

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*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Бажин Владимир Юрьевич

Официальные оппоненты:

Першин Иван Митрофанович

доктор технических наук, профессор, Пятигорский институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет», кафедра систем управления и информационных технологий, профессор;

Ремизова Ольга Александровна

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», кафедра автоматизации процессов химической промышленности, доцент.

Ведущая организация - федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится **15 сентября 2026 г. в 13:30** на заседании диссертационного совета ГУ.12 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 15 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ВАСИЛЬЕВА
Наталья Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Вопросы 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: Нага Т., Suzuki S., Yun M., 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 теплопере-

носа 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 стабили-

зацию 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.) 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: Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные исследования в науке и образовании» (07 июня 2024 года, г. Санкт-Петербург); Международный семинар «Нанофизика 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); VI международная научная конференция «Теория и методика фундаментальных и прикладных научных исследований» (15 ноября 2024 года, г. Санкт-Петербург); 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, 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 (далее - Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, задачи, представлена научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимость исследования.

В первой главе представлен аналитический обзор технологии получения прокатных заготовок из алюминиевых сплавов, включающий основные стадии подготовки сырья, плавки, литья и прокатки. Рассмотрены состояние современных АСУ ТП, отмечены их основные ограничения и трудности синхронизации оборудования при совмещении процессов. Рассмотрены ключевые тенденции развития систем управления и подходы к созданию прогнозных моделей на основе цифрового проектирования.

Во второй главе изучены современные подходы к управлению температурными режимами при бесслитковой прокатке алюминиевых сплавов. Проанализированы тепловые процессы в зоне контакта расплава и валков и построена модель нестационарного теплопереноса с учетом скрытой теплоты кристаллизации. На основе численного моделирования и данных термопар определены условия, обеспечивающие стабильное формирование структуры и повышение качества прокатных заготовок.

В третьей главе разработана структура цифровой системы автоматического контроля и управления процессом бесслитковой прокатки алюминиевых сплавов на базе созданной новой цифровой платформы. Представлены алгоритмы управления температурным

режимом, расходом расплава и скоростью вращения валков в численных реперных точках.

В четвертой главе рассмотрены вопросы контроля и корректировки химического состава алюминиевых сплавов серии 8xxx в процессе бесслитковой прокатки. Изучено влияние основных легирующих элементов системы Al–Fe–Si–Mn на формирование микроструктуры и механических свойств заготовки с учетом температурного режима процесса БП. Разработаны методы и алгоритмы оперативного контроля химического состава с использованием схемы параллельного отбора проб и экспресс-анализа, позволяющих получать цифровые данные в реальном времени и корректировать технологические параметры и изменения содержания элементов с минимальным запаздыванием в процессе совмещенного литья и прокатки.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты проведенного исследования.

Основные результаты отражены в следующих **защищаемых положениях**:

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.

Процесс бесслитковой прокатки алюминиевых сплавов характеризуется рядом нерегулируемых параметров, преимущественно связанных с температурным режимом. Температура процесса контролируется только при начале процесса литья и фиксируется только после кристаллизации контактными термопарами. Поэтому разработка алгоритма управления тепловым режимом процесса требует введения дополнительных точек контроля температуры. Создание программы контроля основных параметров процесса БП выполнено на базе многоуровневой АСУ, включающей математическое моделирование при проектировании структурно-функциональной схемы и алгоритмов управления, реализованных в виде программного модуля регулирования

температурного режима на стадии литья и прокатки.

Теоретической основой разработки алгоритма (рисунок 1) послужила математическая модель тепловых процессов в зоне «расплав–валки–кристаллизаторы», учитывающая нестационарный характер теплопередачи и фазовые превращения при изменении химического состава сплава. Алгоритм включает: считывание текущих параметров, оценку отклонений от заданных значений, краткосрочный прогноз температуры, автоматическую корректировку управляющих воздействий (скорость вращения валков, расход охлаждающей воды, подача смазки), а также визуализацию и сохранение цифровых данных в БД системы.

Основу модели составляет неоднородное уравнение теплопроводности через решение задачи Коши, которое впервые было применено для условий бесслитковой прокатки (1):

$$\rho \cdot \left(\frac{Di}{d\tau} \right) = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}(t)) + q_v \quad (1)$$

где ρ – плотность металла, кг/м³; t – температура, °C; λ – теплопроводности металла, Вт/(м·°C); $Di/d\tau$ – полная производная энтальпии по времени; q_v – плотность внутренних источников тепла, Вт/м³.

