На правах рукописи



Мунтин Александр Вадимович

Научные основы проектирования рациональной конфигурации прокатных станов литейно-прокатных комплексов для производства стальной полосы различного сортамента

2.5.7 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва, 2026

Работа выполнена в АО «Выксунский металлургический завод» и Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: Бельский Сергей Михайлович
Доктор технических наук, профессор
Профессор кафедры обработки металлов давлением
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет»

Болобанова Наталия Леонидовна
Доктор технических наук, доцент
Заведующий кафедрой металлургии, машиностроения и технологического оборудования
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Череповецкий государственный университет»

Денисов Сергей Владимирович
Доктор технических наук
Главный специалист группы по научной деятельности Научно-технического центра
Публичное акционерное общество «Магнитогорский металлургический комбинат»

Ведущее предприятие: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Защита состоится 8 декабря 2026 года в ___ часов ___ минут на заседании диссертационного совета 24.2.331.01 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская, 5.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок: 8 (499) 263-66-33 доб. 36-28

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат технических наук, доцент Плохих А.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Литейно-прокатные комплексы (ЛПК) – это металлургические агрегаты, в которых машины непрерывного литья заготовок находятся в одной технологической линии с прокатным станом. В 60-80-х годах XX века заметных успехов в разработке подобных агрегатов для производства сортового проката, катанки, помольных шаров, труб и листа удалось достичь Всесоюзному научно-исследовательскому институту металлургического машиностроения (ВНИИМЕТМАШ) им. А.И. Целикова. В частности, в 1979 году сдан в эксплуатацию на заводе им. И.Ф. Тевосяна (г. Электросталь) первый в мире промышленный ЛПК для получения стальной катанки из труднодеформируемых сплавов. Проблема синхронизации скоростей разливки стали и ее прокатки была решена путем применения планетарного стана.

Спустя десять лет начинается история промышленных ЛПК для производства стальной полосы: в 1989 году компанией SMS создан комплекс на заводе Nucor Steel. Новые ЛПК для производства полосы запускаются практически ежегодно, сейчас их число в мире превышает 70. Одними из последних являются ЛПК компании Danieli на заводах Yukun (Китай) и Узметкомбинат (Узбекистан). Применение ЛПК позволяет повысить производительность, уменьшить отходы и энергопотребление на тонну продукции. Непрерывное совершенствование технологических схем и оборудования ЛПК позволяет ещё больше повышать их гибкость и эффективность. Мировое производство горячекатаной широкополосной стали составляет свыше 700 млн. тонн в год, преимущественно на непрерывных широкополосных станах горячей прокатки. Из них производство широкополосной стали на ЛПК составляет более 125 млн. тонн в год.

Решающим шагом к реализации ЛПК стала возможность разливки качественных тонких слябов с высокой скоростью, сопоставимой со скоростью прокатки. Совмещение процессов оказало значительное влияние и на прокатный передел, появилась возможность улучшения качества проката путем реализации различных комбинаций термомеханических параметров в непрерывном потоке. В свою очередь, состав оборудования и его технические характеристики напрямую определяют возможность реализации разработанной технологии в условиях ЛПК. Необходимость принятия обоснованных технических решений при организации передовых технологий непрерывной широкополосной прокатки как на действующих, так и новых ЛПК сформировала новое направление исследований – взаимное влияние архитектуры оборудования ЛПК и технологических режимов для получения проката с заданными свойствами.

Таким образом, разработка научных основ проектирования технологии прокатки и состава технологического оборудования непрерывных станов ЛПК для производства стальной полосы является актуальной задачей. Её решение эффективно осуществлять с применением системы разработок, включающей математическое моделирование, имитацию металлургических процессов, лабораторное воспроизведение на уменьшенных образцах и промышленные эксперименты с детальным исследованием полученной продукции.

Степень проработанности темы исследования. Вопросы производства на ЛПК рулонного проката различного сортамента находятся в фокусе специалистов из Австралии, Австрии, Великобритании, Германии, Египта, Индии, Италии, Испании, Канады, Китая, Кореи, Мексики, России, США, Узбекистана, Южной Африки и других стран. Это свидетельствует о масштабе и важности направления исследований в области технологий и оборудования ЛПК.

В отечественной литературе вопросы оборудования и технологии производства стальной полосы на ЛПК представлены в следующих работах: «Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос» (2003 год, авторы В.М. Салганик, И.Г. Гун и др.), «Оптимизация совмещенных литейно-прокатных процессов» (1996 год, авторы В.С. Лисин, А.Н. Скороходов), «Литейно-прокатный агрегат – сумма технологий производства тонких стальных полос» (2016-2017 год, авторы С.М. Бельский, И.П. Мазур, Ю.А. Мухин), а также рядом других публикаций. Работы выполнены на высоком уровне, однако включают в себя в основном обзор мировых достижений, посвящены теоретическим расчётам или лабораторным экспериментам. Общим недостатком отечественных научных работ являлось отсутствие практической реализации технологии разливки и прокатки стальной полосы на ЛПК из-за отсутствия подобных комплексов в России.

В иностранной литературе можно найти немало информации о практических результатах внедрения данной технологии. Авторами публикаций являются как специалисты университетов и исследовательских центров, так и компаний производителей оборудования и металлургических компаний, в составе которых работают данные агрегаты. Значительный вклад в исследование вопросов ЛПК внесли A.J. DeArdo, J.M. Rodrigez-Ibabe, P. Uranga, S.Bragin, B.Linzer, P.Bobig, M.Guagnelli и другие. При этом необходимо отметить, что в публикациях различных авторов встречаются как согласующиеся выводы и результаты, так и отличающиеся, противоречащие друг другу. В частности, различные точки зрения формируют компании-конкуренты (производители оборудования) в попытках доказать преимущества своего технического решения. Таким образом, эти данные не получили должного обобщения, не установлены связи между заданными качественными характеристиками продукции и составом технологического оборудования. Не сформулированы направления совершенствования оборудования станов ЛПК.

С вводом в 2008 году ЛПК в г. Выксе на заводе Объединённой металлургической компании (ОМК) российские исследователи получили возможность не только проводить теоретические изыскания, но и применять их результаты на практике, осваивать новые технологии и оборудование.

Объект исследования: литейно-прокатные комплексы для производства горячекатаной стальной полосы, включая оборудование и режимы прокатки.

Предмет исследования: закономерности взаимного влияния состава оборудования прокатных станов ЛПК и технологических параметров термомеханической обработки на качество стальной полосы.

Цель диссертационной работы: обеспечение заданного качества широких полос различного сортамента из низколегированных марок стали при производстве на литейно-прокатных комплексах путём применения рационального состава технологического оборудования прокатных станов и новых режимов термомеханической обработки.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Аналитический обзор оборудования литейно-прокатных комплексов в мире, а также технологий и сортамента производимой продукции;
2. Обоснование необходимости совместного учета технологии прокатки и оборудования для её осуществления, разработка методологической базы исследования новых технологий и оборудования ЛПК;
3. Определение особенностей влияния состава оборудования и технологических параметров производства горячекатаных полос из основных сортаментных групп, выявление рациональных технических и технологических приёмов для каждого вида продукции;
4. Установление закономерностей формирования структуры и механических свойств при производстве стальной полосы на ЛПК;
5. Разработка научно-обоснованной методики выбора рационального состава оборудования прокатных станов литейно-прокатных комплексов;
6. Разработка технологии производства рулонного проката различного сортамента и совершенствование оборудования стана ЛПК;
7. Промышленное опробование и внедрение результатов работы в условиях литейно-прокатного комплекса Выксунского завода ОМК.

Научная новизна:

1. Разработана научно-обоснованная методика выбора состава технологического оборудования прокатных станов ЛПК по принципу «требования к продукции – ключевые показатели – технология прокатки – рекомендуемое оборудование», обеспечивающая эффективное производство на ЛПК стальной полосы различного сортамента. Методика позволила установить рациональные конфигурации станов в зависимости от заданных геометрических параметров, механических и физических свойств готовой полосы.
2. Предложены критерии реализации контролируемой прокатки микролегированных ниобием сталей на ЛПК: обеспечение полной статической рекристаллизации среднего (500-600 мкм) и крупного (от 2000 мкм) аустенитного зерна в черновой стадии прокатки; отсутствие рекристаллизации в чистовой стадии прокатки; минимально возможный эффективный размер зерна аустенита после чистовой стадии прокатки. Установлены ранее неизвестные закономерности рекристаллизации низкоуглеродистых сталей с микролегированием и без для различных конфигураций станов ЛПК.
3. Установлены количественные закономерности формирования структуры аустенита при контролируемой прокатке на ЛПК с двумя группами клетей, включая зависимость рациональной толщины подката, обеспечивающей баланс

между измельчением аустенитного зерна в черновой стадии и его наклёпом в чистовой стадии: $\sum \varepsilon_{\text{чист}} / \sum \varepsilon_{\text{черн}} = 1{,}23 \div 1{,}57$, где $\sum \varepsilon_{\text{чист}}$ – суммарное относительное обжатие промежуточного подката при его прокатке в чистовой группе клетей (в %); $\sum \varepsilon_{\text{черн}}$ – суммарное относительное обжатие сляба при прокатке в черновой группе клетей (в %). А также установлена формула расчёта температуры начала чистовой прокатки, обеспечивающая отсутствие рекристаллизации $T_{\text{нач.чист}} = 1117Nb^{0{,}073} \pm 20$ °C, где Nb – содержание ниобия в стали, из которой получают сляб (в мас. %).

