажин // Записки Горного института. – 2015. – Т. 214. – С. 33–38.

20. Кац, А.М. Теплофизические основы непрерывного литья слитков цветных металлов и сплавов / А.М. Кац, Е.Г. Шадек. – М.: Metallurgia, 1983. – 207 с.

21. Клепов, А.Г. Анализ изгиба алюминиевой полосы с высоким очагом деформации с помощью компьютерного моделирования / А.Г. Клепов, В.В. Яшин, Е.В. Арышенский, Ф.В. Гречников, И.А. Латушкин // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2022. – Т. 15, № 6. – С. 739–748.

22. Коковин, В.А. О возможности изменения технологии получения крупногабаритных плоских слитков из алюминиевого сплава АМг3 / В.А. Коковин, Т.В. Мальцева // Технология легких сплавов. – 2024. – № 1. – С. 29–35.

23. Копнов, В.И. Автоматизированное управление процессом прокатки алюминиевых сплавов: учеб. пособие / В.И. Копнов, М.Б. Оводенко, Ф. В. Гречников. Куйбышев: КуАИ. – 1989.

24. Латушкин, И.А. Математическая модель контактных напряжений при горячей прокатке полос из алюминиевых сплавов с использованием водной эмульсии / И.А. Латушкин // Технология легких сплавов. – 2024. – № 4. – С. 73–80.
25. Лехов, О.С. Исследование совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства биметаллических полос / О.С. Лехов, В.В. Турлаев, И.В. Лисин, М.Ю. Туев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова. – 2014. – Т. 4, № 48. – С. 69–73.
26. Логинов, Ю.Н. Моделирование толстолистовой прокатки алюминиевого сплава с вариантносью прохождения процессов разупрочнения / Ю.Н. Логинов, С.О. Непряхин, К.Т. Исякаев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова. – 2024. – Т. 22, № 3. – С. 178–187.
27. Макаров, Г.С. Рафинирование алюминиевых сплавов газами / Г.С. Макаров. — М.: Металлургия, 1983. — 119 с.
28. Михеев, В.А. Анализ структурных изменений при обработке рулонной заготовки из алюминиевого сплава, полученной бесслитковой прокаткой / В.А. Михеев, Л.В. Журавель // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2016. – № 3. – С. 56–64.
29. Напалков, В.И. Непрерывное литье алюминиевых сплавов / В.И. Напалков, Г.В. Черепок, С.В. Махов, Ю.М. Черновол. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 512 с.
30. Новиков, В.А. Математическое моделирование процесса литья плоских слитков для решения задач автоматизации / В.А. Новиков, Т.В. Пискажова, Т.В. Донцова, В.М. Белолипецкий // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2024. – Т. 25, № 1. – С. 144–156. – DOI: 10.31772/2712–8970-2024-25-1-144-156.
31. Перельман, И.И. К вопросу о практической реализуемости методов идентификации линейного динамического объекта по данным его функционирования в замкнутой системе регулирования / И.И. Перельман // Автоматика и телемеханика. – 1992. – № 1. – С. 72–86.

32. Песин, А.М. Моделирование температурных полей в очаге деформации при асимметричной прокатке алюминиевых сплавов / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, Р.К. Вафин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2015. – № 4. – С. 75–81.

33. Портянкин, А.В. Разработка программного комплекса для решения задач теплотехники / А.В. Портянкин, С.М. Тинькова, Т.В. Пискажова // Образовательные ресурсы и технологии. – 2016. – № 2. – С. 60–66.

34. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025613075 Российская Федерация. Программа моделирования процесса производства алюминиевой фольги. Заявка № 2025611515: заявл. 31.01.2025: опубли. 07.02.2025 / В.Ю. Бажин, **Д.Х. Чан**; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 10 МБ.

35. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025689974 Российская Федерация. Программа контроля основных параметров процесса непрерывного литья. Заявка № 2025688469: заявл. 21.10.2025: опубли. 01.11.2025 / В.Ю. Бажин, **Д.Х. Чан**; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 37 МБ.