Упрощенное уравнение энергии для неподвижной среды в зазоре валков-кристаллизаторов с постоянными свойствами (2):

$$\rho \cdot C \cdot \left(\frac{Dt}{d\tau} \right) = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}(t)) + q_v \quad (2)$$

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

Для учета скрытой теплоты кристаллизации применяется значение эффективной теплоемкости (3):

$$C_{\text{эфф}} = C_{\text{ж}}(1 - \psi) + C_{\text{т}}\psi + \frac{q_{\text{кр}}}{t_{\text{л}} - t_{\text{с}}} \quad (3)$$

где ψ – относительное затвердевание ($0 \leq \psi \leq 1$); $q_{\text{кр}}$ – скрытая теплота кристаллизации расплава, Дж/кг; $t_{\text{с}}$, $t_{\text{л}}$ – температура солидуса и ликвидуса, °C; $C_{\text{ж}}$, $C_{\text{т}}$ – теплоемкость жидкого и твердого металла, Дж/(кг·°C).

Таким образом, эффективная теплопроводность в двухфазной зоне преобразована в следующем виде (4):

$$\lambda_{\text{эфф}} = \lambda_{\text{т}} \cdot \psi + \lambda_{\text{ж}} \cdot (1 - \psi) \quad (4)$$

где $\lambda_{ж}$, $\lambda_{т}$ – теплопроводности жидкого и твердого металла, Вт/(м·°C).

Схемы координат дискретизации для совмещенного литья и прокатки показаны на рисунке 2.

Расположение точки входного контакта валков-кристаллизаторов [HI] (5):

$$u = 0, v = v_{\text{вход}}, \frac{dT}{dy} = 0 \quad (5)$$

Расположение контакта в зоне распределительной насадки с валками кристаллизаторами [AB], [EG], [CG] (6-8):

$$u = 0, v = v_p, T = T_p \text{ в } \overline{AB} \quad (6)$$

$$u = v = 0, T = T_p \text{ в } \overline{EG} \quad (7)$$

$$u = v = 0, T = T_p \text{ в } \overline{CG} \quad (8)$$

где T_p – температура расплава, град.

Расположение участка контакта лунки расплава [CD] (9):

$$\frac{du}{dy} = 0, v = 0, \frac{dT}{dy} = 0 \quad (9)$$

где u , v – расстояние горизонтали от центральной оси валков и вертикали от базовой линии до точки входного контакта, мм;

Зона контакта между лункой в зазоре валков и поверхностью валка [DI] (10-11):

$$u = (y - y_0)\omega, v = -(x - x_0)\omega \quad (10)$$

$$-k \frac{dT}{dn} = h_{\text{конт}}(T - T_K), (\phi_1 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}) \quad (11)$$

где k – теплопроводность материала валка, Вт/(м·K); $h_{\text{конт}}$ – коэффициент теплопереноса, Вт/(м²·K); T_K – температура расплава, град; ω – скорость вращения валков, об/мин.

Теплообмен между валками и охлаждающей водой оценивали через выражение (12):

$$-k \frac{dT}{dn} = h_w(T_w - T_K) \quad (12)$$

где T_w – температура охлаждающей жидкости (°C); h_w –

коэффициент конвективного теплообмена между охлаждающей водой и поверхностью валка, Вт/(м²·К).

Тепловые изменения внутри валков (13):

$$-k \frac{dT}{dr} \Big|_{r=R} = h_{\text{конт}}(T - T_K) + h_{\text{вращ}}(T - T_{\text{ср}}) \quad (13)$$

где r – диаметр валка, м; $h_{\text{вращ}}$ – коэффициент теплоотдачи при вращении валка.

В зоне контакта валка с расплавом поток обратной воды рассматривали как турбулентный, что позволяет определить интенсивность теплообмена в зоне с лункой расплава через коэффициент теплопереноса.

Для проверки корректности математической модели были проведены эксперименты на действующей линии бесслитковой прокатки. Цифровая диаграмма температурных полей валков-кристаллизаторов (рисунок 3) получена по данным от хромель-алюмелевых термопар (ТХА), установленных в зоне контакта расплава и валков (рисунок 4). Измерения проведены при различных режимах подачи расплава, охлаждения и скорости вращения валков, что обеспечило репрезентативные данные о динамике температур в зоне кристаллизации.

Для расчета температурных полей применялся метод конечных разностей. Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными (рисунок 5–7) показало расхождение не более 3–5%, что подтверждает корректность и надежность математической модели, ее доказательство и применимость для прогнозирования теплового состояния в производственных условиях.

На основе полученных теоретических и экспериментальных данных разработаны схема входных и целевых выходных данных (БД) технологического процесса БП и структурная организация цифровой системы управления процессом БП (рисунок 8, 9). Отличие от существующих структурных систем заключается во вводе цифровой прогнозной модели за счет полученных дополнительных параметров процесса БП.