4. Создан комплекс верифицированных моделей, адаптированных к условиям ЛПК: износа рабочего валка на основе больших промышленных данных с применением машинного обучения; расчёта температурного поля валка с верификацией по измерениям температуры валков после прокатки на стане ЛПК; расчёта распределения температуры подката при индукционном нагреве; определения коэффициента трения при установившемся процессе прокатки на основе промышленных данных, расчёта рекристаллизации аустенитного зерна.

5. Разработана новая модель расчёта сопротивления деформации низколегированной стали, отличающая тем, что термомеханические коэффициенты модели имеют взаимную зависимость, и получены для ряда современных сталей термомеханические коэффициенты уравнений сопротивления деформации в диапазоне содержания химических элементов (% по массе): углерод от 0,02% до 0,5%, марганец от 0,06% до 1,8%, кремний от 0,06% до 0,26%, хром от 0,09% до 0,49%, никель от 0,05% до 0,18%, медь от 0,11% до 0,52%, ниобий до 0,1%, ванадий до 0,2%, титан до 0,2% и бор до 0,006%.

6. На уровне изобретений разработаны новые технологические схемы производства рулонного проката на ЛПК из тонкого сляба 90-110 мм:

- контролируемая прокатка с промежуточным охлаждением подката и ускоренным охлаждением полосы толщиной до 12 мм, обеспечивающая класс прочности до К60 и вязкость стали при температурах до -60 ºС;
- рекристаллизационная прокатка с последующим интенсивным охлаждением для получения стальных полос с временным сопротивлением от 500-600 МПа;
- горячая прокатка тонких полос (толщиной 1…2 мм), обеспечивающая заданный уровень плоскостности и точности по геометрическим параметрам;
- горячая прокатка среднеуглеродистых марок стали с содержанием углерода 0,30…0,36%, обеспечивающая заданную структуру и при испытаниях на растяжение отношение предела текучести к пределу прочности не более 0,65.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии фундаментальных знаний о процессе горячей прокатки стальных полос, в частности в изучении особенностей этого процесса для условий литейно-прокатных комплексов, а также в создании методики научно обоснованного выбора состава технологического оборудования прокатных станов ЛПК. Под **научными основами** в диссертации понимается совокупность новых знаний о закономерностях структурообразования аустенита (включая рекристаллизацию крупнозернистой литой структуры), реологических характеристиках широкого

круга низколегированных сталей и разработанного инструментария (математических моделей, количественных критериев, технологических схем термомеханической обработки), которые в комплексе позволяют обоснованно проектировать конфигурацию стана под заданный сортамент. Установленные в работе взаимосвязи параметров температурно-деформационного воздействия и качественных показателей полосы открывают перспективы новых разработок в этом научном направлении.

Практическая значимость. С применением результатов представленной работы впервые в России на литейно-прокатном комплексе разработана технология производства широкого марочного сортамента стальной полосы, произведено 1 131 873 тонны продукции из низколегированных сталей в условиях ЛПК Выксунского завода ОМК. В частности, хладостойкий прокат толщиной от 5 до 12 мм для производства электросварных нефтегазопроводных труб классов прочности К42-К60, рулонный прокат толщиной от 1 до 2 мм из сталей Ст2пс и 08пс для применения в строительстве и машиностроении, прокат из среднеуглеродистых марок стали, в том числе 30Г для производства обсадных труб повышенных и высоких классов прочности (от К55 до Р110). Освоена технология непрерывной горячей прокатки с интенсивным охлаждением полосы. Разработаны и внедрены рекомендации по модернизации оборудования широкополосного стана ЛПК Выксунского завода ОМК, обеспечивающие повышение качества стальных полос.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Научно обоснованная методика выбора рационального состава технологического оборудования прокатных станов литейно-прокатных комплексов, основанная на системном подходе «требования к продукции – ключевые показатели – технология прокатки – рекомендуемое оборудование», позволяющая проектировать конфигурацию стана под заданный сортамент.
2. Критерии и математические модели рекристаллизации аустенита при контролируемой прокатке микролегированных ниобием сталей на ЛПК, включающие зависимости для определения рациональной толщины подката и температуры начала чистовой прокатки, обеспечивающие отсутствие рекристаллизации и минимальный эффективный размер зерна.
3. Комплекс математических моделей для расчёта параметров процесса горячей прокатки на ЛПК, верифицированный промышленными данными, в том числе модель сопротивления деформации с взаимозависимыми термомеханическими коэффициентами, модель износа валков на основе машинного обучения, конечно-разностная модель температурного поля валка и модель определения коэффициента трения по опережению.
4. Технологические схемы термомеханической обработки (контролируемая прокатка с промежуточным охлаждением подката, рекристаллизационная прокатка с интенсивным охлаждением), обеспечивающие производство хладостойкого трубного проката классов прочности до К60 с ударной вязкостью до -60 °С, а также высокопрочных и тонких (1–2 мм) полос.

5. Система разработки новых видов продукции на ЛПК, интегрирующая математическое моделирование, физическое моделирование, лабораторную прокатку и промышленные эксперименты с обработкой больших данных, позволившая сократить сроки освоения новых марок стали.

6. Результаты промышленного внедрения разработанных технологий и усовершенствованного оборудования на ЛПК Выксунского завода ОМК.

Достоверность результатов. Достоверность результатов исследования обеспечивалась комплексным подходом к их получению. Подход включал применение стандартных методов с использованием современного исследовательского и испытательного оборудования, сопоставление данных теоретического анализа, экспериментальных методов и промышленных экспериментов. Экспериментальные данные получены в результате проведения большого количества испытаний на оборудовании для определения механических свойств, имитации металлургических процессов и лабораторном стане, оснащёнными современными измерительными системами. Обоснованность теоретических выводов и результатов экспериментальных исследований подтверждена успешным производством продукции на ЛПК Выксунского завода ОМК.

Методология и методы исследования. Методологической основой работы является комплексный подход, сочетающий математическое и конечно-элементное моделирование (QForm, ELTA, Ansys), физическое моделирование на установках Gleeble 3800 и дилатометре DIL 805, лабораторную прокатку на стане ДУО-300, а также промышленные эксперименты на ЛПК Выксунского завода ОМК с обработкой больших данных методами машинного обучения и статистического анализа. Структуру и механические свойства исследовали стандартными металлографическими и испытательными методиками.

Личный вклад автора. Соискатель Мунтин А.В. непосредственно участвовал в постановке цели и задач исследования, разработке общей концепции работы, планировании и организации всех этапов исследований. Автором лично проведены лабораторные эксперименты на установках Gleeble 3800 и дилатометре DIL 805, а также лабораторная прокатка на стане ДУО-300. Соискатель выполнил обработку и анализ экспериментальных данных, включая построение термокинетических диаграмм и определение термомеханических коэффициентов моделей сопротивления деформации. На основе полученных результатов автором установлены новые закономерности рекристаллизации аустенита и предложены количественные критерии оценки эффективности конфигураций прокатных станов ЛПК. Мунтин А.В. принял непосредственное участие в разработке и промышленном освоении технологий производства, включая хладостойкие, высокопрочные и микролегированные бором стали, а также во внедрении усовершенствованного оборудования (системы интенсивного охлаждения, калибровки эджерных валков, усиленных муфт привода черновых клетей) на ЛПК Выксунского завода ОМК.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертации доложены и обсуждены на Международной конференции Трубы (Челябинск, 2014 г.), Asia Steel Conference (Йокогама, Япония, 2015 г.), Международная конференция Thermec (Грац, Австрия, 2016 г.), Международный конгресс Rolling (Грац, Австрия, 2016 г.), AISTech Iron and Steel Technology Conference (Нэшвилл, 2017 г. и Кливленд, 2020 г., США), Международном симпозиуме TDSR (Ухань, Китай, 2018 г.), XII Конгрессе прокатчиков (Выкса, 2019 г.), 28th и 30th International Conference on Metallurgy and Materials (Чехия, Брно, 2019 и 2021 гг.), 12-й и 13-й Всероссийской конференции «Будущее машиностроения России» (Москва, 2019 и 2020 гг.), Asia Steel Conference (Чанша, Китай, 2024 г.), Конференция ФХОМП (Сочи, 2024 год), Круглый стол в честь 120-летия со дня рождения А.И. Целикова (Москва, 2024 г.) и др.