36. Сергеева, А.А. О совмещенной технологии непрерывного литья алюминиевых сплавов с одновременной деформацией / А.А. Сергеева, Н.С. Ловизин, А.А. Соснин // Авиационные материалы и технологии. – 2018. – Т. 51, № 2. – С. 9–16.

37. Сидельников, А.С. Применение процесса непрерывного литья и прокатки-прессования для получения изделий из алюминиевых сплавов системы Al–PZM и исследование их свойств / А.С. Сидельников, С.Б. Сидельников, С.В. Беляев, Е.С. Лопатина, Д.С. Ворошилов // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2014. – Т. 41, № 2. – С. 5–10.

38. Сидельников, С.Б. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Н.Н. Загиров. – М.: МАКС Пресс, 2005. – 343/344 с.
39. Сидельников, С.Б. Разработка и исследование процесса бесслитковой прокатки-прессования прутков из алюминиевого сплава 6082 / Сидельников С.Б., Берсенев А.С., Загиров Н.Н., Лопатина Е.С., Ворошилов Д.С., Дурнопьянов А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова. – 2022. – Т. 20, № 4. – С. 47-57. – DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-47-57
40. Строганов, Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием / Г.Б. Строганов, В.А. Ротенберг, Г.Б. Гершман. – М.: Металлургия, 1977. – 272 с.
41. Фомин, Б.А. Металлургия вторичного алюминия / Б.А. Фомин, В.И. Москвитин, С.В. Махов. – М.: Экомет, 2004. – 240 с.
42. Черняк, С.Н. Бесслитковая прокатка алюминиевой ленты: Из опыта Ленинградского завода по обработке цветных металлов им. К.Е. Ворошилова / С.Н. Черняк, П.А. Коваленко, В. Н. Симонов. // – М.: Металлургия. – 1976. – 134 с.
43. Эльдарханов, А.С. Современные технологии разлива и кристаллизации сплавов / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов – М.: Машиностроение, 1998. – 360 с.
44. Якивбюк, П.Н. Цифровой двойник для управления совмещенной литейно-прокатной линией / П.Н. Якивбюк, Т.В. Пискажова, А.В. Сальников, П.М. Гофман // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2022. – Т. 23, № 2. – С. 347–356. – DOI: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-347-356.
45. Adeniji, T.A. Evaluation of the energy efficiency of an aluminum melting furnace for a Nigerian cast-coiled plant / T.A. Adeniji, M.A. Waheed // Fuel Communications. – 2021. – Vol. 9. – Art. 100027. – DOI: 10.1016/j.jfueco.2021.100027
46. Ahmed, N. Machine learning-based calibration LIBS analysis of aluminium-based alloys / N. Ahmed, J.A. Awan, K. Fatima et al. // The European Physical Journal Plus. – 2022. – Vol. 137. – Art. 671. – DOI: 10.1140/epjp/s13360-022-02892-4