Таким образом, реализованный алгоритм в программном комплексе (рисунок 10, 11) расширяет базу цифровых данных и обеспечивает: мониторинг дополнительных технологических пара-

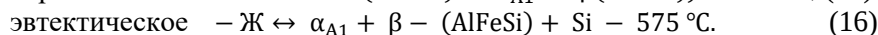
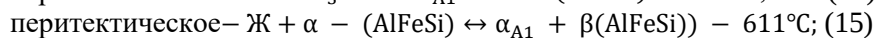
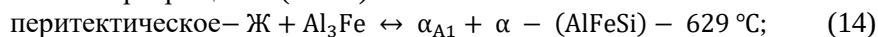
метров в реальном времени; автоматическую корректировку при выходе параметров за допустимые пределы при графическом отображении температурных кривых в зоне кристаллизации с учетом прогноза температурных изменений с учетом инерционности тепловых процессов.

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%.

Совмещенный процесс литья и прокатки высоколегированных алюминиевых сплавов характеризуется высокой степенью влияния химического состава на структуру и свойства листовой заготовки, а следовательно, и прямым влиянием на качество готовой продукции. В многокомпонентных сплавах интерметаллические соединения могут образовывать двойные, тройные и более сложные фазы в различных температурных интервалах. Примером такой сложной фазы является α - твердый раствор (AlFeSi), химический состав которого близок к $\text{Al}_{12}\text{Fe}_3\text{Si}$. Формирующийся во время кристаллизации заготовки в зазоре валков твердый раствор, а также присутствие гетерогенных структурных элементов, различающихся по количеству, размеру, форме и распределению, оказывают на существенное влияние на физические, химические и механические свойства алюминиевых заготовок (рисунок 12, 13). 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). Фаза Al_3Fe является ключевым элементом, определяющим механические свойства сплава, поскольку она состоит из 59,17% алюминия и 40,83% железа. Фаза Al_3Fe может распадаться при охлаждении, образуя соединения Al_7Fe_7 и Al_5Fe_2 , и растворяет в

незначительном количестве кремний. После первичной кристаллизации фазы α -(AlFeSi) разделены на три части, соответствующие выделению фаз различного состава. В системе происходят инвариантные превращения (14-16):



Необходимость постоянного контроля температуры связана с тем, что во время совмещенного процесса литья и прокатки для сплавов системы Al – Fe – Si с высоким содержанием Fe и при низкой температуре литья может происходить эвтектическая реакция с образованием тройной эвтектики, включающей фазы β – (Fe – Si), αAl и Si. Грубая эвтектическая структура в таких сплавах, вызванная высоким содержанием Fe, обычно приводит к резкому ухудшению механических свойств заготовки, в том числе и поверхности заготовки, что можно обнаружить визуально. Однако добавление небольшого количества Mn может улучшить эту грубую эвтектическую структуру, повышая однородность и стабильность сплава. Время перемешивания также становится важным фактором в контроле в полиморфных переходах элементов сплавов системы Al-Fe-Si-Mn. Поэтому необходимо тщательно его контролировать в печи, в миксере и проточной емкости для рафинирования при соблюдении определенных температурных условий, чтобы обеспечить равномерное распределение Mn и Fe в сплаве, что в итоге улучшает качество бесслитковой заготовки. Именно в этих местах необходима установка дополнительных точек контроля и измерения. После сбора информации цифровых значений по заданному алгоритму система АСУ ТП оказывает управляющее воздействие на корректировку химического состава или температуры, скорости перемешивания и самого литья.

Для обеспечения стабильности процесса и создания структуры в условиях совмещенного литья и прокатки разработаны методы и алгоритмы оперативного контроля, основанные на схеме параллельного отбора проб и экспресс-анализа. Периодический отбор проб производили как из литниковой системы, так и от кромки полосу сразу после ее выхода из валков, что позволило оценивать ди-

намику изменения состава между жидкой и твердой фазами. Использование экспресс-анализа (оптическая эмиссионная спектрометрия) дало возможность получать дополнительные данные о содержании Fe, Si и Mn в БД в реальном времени с минимальным запаздыванием.

Для интерпретации результатов было применено термодинамическое моделирование в программной среде Thermo-Calc, что позволило установить взаимосвязь между составом сплава, температурой ликвидуса/солидуса и формированием фаз. Эти данные использованы для прогноза поведения сплава в зоне кристаллизации с учетом температурных режимов охлаждения.

На основе анализа экспериментальных и моделируемых данных создана цифровая платформа для разработанного алгоритма корректировки химического состава, реализованного в виде цифрового модуля, интегрированного в АСУ ТП агрегата бесслитковой прокатки (рисунок 14). Алгоритм включает последовательные этапы технологического цикла – подготовку шихты, брикетирование, плавление, легирование, модифицирование и совмещенное литье-прокатку, при этом на каждом этапе задаются узкие интервалы температур для соответствующей скорости литья, обеспечивающие управляемое затвердевание металла по стадиям: подготовка шихты при 100–150°C (30 мин); брикетирование при 150–300°C (15–20 мин); плавление при 700–800°C (120 мин); легирование при 850–950°C (60 мин); модифицирование и литье через миксер при 760–800°C (40 мин); литье и прокатка при 680–690°C (40 мин). Алгоритм анализирует текущие результаты, сравнивает их с зарегистрированными значениями и в зависимости от полученных данных регулирует подачу легирующих добавок и интенсивность перемешивания расплава. Изменения вносятся сразу в БД АСУ, еще до подачи металла в валки-кристаллизаторы. Это помогает избежать появления нежелательных крупных интерметаллидных фаз и способствует устойчивому формированию мелкозернистой структуры.