Разработки отмечены рядом престижных наград: Премия Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых за освоение новых промышленных технологий термомеханической обработки сталей, применяемых при производстве продукции для уникальных проектов нефте- и газопроводов (2018 год), звание Лауреата выставки «Металл-Экспо» и Лауреата конкурса «Молодые учёные» выставки «Металл-Экспо» (2014, 2015, 2016, 2017 и 2021 гг.), звание Лауреата премии имени И.П. Кулибина Министерства промышленности, торговли и предпринимательства Нижегородской области за лучшие изобретения (2021 и 2024 гг.).

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.5.7 по следующим направлениям исследований: установление закономерностей деформирования материалов и повышения их качества при различных термомеханических режимах (пункт 1 паспорта) – что реализовано в виде количественных критериев рекристаллизации аустенита, новых технологических схем термомеханической обработки и математических моделей; исследование комплексных процессов, совмещающих непрерывное литьё и прокатку (пункт 2) – на примере литейно-прокатных комплексов различных конфигураций; теория нагрева и конструкции установок нагрева заготовок (пункт 3) – выполнены конечно-элементные расчёты индукционного нагрева и охлаждения рулонов, разработаны конструкции термоса для замедленного охлаждения; оптимизация конструкций прокатных машин и их взаимосвязь со средствами автоматизации (пункт 4) – даны рекомендации по модернизации оборудования ЛПК.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 48 публикациях, из которых 2 монографии, 28 публикаций в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, общим объёмом 62,4 п.л., получено 6 патентов на изобретения РФ.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 302 страницах машинописного текста, состоит из введения, шести глав, заключения, содержит 18 таблиц, 193 рисунка и список литературы из 300 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность, поставлена цель и сформулированы задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В главе 1 проведён анализ оборудования литейно-прокатных комплексов, установленных в мире в период с 1989 по 2025 гг., а также выявлены особенности технологии производства различной продукции на них.

Первый ЛПК по производству стальной полосы запущен в 1989 году и имел в своём составе только чистовую группу из четырёх клетей. Применение тонкого сляба (50 мм) позволяло за минимальное количество проходов получать готовую полосу небольшой толщины (2-6 мм) из рядовых марок стали с высоким качеством. Стоит отметить, что первоначальной идеей создания ЛПК являлось экономичное производство простейшего сортамента (сравнительно тонкого, без дополнительных требований по механическим свойствам). Однако подтверждённые преимущества совмещённого процесса подтолкнули производителей к разработке технологии производства на ЛПК более сложных продуктов. Одним из примеров является производство толстых (10, 12 и даже до 16 мм) полос и листов для нефтегазопроводных труб с дополнительными требованиями по хладостойкости. Достаточно быстро стало понятно, что качественная прокатка таких полос из сляба толщиной 50 мм и только одной группой клетей невозможна, поэтому производители оборудования пошли навстречу металлургическим компаниям и начали разрабатывать и внедрять новые конфигурации ЛПК, а также предлагать варианты реализации технологии прокатки данного сортамента на ЛПК с одной группой клетей. Одним из основных изменений стало добавление черновых клетей. Рассматривались и внедрялись несколько вариантов: одна, две и три черновые клети. При этом литературные данные об эффективности того или иного варианта разнятся, существуют мнения как о более высокой эффективности применения двух клетей по сравнению с одной, так и об обратном. Введение трёх черновых клетей осуществлено на комплексах бесконечной прокатки в первую очередь для повышения качества тонкой полосы, однако вопрос применения трёх черновых обжатий может быть актуален и для прокатки толстой полосы.

Одной из тенденций развития ЛПК является увеличение толщины сляба. Если на первых комплексах старались приблизить толщину сляба к толщине полосы, то сейчас производители стараются найти оптимум с точки зрения производства различного сортамента продукции, а также производительности комплекса. Минимальная толщина сляба, которую целесообразно рассматривать для прокатки толстой полосы – 70 мм. Немало комплексов могут производить сляб толщиной 90 мм, а новые ЛПК – до 110 мм и 130 мм, что позволяет увеличить производительность и суммарное обжатие. На Рисунке 1 приведены примеры ЛПК: с одной группой клетей для производства рядового сортамента, с выделенной черновой группой для реализации контролируемой прокатки и комплекс бесконечной прокатки, наиболее подходящий для производства тонкой полосы. Развитие ЛПК можно представить в виде поколений.

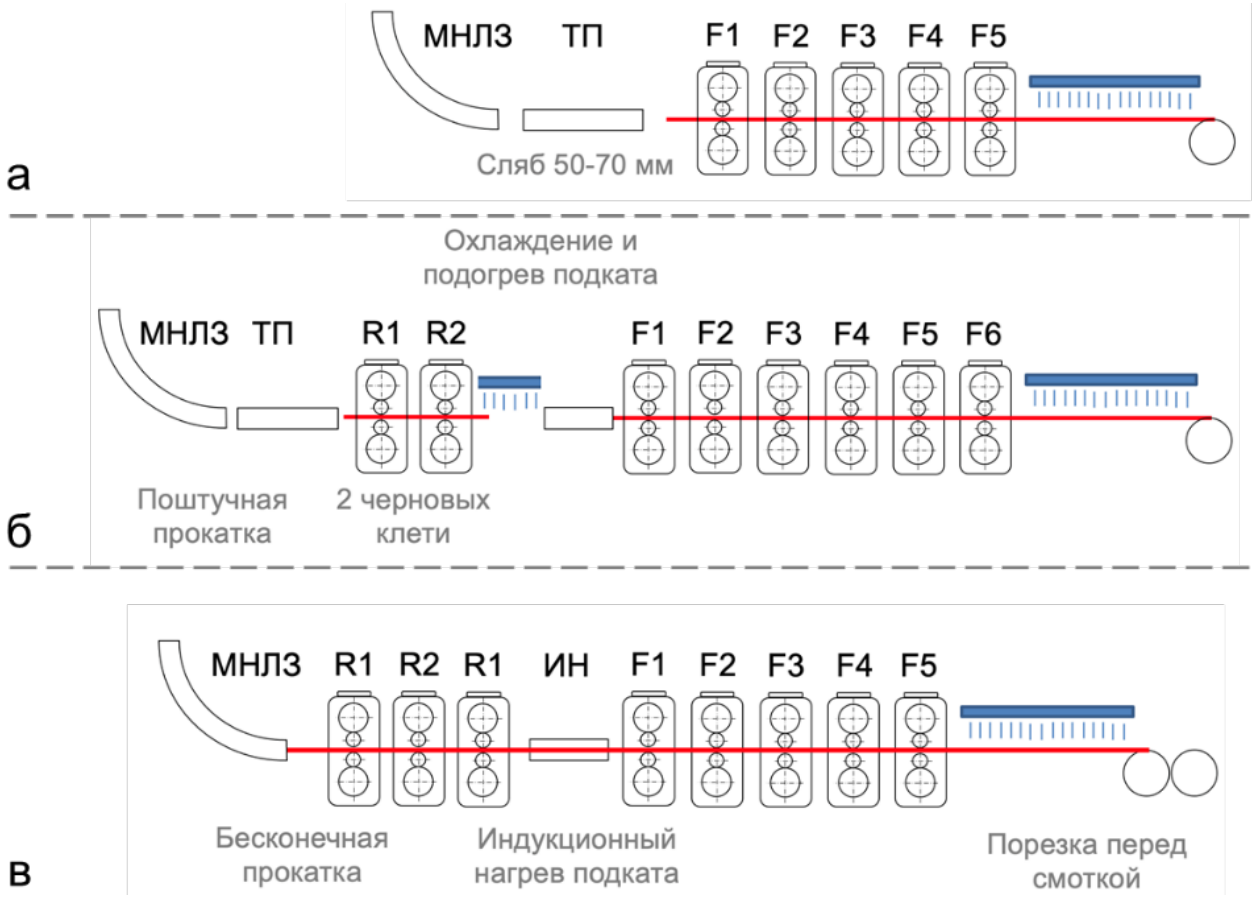


Рисунок 1 – Примеры компоновочных решений ЛПК: а) с одной группой клетей, б) с выделенной черновой группой, в) бесконечная прокатка