47. Al-Helal, K. Melt Conditioning Twin Roll Casting with Thermo-Mechanical Treatment of Recycled AA6111 Alloy / Al-Helal K., Patel J., Fan Z. // JOM. – 2019. – Vol. 71(5). – P. 1714–1721. – DOI: 10.1007/s11837-018-3189-1
48. Alnajdi, A. Machine Learning-Based Model Predictive Control of Two-Time-Scale Systems / A. Alnajdi, F. Abdullah, A. Suryavanshi et al. // Mathematics. – 2023. – Vol. 11(18). – Art. 3827. – DOI: 10.3390/math11183827
49. Andonovski, G. Advancements in data-driven evolving fuzzy and neuro-fuzzy control: A comprehensive survey / G. Andonovski, D. Leite, R.-E. Precup et al. // Applied Soft Computing. – 2026. – Vol. 186. – Art. 114058. – DOI: 10.1016/j.asoc.2025.114058
50. Bazhin, V.Yu. A comprehensive approach to design of a temperature control system in production process of aluminum alloy rolled billets / V.Yu. Bazhin, **H.D. Tran** // International journal of engineering, Transactions A: Basics. – 2026. – Vol. 39, No. 10. – P. 2371–2382. DOI: 10.5829/ije.2026.39.10a.02
51. Bazhin, V.Yu. Influence of temperature regime of the combined process of casting and rolling of strips from high-alloy aluminium alloys / V.Yu. Bazhin, **Duc Hieu Tran**, D.V. Makushin, K.A. Krylov // Non-ferrous Metals. – 2024. – No. 2. – P. 45–51. DOI: 10.17580/nfm.2024.02.07
52. Bolzoni, L. Formation of equiaxed crystal structures in directionally solidified Al-Si alloys using Nb-based heterogeneous nuclei / L. Bolzoni, M. Xia, N.H. Babu // Scientific Reports. – 2016. – Vol. 6. – Art. 39554. – DOI: 10.1038/srep39554
53. Chattopadhyay, K. Assessment of Nusselt Number Correlations for Liquid Metals Applied in Alloying Processes in Turbulent Flows / K. Chattopadhyay, R.D. Morales, A. Nájera-Bastida et al. // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2021. – Vol. 52. – P. 1789–1804. – DOI: 10.1007/s11663-021-02146-1
54. Cho, H.-G. Prediction of Grain Structure and Texture in Twin-Roll Cast Aluminum Alloys Using Cellular Automaton–Finite Element Method / H.G. Cho, Y.D. Kim, M.S. Kim // Materials. – 2025. – Vol. 18(5). – Art. 1075. – DOI: 10.3390/ma18051075

55. Cho, J-H. Dynamic Shear Texture Evolution during the Symmetric and Differential Speed Rolling of Al-Si-Mg Alloys Fabricated by Twin Roll Casting / J-H. Cho, G-Y. Lee, S-H. Lee // *Materials*. – 2024. – Vol. 17(1). – Art. 179. – DOI: 10.3390/ma17010179
56. Dantzig, J. Microstructure and crystallographic texture in twin-roll casting of AA1050 aluminum alloy: Simulation and industrial validation / J. Dantzig, O. Meydanoğlu, A. Kazazi et al. // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2022. – Vol. 53. – P. 4168–4187. – DOI: 10.1007/s11661-022-06818-8
57. Du, Q. The integration of neural network and high throughput multi-scale simulation for establishing a digital twin for aluminium billet DC-casting / Q. Du, K. Ellingsen, M. M'Hamdi et al. // *Materials Transactions*. – 2023. – Vol. 64(2). – P. 360–365. . – DOI: 0.2320/matertrans.MT-LA2022038
58. Elahi, S.M. Grain growth competition during melt pool solidification – Comparing phase-field and cellular automaton models / S.M. Elahi, R. Tavakoli, I. Romero, D. Tournet // *Computational Materials Science*. – 2023. – Vol. 216. – Art. 111882. – DOI: 10.1016/j.commatsci.2022.111882
59. Fan, W. Study on Asymmetric Heat Transfer in the Top Side-Pouring Twin-Roll Casting Process / W. Fan, C. Zhou, T. Jiang et al. // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 2025. – Vol. 56. – P. 5558-5573. – DOI: 10.1007/s11663-025-03713-6
60. Fankhänel, B. Influencing the hydrogen porosity in aluminum casting by (Re)active filter materials / B. Fankhänel, J. Hubáľková, C.G. Aneziris et al. // *Advanced Engineering Materials*. – 2022. – Vol. 24(2). – Art. 2100579. – DOI: 10.1002/adem.202100579
61. Fu, J. Effect of low cast-rolling speeds on the microstructure and mechanical properties of twin-roll casting high Mg AA5059 alloy sheets / J. Fu, J. Xu, J. Zhang et al. // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2022. – Vol. 19. – P. 1059–1072. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.05.078
62. Ge, C. Strategic decarbonization of aluminium value chains: A life cycle assessment review for sustainable transition pathways / C Ge, S Liu, K Jiang et al. //

Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2026. – Vol. 226. – Art. 116478. – DOI: 10.1016/j.rser.2025.116478

63. George, T. Optimal tuning of PID controller in time delay system: a review on various optimization techniques / T. George, V. Ganesan // Chemical Product and Process Modeling. – 2022. – Vol. 17(1). – P. 1–28. – DOI: 10.1515/cppm-2020-2001