Контроль и корректировка химического состава выполняется вспомогательным модулем АСУ, который проверяет содержание Fe, Si и Mn на соответствие установленным интервалам. Экспресс-анализ (оптическая эмиссионная спектрометрия) используется для

верификации стабильности состава без вмешательства в процесс дозирования и корректировки. Сопоставление данных анализа с температурными параметрами позволяет оценивать качество модифицирования и корректировать только температурный режим, а не химическую составляющую. При этом программный модуль не корректирует химический состав напрямую, а передает результаты анализа в алгоритм управления температурным режимом, где происходит сопоставление текущего химического состояния с тепловыми параметрами зоны «расплав – валки-кристаллизаторы» с учетом изменения температуры ликвидуса расплава.

Таким образом, разработанное программное обеспечение позволяет осуществлять визуализацию параметров плавки и литья, контроль отклонений непосредственно в ходе процесса, а также прогнозировать изменение состава в зависимости от температурно-временных условий. Производственная апробация системы подтвердила повышение равномерности структуры и механических свойств заготовки на 10–12%, а также снижение энергетических затрат и повышение стабильности технологического процесса.

Предлагаемые IT-решения внедряются в металлургическое производство прокатных изделий, способствуя повышению качества заготовок, улучшению энергоэффективности и более устойчивой работе технологических процессов. Под их влиянием цифровизация литейного и прокатного производства алюминия получает активное развитие, обеспечивая рост уровня автоматизации и улучшение качества выпускаемой продукции. Производственные испытания подтвердили эффективность разработанного ПО, поскольку его применение позволило повысить качество готовой продукции на 8–12% при одновременном снижении энергозатрат на 10–15%. АСУ ТП бесслитковой прокатки в итоге сохраняет стабильную работу даже при влиянии внешних факторов (температуры охлаждающей воды, напряжения питания, помех датчиков) и демонстрирует высокий уровень адаптивности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научная задача - повышение стабильности и эффективности процесса бесслитковой 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, позволил 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 обосно-

вызывает 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

4. 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.

5. 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(10). – P. 2371–2382. DOI: 10.5829/ije.2026.39.10a.02.

Публикации в прочих изданиях:

6. 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. – Санкт-Петербург: ГНИИ «Нацразвитие», 2024. – С. 31–32.

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

8. 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. – Санкт-Петербург: ГНИИ «Нацразвитие», 2024. – С. 26–27.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025613075 Российская Федерация. Программа моделирования процесса производства алюминиевой фольги. Заявка № 2025611515: заявл. 31.01.2025: опубл. 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.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025689974 Российская Федерация. Программа контроля основных параметров процесса непрерывного литья. Заявка № 2025688469: заявл. 21.10.2025: опубл. 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.

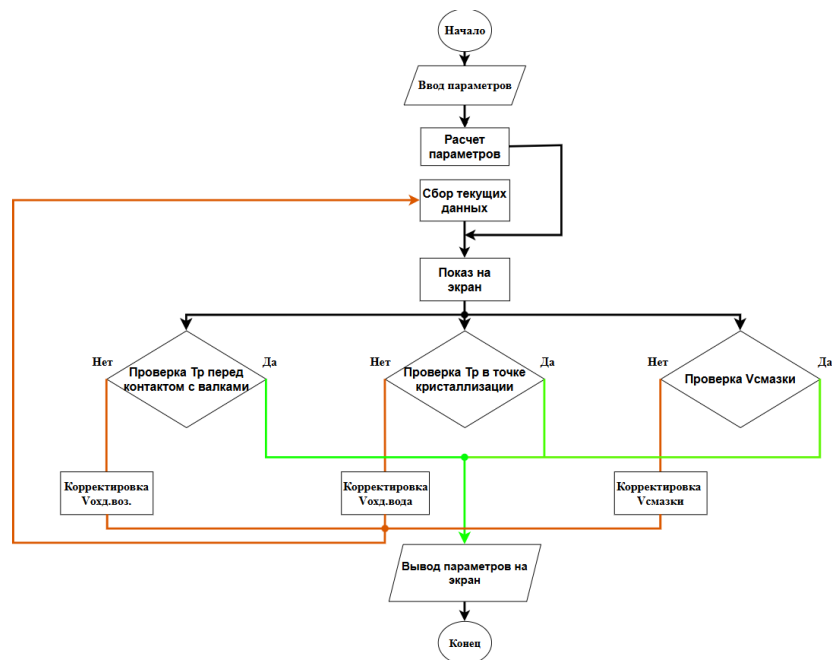


Рисунок 1 - Алгоритм контроля основных параметров процесса бесслитковой прокатки на базе цифровой платформы