Первое поколение литейно-прокатных комплексов реализует прокатку штучными слябами: после разливки на тонкослябовой МНЛЗ заготовки толщиной 50–70 мм режут на мерные длины и последовательно задают в стан, что позволяет выпускать рядовую полосу толщиной 2–6 мм. К усовершенствованному первому поколению (I+) относится комплекс Выксунского завода ОМК, где толщину сляба увеличили до 90–110 мм и добавили черновые клети, благодаря чему стало возможным производство более толстых полос (до 12,7 мм) и хладостойких трубных марок для арктического применения. Второе поколение — полубесконечный процесс: из МНЛЗ выходит длинный сляб (до 200–300 м), который без порезки поступает в стан, а резка на мерные длины выполняется только перед моталкой. Такая схема уменьшает число захватов и выходов полосы из валков, что повышает качество проката толщиной менее 2 мм и позволяет достигать значений 0,77 мм, как на линиях Masteel и Lysteel. Третье поколение — бесконечное производство, где сляб вообще не режут, а прокатывают при низкой скорости, что даёт возможность стабильно выпускать сверхтонкую полосу 0,8 мм (первые промышленные решения Primetals Technologies, 2009 г.) и увеличить выход годного за счёт отсутствия головной и концевой обрези. Усовершенствованное третье поколение (III+) представляют универсальные комплексы типа DUE компании Danieli: они позволяют выбирать как бесконечный режим, так и режим работы штучными слябами, а при толщине сляба до 110 мм — производить полосы от 0,8 до 16 мм, что реализовано на заводах Shougang и Yukun в Китае.

Анализ мирового опыта производства проката на ЛПК позволил выделить семь сортаментных групп, производство которых наиболее востребовано и имеет технологические особенности, влияющие на состав оборудования:

1. Рядовые низкоуглеродистые кремнемарганцевые стали с содержанием легирующих элементов до 0,7% и углерода до 0,2%. Толщина проката 2-6 мм.
2. Тонкие широкие полосы из низкоуглеродистых мягких сталей толщиной от 0,8 до 2 мм.
3. Прокат из хладостойких сталей толщиной от 6 до 16 мм. Это стали для труб категории прочности до К60 (Х70) и аналогичные для других применений;
4. Высокопрочные стали для машиностроения, класс прочности этих сталей выше по сравнению с предыдущей группой при сохранении требований к ударной вязкости. Используются для силовых элементов спецтехники.
5. Двух- и многофазные стали применяются для автомобильных компонентов благодаря своему удельному весу, высокому пределу текучести и прочности на разрыв, высокой степени деформационного упрочнения.
6. Среднеуглеродистые марки стали с содержанием углерода более 0,20% обычно легируются примерно 1% марганца, кремнием и могут дополнительно содержать хром, никель, медь и микролегирующие элементы.
7. Микролегированные бором стали характеризуются высокой прокаливаемостью и прочностью, несмотря на относительно низкое содержание легирующих элементов, с содержанием бора 0,002-0,006% по массе.

В работе предложен методический подход, применяемый для каждой сортаментной группы: от требований к продукции, через ключевые показатели, обеспечивающие требования, затем через технологию прокатки к рациональной конфигурации оборудования (Рисунок 2).



Рисунок 2 – Предложенный подход к выбору рациональной конфигурации оборудования прокатных станов ЛПК

В главе 2 описаны материалы, исследованные в диссертационной работе, а также раскрыты классические и современные методы исследования технологии прокатки применительно к ЛПК и настоящей работе. Рассмотрено более 30 химических составов сталей, основные составы приведены в Таблице 1.

В работе применены современные методы исследования. В частности, конечно-элементное моделирование деформации в Q-Form, индукционного нагрева в ELTA, охлаждения рулонов в Ansys. Для обработки результатов промышленных экспериментов использованы подходы продвинутого статистического анализа, производственные базы данных Oracle, MSSQL, создание нейросетевых моделей с помощью языка Python.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых сталей (массовая доля, %)

Сортаментная группа	**Марка стали**	**C**	**Si**	**Mn**	**Cr**	**Ni**	**Cu**	**Al**	**Nb**	**V**	**Ti**	**B**
Рядовая низкоуглеродистая Si-Mn сталь	10	0,06	0,21	0,41	0,10	-	0,15	0,035	-	-	-	-
	20	0,17	0,23	0,50	0,11	-	0,12	0,033	-	-	-	-
	Ст3сп	0,15	0,17	0,45	0,12	-	0,13	0,037	-	-	-	-
Тонкий рулонный прокат	Ст2пс	0,15	0,11	0,32	0,14	-	0,16	0,034	-	-	-	-
	08пс	0,05	0,12	0,37	0,09	-	0,14	0,035	-	-	-	-
Хладостойкий прокат для труб и конструкций	06ГБ	0,06	0,24	1,35	-	-	0,15	0,036	0,05	-	-	-
	06ГФ	0,06	0,23	1,05	-	-	0,14	0,036	-	0,15	-	-
	06ГФБТ	0,06	0,27	1,40	-	-	0,13	0,032	0,05	0,10	0,09	-
Высокопрочные микролегированные стали	S500MC	0,06	0,20	1,55	-	-	0,17	0,030	0,05	-	0,09	-
	S600MC	0,06	0,25	1,62	-	-	0,13	0,031	0,07	-	0,10	-
	S700MC	0,06	0,22	1,79	-	0,18	0,16	0,035	0,06	-	0,17	-
Двухфазные, многофазные	DP600	0,06	0,09	1,19	0,47	-	0,15	0,036	-	-	-	-
	DP1000	0,17	0,35	1,88	0,49	-	0,12	0,037	-	-	0,05	-
Среднеуглеродистые марки стали	22ГЮ	0,20	0,24	1,21	-	-	0,15	0,034	-	-	-	-
	30Г	0,31	0,26	1,22	-	-	0,14	0,034	-	-	-	-
	50Г	0,50	0,21	1,05	0,11	0,05	0,17	0,036	-	-	-	-
Микролегированные бором стали	22MnB5	0,20	0,27	1,24	-	-	0,15	0,032	-	-	0,03	0,003
	34MnB5	0,34	0,25	1,20	-	-	0,14	0,031	-	-	0,03	0,004

Физическое моделирование проводили на установке Gleeble 3800: исследование реологических свойств (в диапазоне температур горячей прокатки 750-1150ºС при скоростях деформации от 0,1 до 10 $с^{-1}$) и рекристаллизации (использовали метод двойного сжатия, определяя степень разупрочнения после второй деформации через 1-100 с), горячую пластичность определяли при растяжении цилиндрических образцов. На деформационном дилатометре DIL 805A/D: строили термокинетические диаграммы распада деформированного аустенита при скоростях охлаждения от 0,5 до 80 ºС/с. Предложен и реализован подход к имитации реального режима охлаждения на отводящем рольганге.

Для воспроизведения процесса использовали лабораторный стан ДУО-300, прокатывали заготовки размерами до 90×100×150 мм в полосы толщиной 8-20 мм. Промышленные эксперименты проводили на ЛПК Выксунского завода ОМК. Определение механических свойств и исследование микроструктуры проводили стандартными методиками. Всё это образует единую методическую основу. Она позволяет, с одной стороны, выявить закономерности структурообразования и сопротивления деформации, а с другой — получить количественные критерии и математические модели, которые используются при выборе конфигурации стана и при разработке технологических схем для каждой сортаментной группы.

Логика последующих трёх глав подчинена единому принципу: для каждой из семи сортаментных групп (выделенных в главе 1) последовательно

анализируются критические технологические факторы, которые затем трансформируются в требования к составу оборудования по методике главы 6. В главе 3 рассмотрены рядовые и тонкие полосы (группы 1–2), где определяющими являются инженерные модели (трение, износ, нагрев). В главе 4 – хладостойкие, высокопрочные и двухфазные стали (группы 3–5), где ключевую роль играет управление рекристаллизацией и фазовыми превращениями. В главе 5 – среднеуглеродистые и борсодержащие стали (группы 6–7), для которых критичны горячая пластичность и условия охлаждения.

В главе 3 исследованы основные особенности процесса прокатки на ЛПК при производстве тонких полос и полос из рядовых низкоуглеродистых сталей.

Рядовые низкоуглеродистые кремнемарганцевые стали включают марки с содержанием легирующих элементов не более 0,7% и углерода до 0,2%. Обычная толщина проката от 2 до 6 мм. Такую продукцию можно производить серийно без ограничений на всех существующих комплексах.

У ЛПК есть важные отличия по сравнению с традиционными широкополосными станами – литая структура сляба. Проведённые исследования показывают, что структура сляба характеризуется неравномерным распределением размеров зерен аустенита, которые варьируются от 300 мкм до 2000 мкм (отдельные зерна могут достигать 5000 мкм), средний размер зерна составляет около 500 мкм. Размер зерна слабо зависит от химического состава стали. Если эти зерна недостаточно измельчены при термомеханической обработке, в прокате могут образовываться крупные бейнитные области размером 300-500 мкм, что существенно снижает ударную вязкость (Рисунок 3).