64. Gu, C. Predicting grain structure in high pressure die casting of aluminum alloys: A coupled cellular automaton and process model / C. Gu, Y. Lu, E. Cinkilic et al. // Computational Materials Science. – 2019. – Vol. 161. – P. 64–75. – DOI: 10.1016/j.commatsci.2019.01.029

65. Guo, C. Numerical simulation on flow and heat transfer in twin roll strip casting and rolling molten pool with side dams vibrating / C. Guo, Y. Xue, F. Yan et al. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 125. – P. 4497–4512. – DOI: 10.1007/s00170-023-10930-3

66. Guo, G. Numerical simulation and machine learning prediction of the direct chill casting process of large-scale aluminum ingots / G. Guo, T. Yao, W. Liu et al. // Materials. – 2024. – Vol. 17(6). – Art.1409. – DOI: 10.3390/ma17061409

67. Gyarmati, G. The Comparative Analysis of the Inclusion Removal Efficiency of Different Fluxes / Gyarmati G., Máté M., Tokár M., Fegyverneki G. // Archives of Foundry Engineering. – 2020. – Vol. 20. – № 2. – P. 53–58. – DOI: 10.24425/afe.2020.131302

68. Haga, T. High Speed Roll Caster for Aluminum Alloy / Haga T. // Metals. – 2021. – Vol. 11(3). – Art. 520. – DOI: 10.3390/met11030520

69. Haga, T. Effect of Casting Condition on Ripple Mark and Surface Crack of Roll-Cast Al-Mg Alloy / T. Haga, T. Okada, H. Watari et al. // Key Engineering Materials. – 2022. – Vol. 918. – P. 15–21. – DOI: 10.4028/p-jxhn6j

70. Haga, T. Strip Casting of Al-4.7%Mg with Impurity Fe Using a Single Roll Caster with a Scraper / T. Haga, K. Oida, K. Yamazaki et al. // Materials Science Forum. – 2022. – Vol. 1073. – P. 115–122. – DOI: 10.4028/p-1mm0bh

71. Harada, Y. Mechanical Properties of Cold-Rolled and Annealed Al–12%Mg Alloy Sheet with High Mg Solid Solubility Fabricated from Vertical-Type High-Speed

Twin-Roll Cast Strip / Y. Harada, N. Jiang, S. Kumai // *Materials Transactions*. – 2019. – Vol. 60(11). – P. 2435–2441. – DOI: 10.2320/matertrans.F-M2019850

72. Hu, Y. Virtual commissioning and process parameter optimization of rolling mill based on digital twin / Y. Hu, Y. Zhang, X. Ma et al. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2024. – Vol. 130. – P. 705–716. – DOI: 10.1007/s00170-023-12718-x

73. Huang, H.-G. Heat transfer analysis and experimental study of unequal diameter twin-roll casting process for fabricating Cu/Al clad strips / H.-G. Huang, J.-P. Zhang, C. Ji // *Journal of Central South University*. – 2022. – Vol. 29. – P. 1133–1146. – DOI: 10.1007/s11771-022-4990-0

74. Jin, J.W. Mechanical properties of three typical aluminum alloy strips prepared by twin-roll casting / Jin J.W., Zhang Z.J., Li R.H. et al. // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2024. – Vol. 28. – P. 500–511. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.11.256

75. Khodaei, N. A study on hot tearing in direct chill casting of Al-Mn-Mg alloys using a multi-scale approach / N. Khodaei, A.B. Phillion // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 2021. – Vol. 52. – P. 1424–1435. – DOI: 10.1007/s11663-021-02108-7

76. Kim, M.S. Role of Roll Separating Force in High-Speed Twin-Roll Casting of Aluminum Alloys / M.S. Kim, H.E. Kim, S.H. Kim et al. // *Metals*. – 2019. – Vol. 9(6). – Art. 645. – DOI: 10.3390/met9060645

77. Kim, M.S. Prediction of grain structure in direct-chill cast Al-Zn-Mg-Cu billets using cellular automaton–finite element method / M.S. Kim, S.H. Lee, J.G. Jung et al. // *Progress in Natural Science: Materials International*. – 2021. – Vol. 31(3). – P. 434–441. – DOI: 10.1016/j.pnsc.2021.05.003