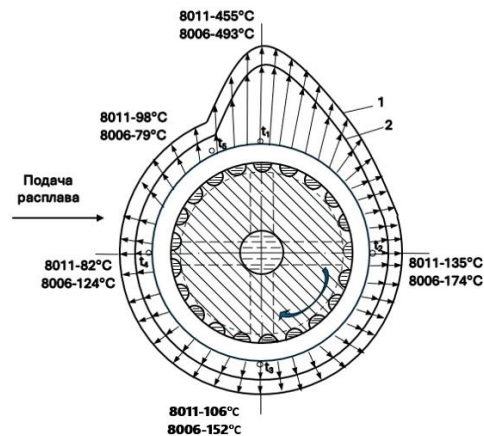


Рисунок 3 - Цифровая диаграмма температурных полей валков кристаллизаторов для алюминиевых сплавов

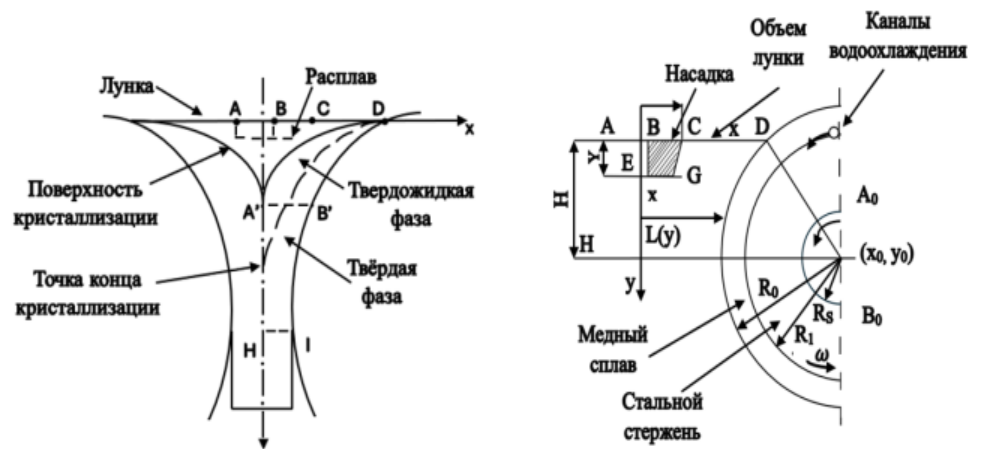


Рисунок 2 - Схемы координат в области деформации полосы

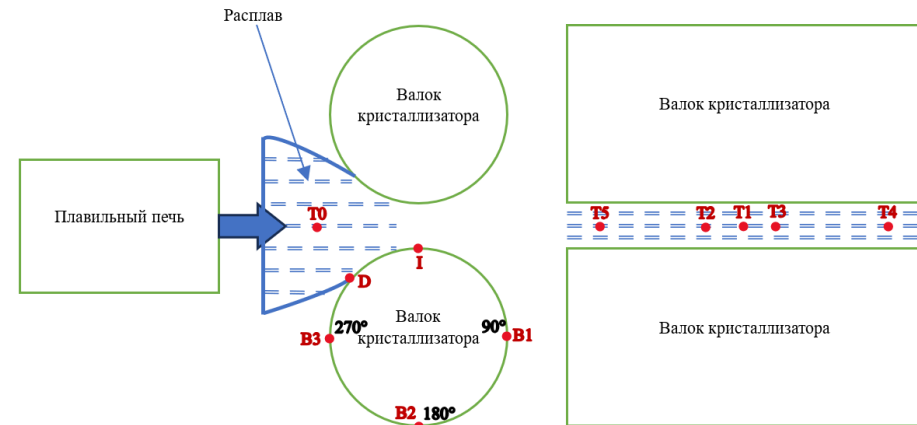


Рисунок 4 - Точки измерения и места расположения термопар

Параметр	Значение
Температура расплава, °C	680-690
Скорость литья, мм/с	10-12
Скорость охлаждения воды, л/с	10-15
Начальная температура воды охлаждения, °C	25
Температура среды, °C	25
Длина валков кристаллизаторов, мм	1200
Диаметр валков кристаллизаторов, мм	800
Расстояние между 2 валками кристаллизатора, мм	7,6
Скорость подачи расплава, кг/с	5-6
Начальная температура поверхности валков, °C	70-90
Расход воздушного охлаждения, м³/с	2