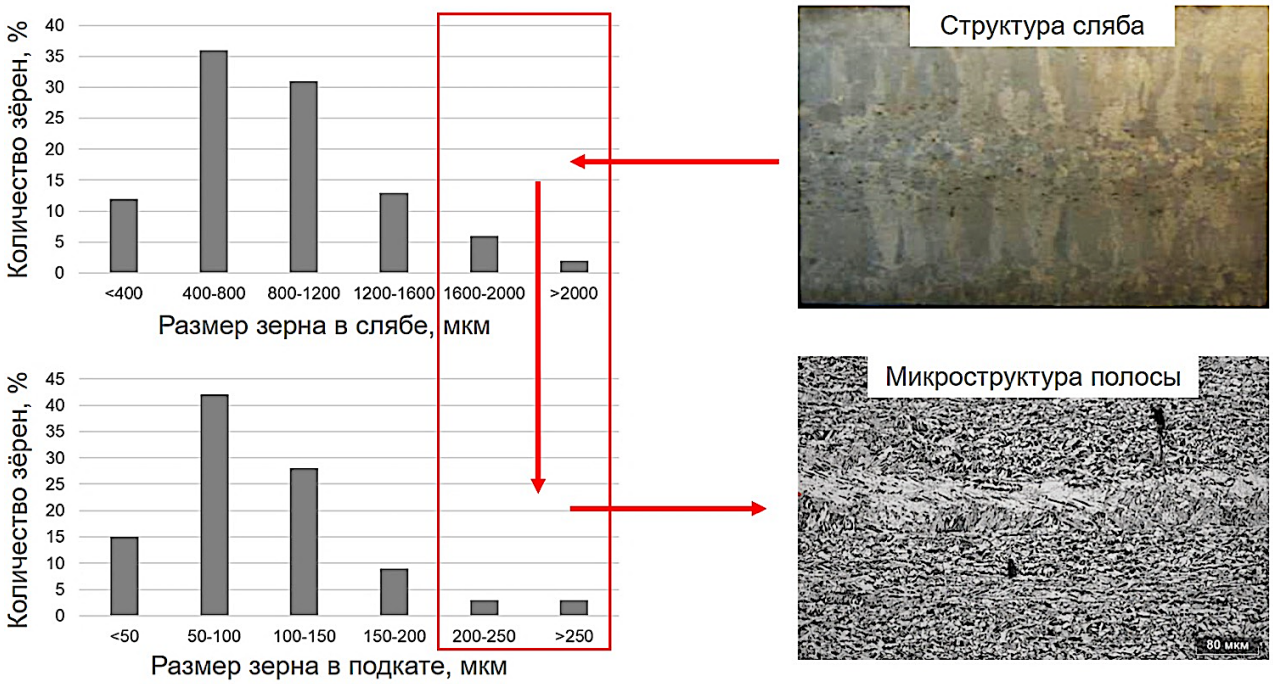


Рисунок 3 – Эволюция структуры при производстве на ЛПК

Для полос толщиной 2-6 мм наличие в структуре крупных зерен не оказывает существенного влияния на свойства. Можно использовать свободную прокатку (arbitrary rolling), то есть нет необходимости контролировать размер

зерна аустенита в каждом проходе. При повышенных требованиях к хладостойкости и для толщин от 10 мм, можно применять рекристаллизационную прокатку (подробнее описано в главе 4).

Тонкие полосы из низкоуглеродистых мягких сталей производятся толщиной от 0,8 до 2 мм. Требования к механическим свойствам могут быть выполнены при свободной прокатке. Ключевыми факторами для выполнения геометрических требований являются точность расчета энергосиловых параметров и равномерность параметров прокатки, особенно температуры по длине. Критическими зонами являются концы полос, поэтому бесконечное производство имеет преимущество перед дискретной задачей слябов. Равномерность температуры в дискретных процессах обеспечивается проходными печами (подогреваемыми рольгангами).

Проведены исследования реологических свойств стали с содержанием углерода 0,05% и 0,15% при сжатии, растяжении и при лабораторной прокатке. Разработана модель (1) сопротивления деформации, которая учитывает взаимное влияние параметров деформации на коэффициенты модели.

$$\sigma_{sm} = \sigma_{ref}\left(\left(\sigma_1 \cdot \frac{T}{T_{ref}} + \sigma_2\right) + \left(A_1 \cdot \frac{T}{T_{ref}} + A_2\right) \cdot e^{\frac{-\varepsilon/\varepsilon_{ref}}{b_1 \cdot T/T_{ref} + b_2}}\right) \cdot e^{c \cdot \frac{T}{T_{ref}}} \cdot \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{ref}}\right)^{m_1 \cdot \frac{T}{T_{ref}} + m_2} \qquad (1)$$

где: T – среднемассовая температура деформации, ºС; ε – логарифмическая степень деформации; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации, с$^{-1}$; $\varepsilon_{ref} = 0{,}2$, $\dot{\varepsilon}_{ref} = 10$ с$^{-1}$, $T_{ref} = 900$ ºС, $\sigma_{ref} = 122$ МПа – референтные значения параметров деформации; σ_1, σ_2, A_1, A_2, b_1, b_2, c, m_1, m_2 – коэффициенты модели (Таблица 2).

Таблица 2 – Термомеханические коэффициенты для стали Ст2пс/08пс

Содержание углерода	σ_1	σ_2	A_1	A_2	b_1	b_2	c	m_1	m_2
0,05%	-4,20	12,91	5,51	-11,48	-1,23	2,19	-2,016	0,090	0,002
0,15%	-4,33	12,86	5,02	-11,28	-1,46	2,60	-1,765	0,196	-0,125

Предложен алгоритм определения коэффициента трения через опережение (Рисунок 4, б) при установившемся процессе прокатки с использованием фактических измерений на промышленном стане. Получено более 100 000 экспериментальных значений. Определены значения коэффициента трения, которые находятся в диапазоне 0,12-0,32 для тонких полос (Рисунок 4, а). Предложена новая формула для отношения коэффициента трения при захвате к коэффициенту при установившемся процессе для непрерывных полосовых станов в зависимости от окружной скорости вращения валка ($V_{\text{В}}$):

$$\frac{\mu_{\text{зах}}}{\mu_{\text{уст}}} = 1{,}5 \cdot V_{\text{В}}^{0{,}25} \qquad (2)$$

С использованием методов машинного обучения разработана модель износа рабочих валков чистовой группы клетей в 300 точках по длине (Рисунок 4, в). Входные переменные подвергались статистической нормализации, чтобы привести данные к единому диапазону значений. При обучении использовали

метод разделения генеральной совокупности на обучающую и тестовую в пропорции 80/20, что позволяет объективно оценить эффективность каждой модели. По завершении обучения модели проверены на тестовой выборке. Максимальная точность достигнута при применении градиентного бустинга с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,77$ и средней абсолютной ошибкой MAE = 0,02 мм. Наибольший износ наблюдается при прокатке полос шириной менее 1300 мм и абсолютных обжатиях в диапазоне 2-4 мм. Также анализ фактических данных позволил определить диапазон значений усилия противоизгибов валков 1800-2400 КН, при которых возникают условия повышенного износа.

С помощью конечно-разностной схемы решения уравнения теплопроводности разработана модель термического расширения валков стана в процессе эксплуатации, учитывающая стадии охлаждения и нагрева металла за один оборот валка и за кампанию. Средняя абсолютная ошибка по температуре составляет 1,5 °С, что позволяет добиться среднего отклонения расчета термического расширения по диаметру рабочего валка не более чем 0,014 мм.

Для производства бесконечной полосы есть дополнительная возможность – индукционный нагрев подката, который нашёл применение в промышленных условиях. Проведены конечно-элементные расчеты для подката толщиной 20 мм (Рисунок 5, б). Определено, что для нагрева на 250°С необходимо 8 секций. Получены графики средней и поверхностной температур (Рисунок 5, а). Разработана конструкция устройства индукционного нагрева (Рисунок 5, в).