78. Kim, M.S. Metallurgical method of determining heat transfer coefficient in simulations of twin-roll casting / M.S. Kim, J. Kim // *Metals*. – 2024. – Vol. 14(3). – Art. 358. – DOI: 10.3390/met14030358

79. Kim, M.S. Effect of In Situ Al Roll Coating on Strip Surface Quality in Traditional Twin-Roll Casting of Aluminum Alloys / M.S. Kim, H.G. Cho, Y.D. Kim // *Metals*. – 2025. – Vol. 15(4). – Art. 377. – DOI: 10.3390/met15040377

80. Kishor, M. Tackling Fe-rich intermetallics in Al-Si alloy: a critical review / M. Kishor, K. Chopra, K.P.R. Ayyagari // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2024. – Vol. 77. – P. 3031–3036. – DOI: 10.1007/s12666-023-03205-8
81. Korupu, V.L. A comparative study of various Smith predictor configurations for industrial delay processes / V.L. Korupu, M. Muthukumarasamy // Chemical Product and Process Modeling. – 2021. – Vol. 17(6). – P. 701–732. – DOI: 10.1515/cppm-2021-0026
82. Kumar, N. Analysis of microstructure and microhardness of aluminum alloy melt for grain refinement by twin-roll casting / N. Kumar, P.K. Mall, C.D. Prasad et al. // Journal of Materials Science: Materials in Engineering. – 2025. – Vol. 20. – Art. 21. – DOI: 10.1186/s40712-025-00211-0
83. Kumar, P. Industrial, large-scale model predictive control with structured neural networks / P. Kumar, J.B. Rawlings, S.J. Wright // Computers & Chemical Engineering. – 2021. – Vol. 150. – Art. 107291. – DOI: 10.1016/j.compchemeng.2021.107291
84. Ladegourdie, M. Performance Analysis of OPC UA for Industrial Interoperability towards Industry 4.0 / M. Ladegourdie, J. Kua // IoT. – 2022. – Vol. 3(4). – P. 507–525. – DOI: 10.3390/iot3040027
85. Lazaro-Nebreda, J. Degassing of Aluminum Alloy Melts by High Shear Melt Conditioning Technology: An Overview / J. Lazaro-Nebreda, D.G. Eskin, S. Lim et al. // Metals. – 2022. – Vol. 12. – № 10. – Art. 1772. – DOI: 10.3390/met12101772
86. Li, S. Review of recent applications and future perspectives on process monitoring approaches in industrial processes / S. Li, B. Zhou, J. Shang et al. // Journal of Manufacturing Systems. – 2025. – Vol. 82. – P. 509–530. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2025.07.002
87. Li, Y. Recent advances in hot tearing during casting of aluminium alloys / Y. Li, H. Li, L. Katgerman et al. // Progress in Materials Science – 2021. – Vol. 117. – Art. 100741. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100741
88. Li, L. CALPHAD-Assisted Analysis of Fe-Rich Intermetallics and Their Effect on the Mechanical Properties of Al-Fe-Si Sheets via Continuous Casting and Direct

Rolling / L. Li, X. Li, L. Shi, et al. // *Metals*. – 2025. – Vol. 15(6). – Art. 578. – DOI: 10.3390/met15060578

89. Liu, D.R. 2D cellular automaton–finite element simulation of grain structure and macrosegregation during solidification of Al-4wt% Cu Alloy / D.R. Liu, Y. Yang, Q.Y. Sun et al. // *International Journal of Cast Metals Research*. – 2016. – Vol. 29(6). – P. 393–402. – DOI: 10.1080/13640461.2016.1166553

90. Liu, L. General type industrial temperature system control based on fuzzy fractional-order PID controller / L. Liu, D. Xue, S. Zhang // *Complex & Intelligent Systems*. – 2023. – Vol. 9. – P. 2585–2597. – DOI: 10.1007/s40747-021-00431-9

91. Liu, M. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications / M. Liu, S. Fang, H. Dong et al. // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2020. – Vol. 58. – P. 346–361. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.06.017