Рисунок 5 - Входные данные моделирования и эксперимента

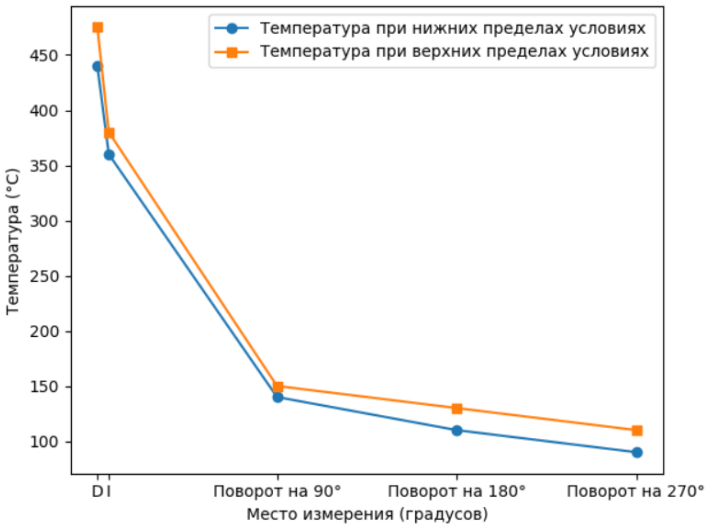


Рисунок 7 - Зависимость температуры поверхности валков кристаллизаторов при нижних и верхних граничных условиях

	Параметр	Эксперимент		Моделирование		ΔT °C	ΔT %
		Диапазон	Среднее	Диапазон	Среднее		
Выходные данные	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

Рисунок 6 - Выходные данные моделирования и эксперимента

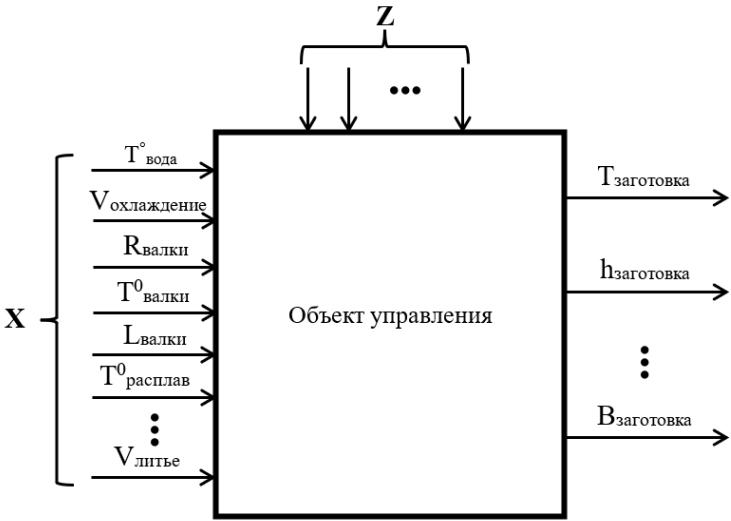


Рисунок 8 - Схема входных и целевых выходных данных технологического процесса бесслитковой прокатки для цифровой платформы

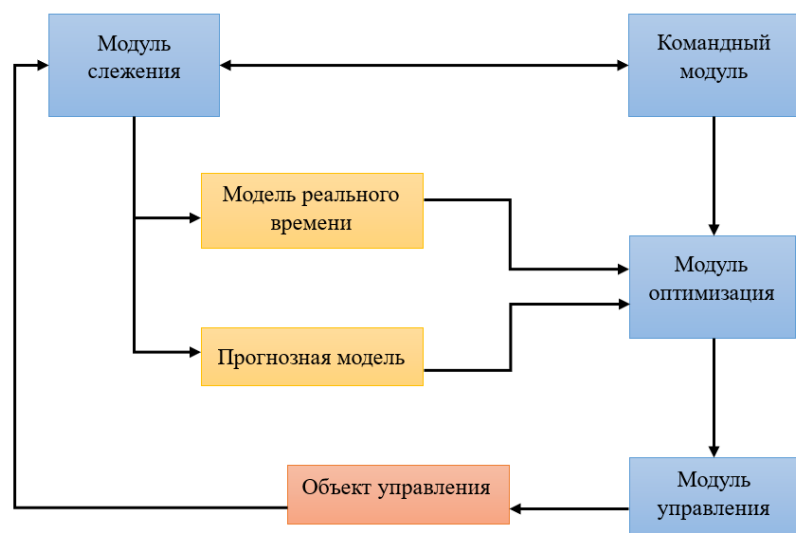


Рисунок 9 - Структурная организация цифровой системы управления процессом бесслитковой прокатки

Элемент	Диапазон содержания, % мас.	Основные структурные фазы	Влияние на микроструктуру	Влияние на механические свойства
Fe	0,3 – 0,8	β -Al ₃ FeSi, Al ₃ Fe	При > 0,7 % формируется игольчатая β -фаза, ухудшающая пластичность	Снижение δ и $\sigma_{0,2}$, рост твердости при переизбытке
Mn	0,3 – 0,6	α -Al(Fe,Mn)Si, Al ₆ Mn	Модифицирует β -фазу в компактную α -фазу, уменьшает размер зерна	Повышает пластичность и прочность, снижает дефектность
Si	0,7 – 1,1	Si, Al-Si-Fe, Al-Si-Mn	Участвует в эвтектических реакциях, влияет на равномерность кристаллизации	При > 1,1 % повышает хрупкость, снижает δ
Соотношение Fe/Mn	1,1 – 1,3	α -Al(Fe,Mn)Si + Al ₃ Fe	Обеспечивает равномерное распределение фаз	Оптимизирует σ_y и $\sigma_{0,2}$, повышает износостойкость