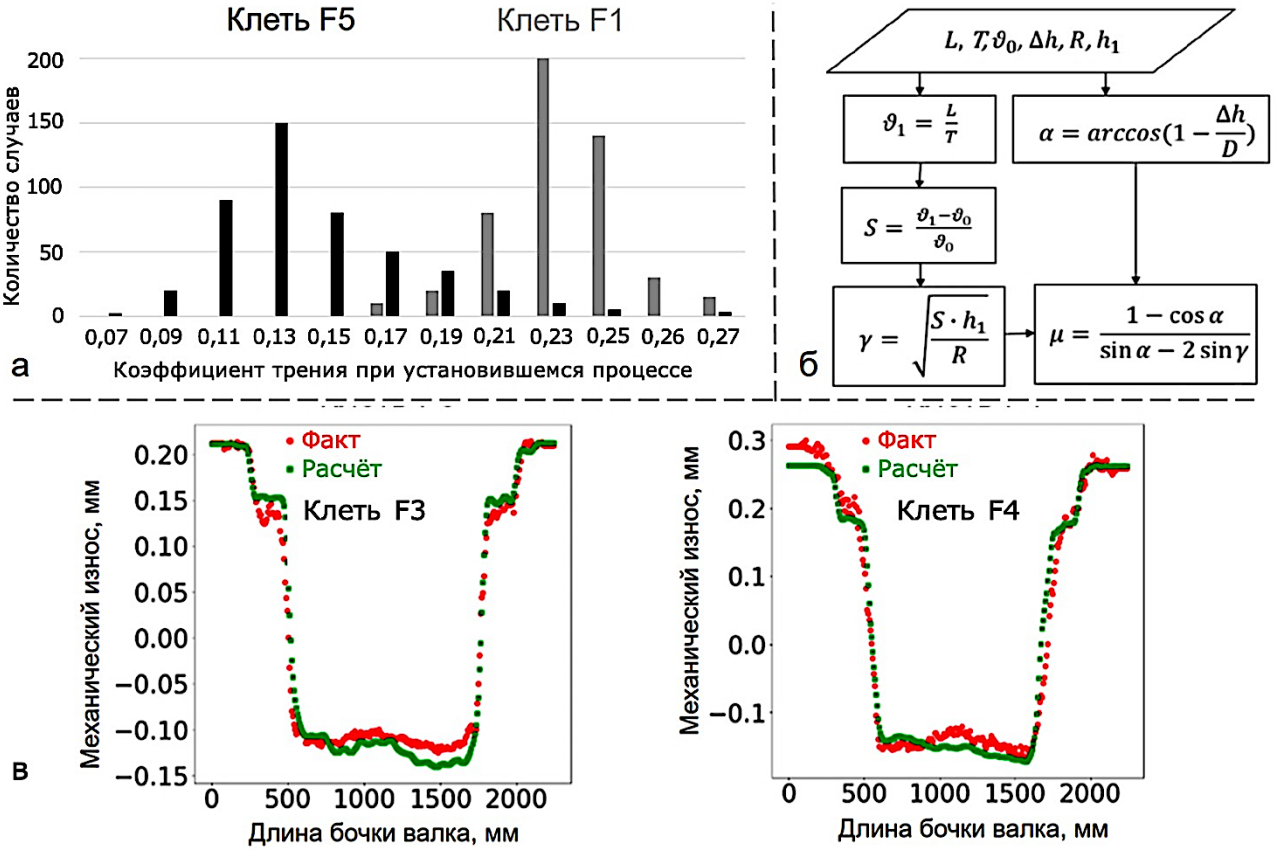


Рисунок 4 – Обработка больших данных для решения технологических задач: а) коэффициент трения при установившемся процессе; б) методика определения коэффициента трения; в) фактический и расчётный механический износ валков

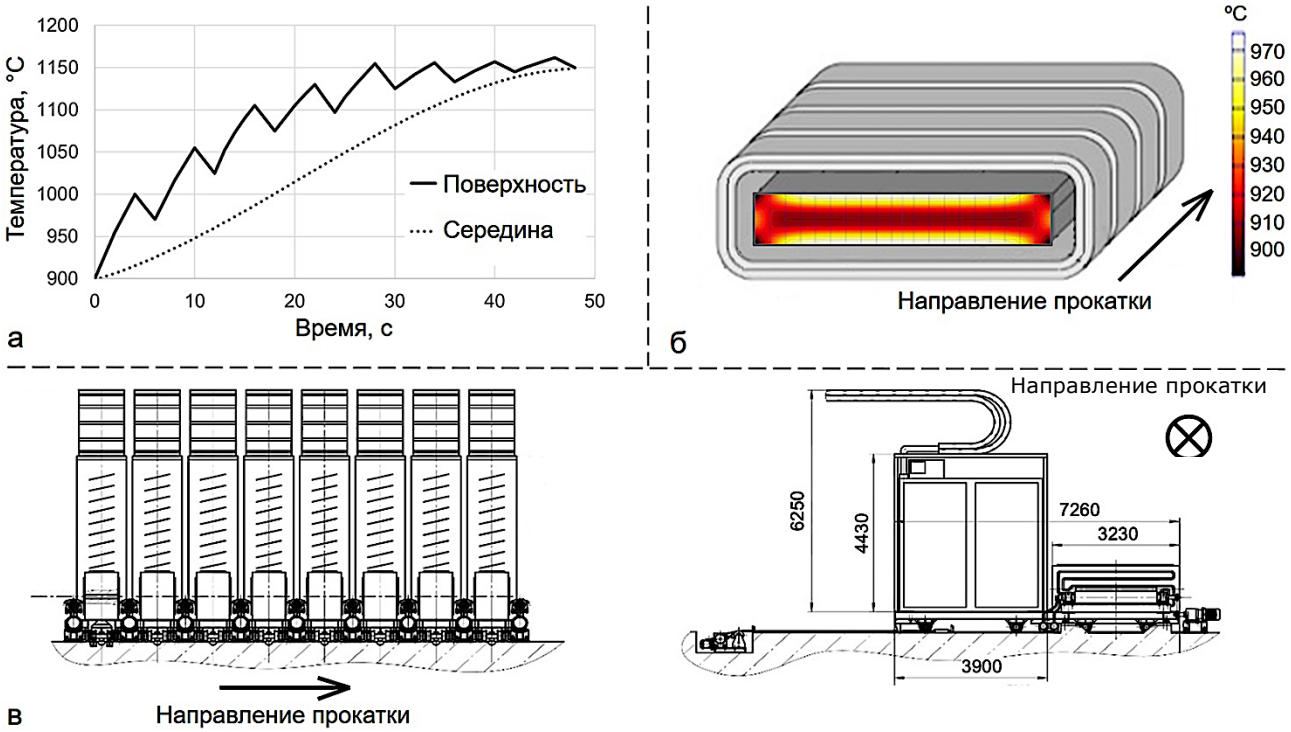


Рисунок 5 – Применение индукционного нагрева промежуточного подката: а) график нагрева поверхности и середины подката; б) распределение температуры по сечению подката; в) конструкция нагревательного устройства

В главе 4 исследована технология производства на ЛПК высокопрочного и хладостойкого проката из низкоуглеродистых микролегированных сталей.

Полосовой прокат из хладостойких сталей толщиной от 6 до 16 мм является сложным продуктом для производства на ЛПК. К ним относятся стали для труб категории прочности до К60 и аналогичные для других применений. Особенностью являются высокие требования к вязкости при низких температурах. Для трубных сталей проводятся испытания падающим грузом.

На основе исследований сформулирована базовая концепция химического состава: использование низкого содержания углерода (0,04-0,07%) и минимально необходимого содержания марганца без добавок хрома, никеля и меди, микролегирование только ниобием. Возможно дополнительное микролегирование титаном. Рекомендуемое содержание легирующих и микролегирующих элементов для комплексов с выделенной черновой группой клетей с учётом заданного уровня прочности описано с помощью уравнения (3).

$$(Si + Mn + 10 \cdot Nb) = (0{,}0078 \cdot \sigma_{в} - 2{,}35 + 300 \cdot Ti^2 + 17 \cdot Ti) \pm 0{,}2 \qquad (3)$$

где Si, Mn, Nb, Ti - содержание в стали кремния, марганца, ниобия и титана (в мас. %); $\sigma_{В}$ - заданное значение временного сопротивления разрыву проката, представляющее собой число из ряда чисел от минимального до максимального нормированного значения временного сопротивления разрыву проката (в МПа).

На станах с повторным нагревом слябов распространено использование контролируемой прокатки, важным аспектом которой является управление рекристаллизацией. Для ЛПК получены результаты исследования рекристаллизации трубной стали (К60) с 0,05% ниобия для конфигурации стана

2 черновых + 6 чистовых клетей. Исследовалась рекристаллизация литой структуры как для среднего, так и максимального размера зерна (Рисунок 6).