92. Liu, X. Prediction on the solidification behavior of AA6005 aluminum alloys produced by inclined twin-roll casting: A finite element analysis / X. Liu, J.W. Song, X. Wang et al. // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2024. – Vol. 29. – P. 2405–2413. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.01.284

93. Liu, X.-Y. A faster than real-time heat transfer model for continuous steel casting / X.-Y. Liu, Z. Xie, J. Yang et al. // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2022. – Vol. 19. – P. 4220–4232. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.06.136

94. Liu, Z. The Typical Microstructure of Twin-Roll Cast 2139 Alloy and Its Impact on Mechanical Properties / Z. Liu, Y. Wang, Q. Chen et al // *Crystals*. – 2026. – Vol. 16(1). – Art. 13. – DOI: 10.3390/cryst16010013

95. Lu, J. New model for heat transfer of copper roller in twin-roll strip casting to assist experimental and industrial process / J. Lu, L. Liu, W. Pan et al. // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2025. – Vol. 213. – Art. 109826. – DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2025.109826

96. Ma, J. Incorporating an extended dendritic growth model into the CAFE model for rapidly solidified non-dilute alloys / J. Ma, B. Wang, S. Zhao et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2016. – Vol. 668. – P. 46–55. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.01.210

97. Ma, Z. Automated real-time detection of surface defects in manufacturing processes of aluminum alloy strip using a lightweight network architecture / Z. Ma, Y. Li, M. Huang et al. // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2023. – Vol. 34. – P. 2431–2447. – DOI: 10.1007/s10845-022-01930-3
98. Macchi, M. A conceptual framework for Digital Twins in production scheduling and control / M. Macchi, L. Ragazzini, E. Negri // *IFAC-PapersOnLine*. – 2023. – Vol. 56(2). – P. 5661–5666. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2023.10.491
99. Mikolajczak, P. Distribution and Morphology of α -Al, Si and Fe-Rich Phases in Al–Si–Fe Alloys under an Electromagnetic Field / P. Mikolajczak // *Materials*. – 2023. – Vol. 16(9). – Art. 3304. – DOI: 10.3390/ma16093304
100. Mustafa, F.E. A review on effective alarm management systems for industrial process control: Barriers and opportunities / F.E. Mustafa, I. Ahmed, A. Basit et al. // *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. – 2023. – Vol. 41. – Art. 100599. – DOI: 10.1016/j.ijcip.2023.100599
101. Nguyen, T.H. Color Metallography of Characteristic Microstructure in High-Speed Twin-Roll Cast Al–Mn–Si Alloy Strip Using Weck’s Reagent / T.H. Nguyen, R. Song, Y. Harada, S. Kumai // *Materials Transactions*. – 2020. – Vol. 61(12). – P. 2252–2262. – DOI: 10.2320/matertrans.L-M2020856
102. Normey-Rico, J. E. Control of dead-time process: From the Smith predictor to general multi-input multi-output dead-time compensators / J. E. Normey-Rico, T.L.M. Santos, R.C.C. Flesch et al. // *Frontiers in Control Engineering*. – 2022. – Vol. 3. – Art. 953768. – DOI: 10.3389/fcteg.2022.953768
103. NouraniNiaki, K. Phase Field Simulation of Al-Fe-Mn-Si Quaternary Eutectic Solidification / K. NouraniNiaki, M. Uddagiri, D. Isidorio et al. // *Metals*. – 2025. – Vol. 15(2). – Art. 135. – DOI: 10.3390/met15020135
104. Raabe, D. Making sustainable aluminum by recycling scrap: The science of “dirty” alloys / D. Raabe, D. Ponge, P.J. Uggowitzer et al. // *Progress in Materials Science*. – 2022. – Vol. 128. – Art. 100947. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2022.100947
105. Ren, J. The effect of heat treatments on the microstructural evolution of twin-roll-cast Al-Fe-Si alloys / J. Ren, X. Fang, D. Chen et al. // *Journal of Materials*

Engineering and Performance. – 2021. – Vol. 30. – P. 4401–4410. – DOI: 10.1007/s11665-021-05732-1