Рисунок 12 - Влияние основных легирующих элементов на структуру и свойства сплавов системы Al-Fe-Si-Mn

Ввести входные параметры

Скорость литья V_{литье}
Скорость подачи водоохлаждения V_{охл.вода}
Скорость подачи смазки V_{смазка}
Скорость воздушного охлаждения V_{охл.воздух}

Проверить

Остановить

Параметры, полученные от датчика

Т_{воздух}: 25.000 °C
Т_{вода}: 25.000 °C
Толщина заготовки: 7.600 мм
V_{литье}: 11.099мм/с
V_{охл.вода}: 13.071л/с
V_{смазки}: 2.011л/с
V_{охл.воздух}: 2.007м3/мин
Текущая температура расплава перед контакта с вальками T_{о.расплава}: 683.949 °C
Текущая температура расплава перед контакта с вальками Трасплав: 456.666°C

Рисунок 10 - Окно работы программы контроля основных параметров процесса бесслитковой прокатки

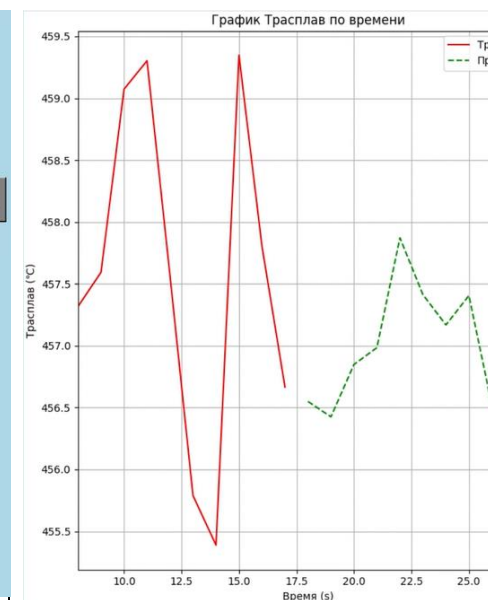


Рисунок 11 - График изменения температуры расплава в точке кристаллизации в реальном времени

Элемент	Температура эвтектики (E), перитектики (P) °C	Фазы в равновесии с α -твердым раствором	Растворимость, мас. %				
			T _E , T _P	550°C	400°C	300°C	200°C
Fe	655 (E)	Al ₃ Fe	0,05	0,005	0,01	-	-
Si	557 (E)	Si	1,65	0,80	0,30	0,10	0,05
Mn	658,5 (E)	Al ₆ Mn	1,82	0,35	0,09	0,015	0,0025
Mg	449 (E)	Al ₃ Mg	17,40	14,50	12,20	6,60	3,50
Cu	548 (E)	Al ₂ Cu	5,7	4,03	1,50	0,45	0,13
Ti	665 (P)	Al ₃ Ti	1,20	0,20	-	-	-