Получено уравнение для толщины подката, обеспечивающего баланс между измельчением зерна в черновой стадии и наклёпом аустенитного зерна в чистовой стадии прокатки (4). Также установлена рекомендуемая температура начала чистовой прокатки, обеспечивающая отсутствие рекристаллизации (5).

$$\sum \varepsilon_{\text{чист}} / \sum \varepsilon_{\text{черн}} = 1{,}23 \div 1{,}57 \qquad (4)$$

$\sum \varepsilon_{\text{чист}}$ – суммарное относительное обжатие промежуточного подката при его прокатке в чистовой группе клетей стана (в %); $\sum \varepsilon_{\text{черн}}$ – суммарное относительное обжатие сляба при прокатке в черновой группе клетей стана (в %).

$$\mathrm{T}_{\text{нач.чист}} = 1117 Nb^{0{,}073} \pm 20 \qquad (5)$$

где Nb -содержание ниобия в стали, из которой получают сляб (в мас. %).

Предложены критерии для сравнения эффективности технологических режимов прокатки и различных конфигураций станов ЛПК с точки зрения производства проката с требованиями по хладостойкости:

1. Обеспечение полной статической рекристаллизации в черновой стадии прокатки, в том числе крупных исходных зёрен (на Рисунке 6 обозначен R);

2. Отсутствие рекристаллизации в чистовой стадии прокатки (F);

3. Минимально возможный эффективный средний размер зерна аустенита после чистовой стадии $D_{\gamma}^{\text{эфф}}$ (на Рисунке 6 – D).

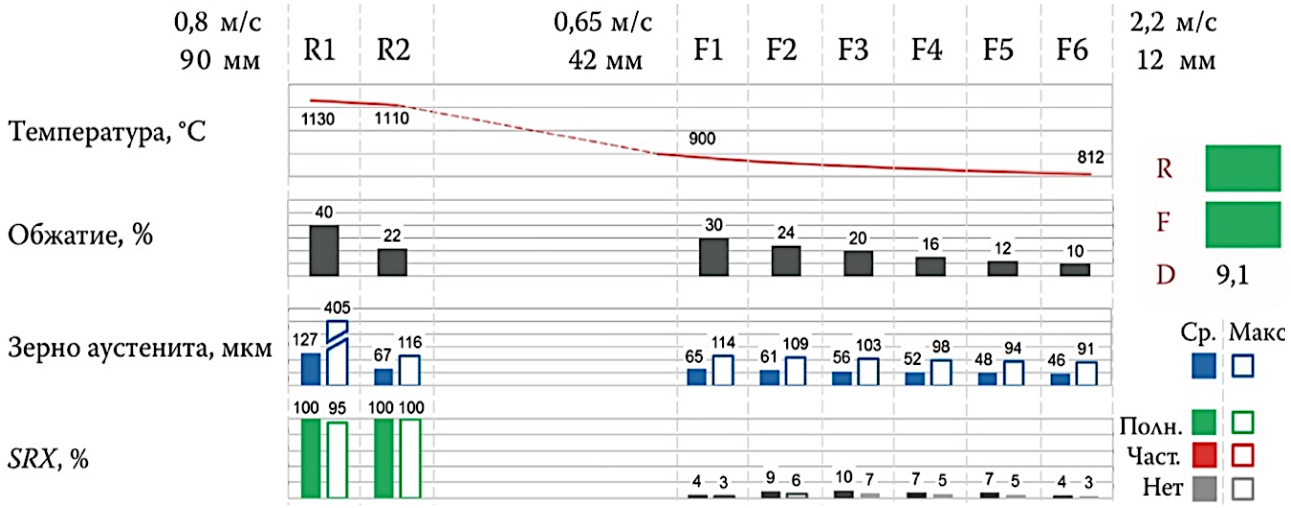


Рисунок 6 – Расчёт рекристаллизации при контролируемой прокатке на ЛПК с конфигурацией 2 черновых + 6 чистовых клетей

В Таблице 3 приведены результаты исследования рекристаллизации для наиболее представительных конфигураций. Конфигурация 2 черновых + 6 чистовых клетей отвечает принципам контролируемой прокатки и достигается достаточно маленький эффективный размер зерна после чистовой прокатки (7,6-9,1 мкм). Конфигурация 3 черновых + 5 чистовых позволяет достичь меньших размеров зерна, однако соблюдение первых двух критериев достигается в очень

узком диапазоне технологических параметров. Чистовая прокатка без рекристаллизации достигается за счет охлаждения подката водой.

Таблица 3 – Значения критериев для каждого варианта конфигурации ЛПК

№	Конфигурация (толщина сляба)	$D_\gamma^{черн}$, мкм	R	F	$D_\gamma^{эфф}$, мкм
1	0R+7F (70 мм)	-	Нет	Нет	-
2	0R+1F+4F (70 мм)	126	Да	Да	17.4
3	0R+2F+3F (70 мм)	42	Да	Да	9.6
4	1R+6F (70 мм)	127	Да	Да	17.4
5	1R+6F (90 мм)	110	Да	Да	15.1
6	2R+6F (90 мм)	67	Да	Да	9.1
7	2R+6F (110 мм)	55	Да	Да	7.6
8	3R+5F Бесконечная (90 мм)	55	Да	Нет	-
9	3R+5F Партия (90 мм)	59	Нет	Да	-
10	3R+5F Партия (110мм)	31	Да	Да	4.8

Другим вариантом получения хладостойкой продукции является рекристаллизационная прокатка (полная рекристаллизацию в каждом проходе). Тогда возможно производить хладостойкую полосу на ЛПК без черновой группы клетей. Рекристаллизационная прокатка позволяет достичь размера зерна перед охлаждением эквивалентного эффективному размеру зерна, полученному при контролируемой прокатке 8-9 мкм (Рисунок 7). Микролегирование ванадием до 0,1% является рациональным при рекристаллизационной прокатке, т.к. не сдерживает процессы рекристаллизации как ниобий, но способствует образованию дисперсных частиц для повышения механических свойств в рулонном прокате. Дополнительный положительный эффект получен при использовании рекристаллизационной прокатки с интенсивным охлаждением.

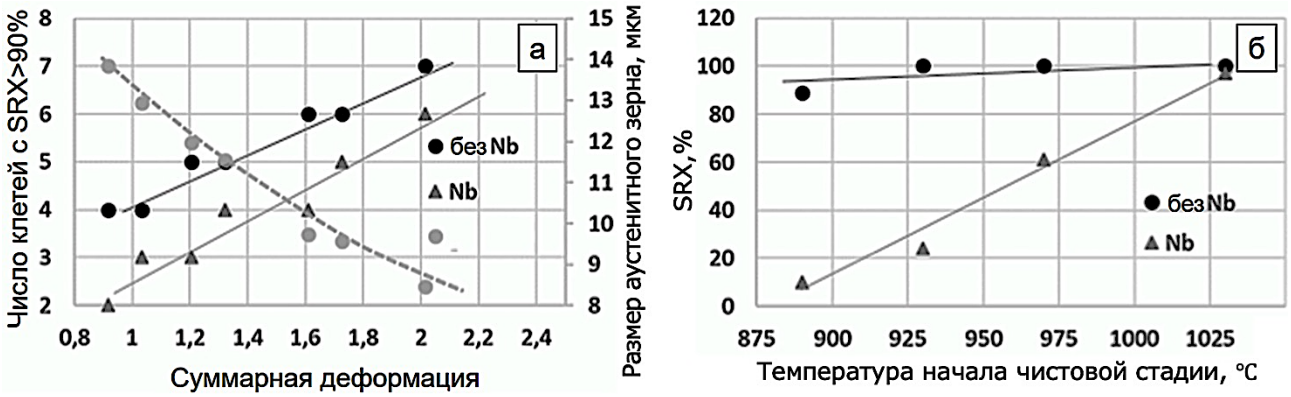


Рисунок 7 – Особенности реализации рекристаллизационной прокатки: а) влияние количества клетей и суммарной деформации сляб-полоса; б) влияние температуры начала чистовой прокатки на статическую рекристаллизацию для конфигурации 2 черновых+6 чистовых

Высокопрочные стали для машиностроения содержат микролегирующие добавки, однако класс прочности этих сталей выше по сравнению с предыдущей группой при сохранении требований к ударной вязкости. В частности, сталь категории S700MC и выше содержит больше легирующих элементов и титан в количестве 0,1-0,2%. Исследования реологических свойств показали, что они превосходят по уровню трубную сталь К60 на величину до 20%.

Важным аспектом для более эффективной технологии является достижение прочности за счёт последеформационного охлаждения. Термокинетическая диаграмма, построенная для стали S700MC, показывает, что рекомендуемые скорости охлаждения составляют более 40°С/с, что превышает возможности стандартного охлаждения. Разработана и применена в реальных промышленных условиях новая технология интенсивного охлаждения полос. Влияние интенсивного охлаждения исследовали с помощью дилатометра, имитирующего кривые охлаждения на отводящем рольганге. Выделено 5 участков (Рисунок 8, а): 1) воздушное охлаждение от клети до первого коллектора; 2) Основное водяное охлаждение; 3) Воздушное охлаждение после основных коллекторов; 4) Коллекторы доводки температуры; 5) Воздушное охлаждение перед моталкой.