106. Ridgeway, C.D. Prediction of location specific mechanical properties of aluminum casting using a new CA-FEA approach / C.D. Ridgeway, C. Gu, K. Ripplinger et al. // *Materials & Design*. – 2020. – Vol. 194. – Art. 108929. – DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108929

107. Sama, A. Acquiring Automation and Control Data in The Manufacturing Industry: A Systematic Review / A. Sama, H.L.H.S. Warnars, H. Prabowo et al. // *Procedia Computer Science*. – 2023. – Vol. 227. – P. 214–222. – DOI: 10.1016/j.procs.2023.10.519

108. Shevchenko, R. The Influence of the Process Conditions on the Thermo-Mechanical Fatigue Damage of the Rolls in the Twin-Roll Casting Process of Aluminum Alloys / R. Shevchenko, N. Zani, A. Mazzù // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2024. – Vol. 8(4). – Art. 149. – DOI: 10.3390/jmmp8040149

109. Slater, C. Near Net Shape Casting: Is It Possible to Cast Too Thin? / C. Slater, C. Davis // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 2020. – Vol. 51. – P. 2532–2541. – DOI: 10.1007/s11663-020-01964-z

110. Spencer, J. Laser induced breakdown spectroscopy for composition monitoring of graded Al–Cu alloy surface / J. Spencer, B. Squires, B. McWilliams et al. // *Surface and Coatings Technology*. – 2024. – Vol. 494. – Art. 131375. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.131375

111. Tiryakioğlu, M. The effect of hydrogen on pore formation in aluminum alloy castings: myth versus reality / M. Tiryakioğlu // *Metals*. – 2020. – Vol. 10(3). – Art. 368. – DOI: 10.3390/met10030368

112. Torrico, B. C. Simplified filtered Smith predictor for high-order dead-time processes / B. C. Torrico, R.D.O. Pereira, A.K.R. Sombra et al. // *ISA Transactions*. – 2021. – Vol. 109. – P. 11–21. – DOI: 10.1016/j.isatra.2020.10.007

113. Ullmann, M. Twin-roll casting defects in light metals / Ullmann M., Stirl M., Prah U. // *Journal of Materials Science*. – 2024. – Vol. 59. – P. 19003–19022. – DOI: 10.1007/s10853-024-10211-8

114. Wang, B. Simulation of solidification microstructure in twin-roll casting strip / B. Wang, J.Y. Zhang, X.M. Li et al. // *Computational Materials Science*. – 2010. – Vol. 49. – P. S135–S139. – DOI: 10.1016/j.commatsci.2010.01.051
115. Wang, Q. Application of Integrated Computational Materials Engineering (ICME) in Aluminum Casting Development / Q. Wang, A. Wang, J. Coryell et al. // *International Journal of Metalcasting*. – 2025. – Vol. 20. – P. 59–74. – DOI: 10.1007/s40962-025-01632-5
116. Wu, Y. Research on Online Monitoring Technology and Filtration Process of Inclusions in Aluminum Melt / Y. Wu, H. Yan, J. Wang et al. // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24(9). – Art. 2757. – DOI: 10.3390/s24092757
117. Yamazaki, K. Reduction of Surface Crack by Modified Molten Metal Pouring Method on Al–Mg Alloy Strips Produced by Twin-Roll Casting / K. Yamazaki, T. Haga // *Materials Transactions*. – 2024. – Vol. 65(1). – P. 76–84. – DOI: 10.2320/matertrans.F-M2023812
118. Yamazaki, K. High-Speed and Low-Load Twin-Roll Casting of Al–5%Mg Strip / K. Yamazaki, T. Haga // *Metals*. – 2023. – Vol. 13(1). – Art. 72. – DOI: 10.3390/met13010072
119. Zhao, Y. Effects of Heat Treatment on a Novel Continuous Casting Direct Rolling Process for 6056 Aluminum Alloy / Y. Zhao, F.Y. Hung, B-J. Chen // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Vol. 11. – P. 535–547. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.01.037
120. Zhang, T. Review of the modeling approaches of phase change processes / T. Zhang, D. Huo, C. Wang et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2023. – Vol. 187. – Art. 113724. – DOI: 10.1016/j.rser.2023.113724
121. Zhu, C. Twin-roll strip casting of advanced metallic materials / C. Zhu, J. Zeng, W. Wang // *Science China Technological Sciences*. – 2022. – Vol. 65. – P. 493–518. – DOI: 10.1007/s11431-020-1800-8