Рисунок 13 - Растворимость элементов и соединений в алюминиевом твердом растворе

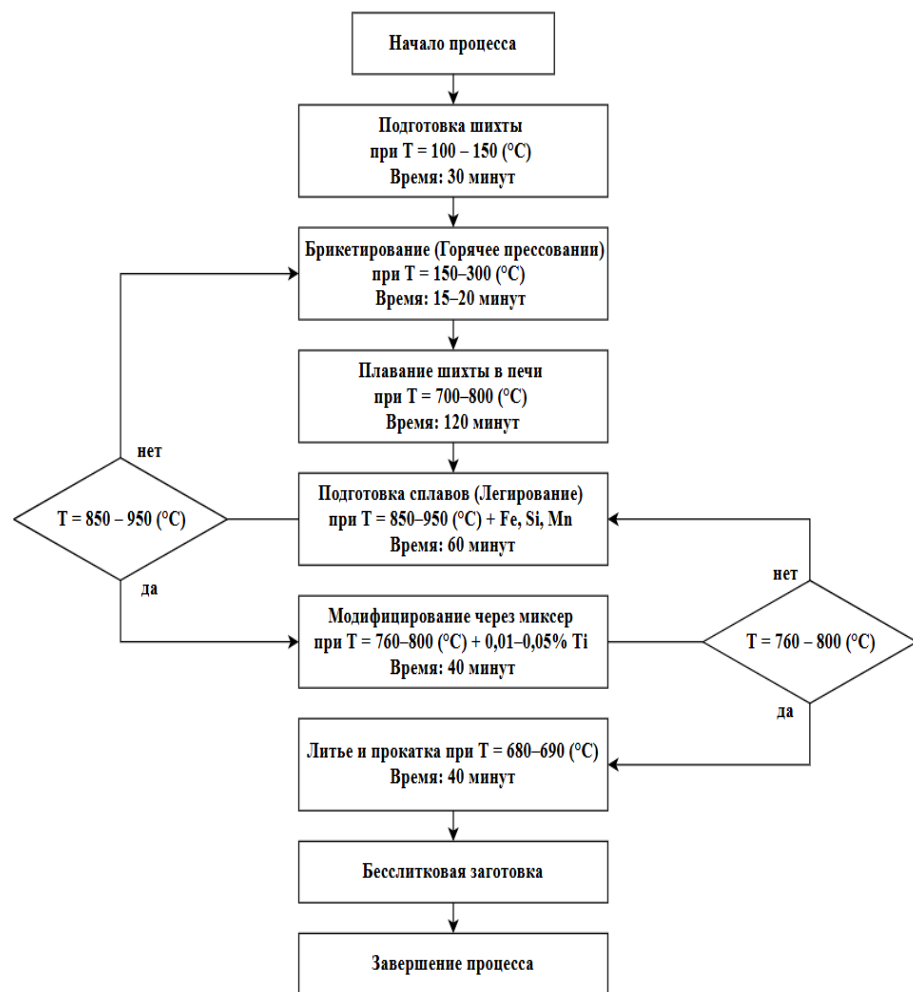


Рисунок 14 - Алгоритм контроля температурного режима процесса бесслитковой прокатки

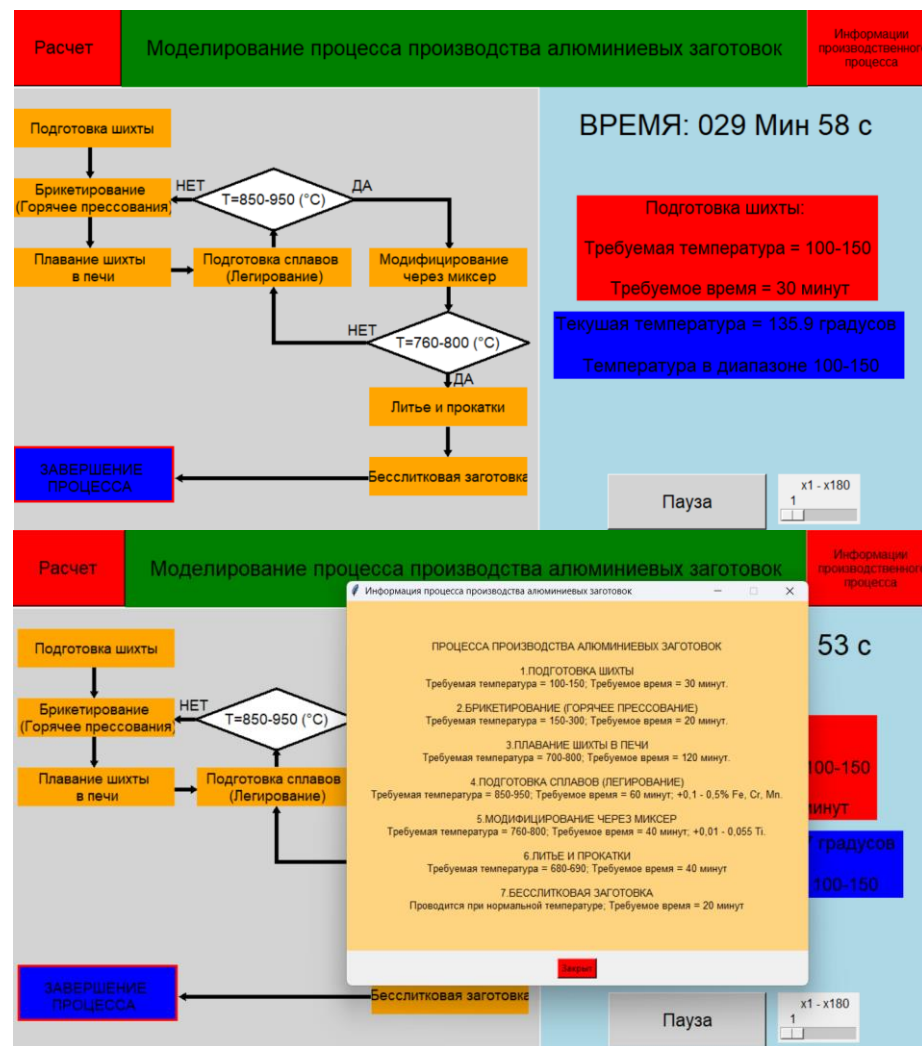


Рисунок 15 - Экран программы моделирования процесса производства алюминиевой фольги