ПРИЛОЖЕНИЕ А

**Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2025613075**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025613075

**Программа моделирования процесса производства
алюминиевой фольги**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II» (RU)*

Авторы: *Бажин Владимир Юрьевич (RU), Чан Дык Хиеу
(RU)*

Заявка № **2025611515**

Дата поступления **31 января 2025 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **07 февраля 2025 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ю.С. Зубов'.

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025689974

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025689974

**Программа контроля основных параметров процесса
непрерывного литья**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II» (RU)*

Авторы: *Бажин Владимир Юрьевич (RU), Чан Дык Хиеу
(RU)*

Заявка № **2025688469**

Дата поступления **21 октября 2025 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **01 ноября 2025 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ю.С. Зубов'.

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ В**Акт о внедрении результатов диссертации**

Утверждаю

Руководитель инженерно-
технологического центра ОК «РУСАЛ»
А.В. Панов

Дата « 25 » 02 2026 г.

АКТ**о внедрении результатов кандидатской диссертации****Чан Дык Хиеу**

Соискателя ученой степени кандидата технических наук по научной специальности
2.3.3. «Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами»

Комиссия в составе:

Председатель: начальник технологического отдела инженерно-технологического
департамента ОАО «РУСАЛ ВАМИ», к.т.н. Сусс А.Г.

Члены комиссии: начальник отдела, к.т.н. Сидаренко А.Н.; заведующий
лабораторией, к.т.н. Перестронина О.В. составили настоящий акт о том, что
результаты диссертации на тему «Цифровые автоматизированные системы для
литья и прокатки алюминиевых сплавов», представленной на соискание ученой
степени кандидата технических наук, использованы в производственной
деятельности ОК «РУСАЛ» на линии бесслитковой прокатки алюминиевых
сплавов при выполнении работ по совершенствованию АСУ ТП совмещённого
процесса литья и прокатки в виде:

– математической модели нестационарного теплопереноса в системе
«расплав – валки-кристаллизаторы» с учётом скрытой теплоты кристаллизации и
изменения теплофизических свойств сплава;

- алгоритма прогнозирующего управления температурным режимом в зоне кристаллизации и деформации полосы, учитывающего транспортные запаздывания;
- программного модуля мониторинга и регистрации дополнительных точек контроля температуры с визуализацией и архивированием параметров;
- рекомендаций по корректировке управляющих воздействий (скорость вращения валков, расход охлаждающей воды, подача расплава/смазки) для обеспечения стабильного формирования заготовки.

Выписка из протокола заседания Научно-технического совета ОК «РУСАЛ» №1/28 от 25 февраля 2026 г.

Использование указанных результатов позволяет:

- обеспечить стабилизацию температуры в зоне «расплав – валки-кристаллизаторы» с отклонением порядка 3–5 % за счёт прогнозирующего формирования управляющих воздействий;
- повысить качество листовой заготовки (снижение вероятности дефектов, связанных с нарушением теплового режима: пористость, разнотолщинность, ухудшение поверхности);
- повысить стабильность химического состава и обеспечить формирование более равномерной мелкозернистой структуры заготовки; прирост механических свойств листовой заготовки оценивается на уровне 10–12 % при согласовании состава и температурного режима;
- сократить влияние человеческого фактора за счёт автоматизированного мониторинга, предупреждения отклонений и сохранения технологических данных.

Председатель комиссии

начальник технологического отдела
инженерно-технологического
департамента, к.т.н.



Сусс А.Г.

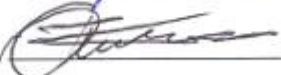
Члены комиссии:

Начальник отдела, к.т.н.



Сидаренко А.Н.

Заведующий лабораторией, к.т.н.



Перестронина О.В.