Максимальная скорость интенсивного охлаждения на втором (основном) участке может достигать 140°С/с для толщины 2 мм и 60°С/с для толщины 12 мм (Рисунок 8, б). Получена номограмма зависимости прочностных свойств от условий охлаждения (Рисунок 8, в). Разработаны и испытаны в лабораторных и промышленных условиях новые секции интенсивного охлаждения (Рисунок 8, г), позволяющие увеличить средний коэффициент теплопередачи в 2 раза. Достигнута скорость охлаждения 65°С/с для полосы толщиной 12 мм.

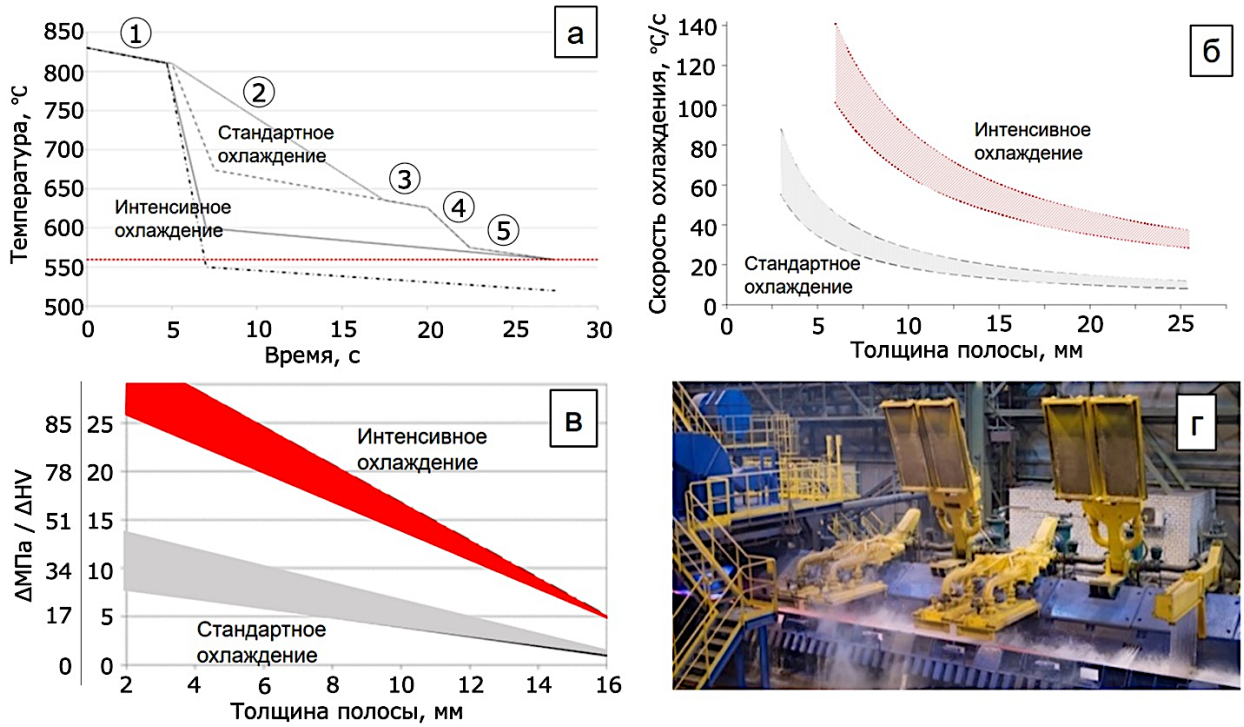


Рисунок 8 – Применение стандартного и интенсивного охлаждения полосы: а) сравнение кривых охлаждения; б) сравнение скоростей охлаждения; в) сравнение твёрдости и прочностных свойств полосы; г) внешний вид промышленной установки интенсивного охлаждения

Двухфазные и многофазные стали являются материалами для автомобильных компонентов благодаря своей легкости, высокому пределу текучести и прочности на разрыв, высокой степени деформационного упрочнения. Эти преимущества обусловлены их структурой, которая состоит из мягкой ферритной матрицы, содержащей мартенситные или бейнитные твердые фазы. Обычно используются толщины менее 4 мм. Однако аналоги двухфазных сталей также применяются при производстве труб с повышенными требованиями к отношению предела текучести к пределу прочности.

Исследованы реологические свойства сталей DP600, DP1000 и других из данной сортаментной группы, поскольку точное определение напряжения течения необходимо для выбора количества обжатий и клетей при производстве. Для достижения требуемой структуры предложено использование позднего или двухступенчатого охлаждения. Режим может включать начальное водяное охлаждение, паузу с воздушным охлаждением (для формирования ферритной матрицы), быстрое охлаждение до температуры смотки (Рисунок 9, а).

Моделирование режимов термомеханической обработки с поздним интенсивным охлаждением показало возможность формирования до 5% мартенситно-аустенитной составляющей в низкоуглеродистых сталях (Рисунок 9, г). Доля зависит от температуры остановки охлаждения и продолжительности паузы. Максимальное содержание достигается при температуре остановки охлаждения 200°С (Рисунок 9, б) и времени воздушной паузы 40 с (Рисунок 9, в).

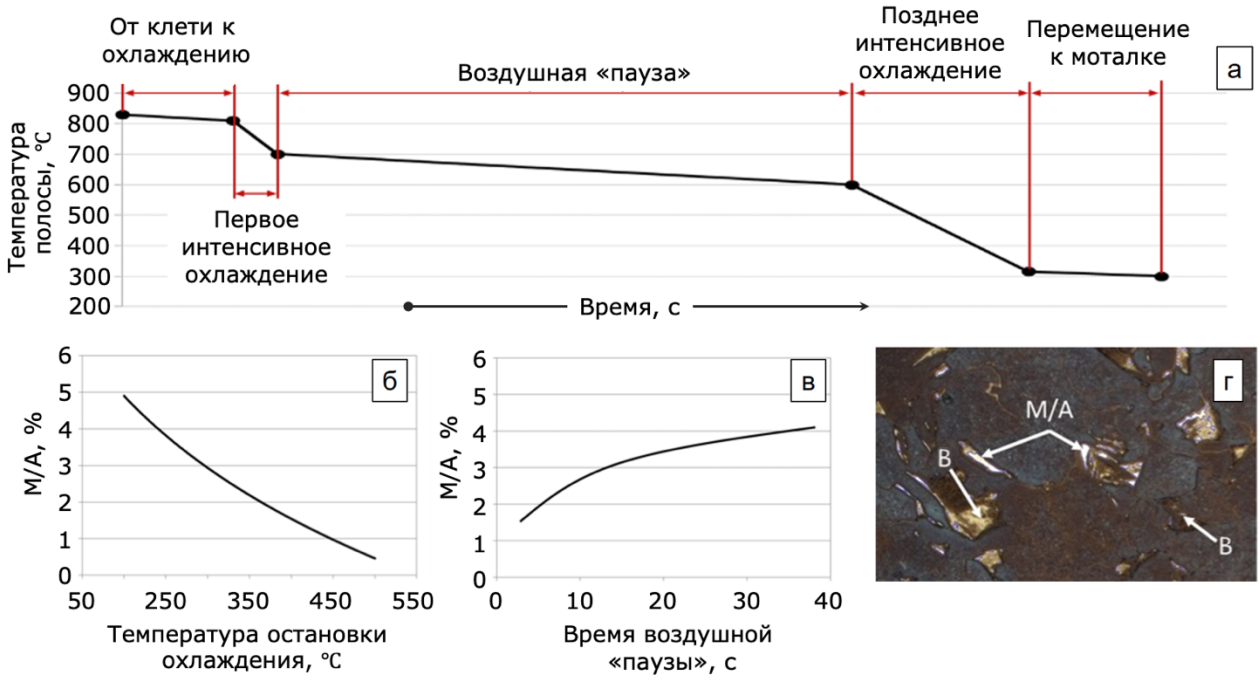


Рисунок 9 – Позднее интенсивное охлаждение полосы: а) кривая охлаждения полосы на отводящем рольганге; б) зависимость содержания M/A составляющей от температуры остановки охлаждения; в) зависимость содержания M/A составляющей от времени воздушной «паузы»; г) микроструктура с зафиксированной M/A составляющей

В главе 5 представлены результаты исследования вопросов прокатки на ЛПК полос из среднеуглеродистых и микролегированных бором сталей.

Среднеуглеродистые марки стали с содержанием углерода более 0,2% обычно легируются около 1% марганца, кремнием и могут содержать хром, никель, медь, микролегирующие элементы. Проведены исследования реологических свойств и фазовых превращений сталей с содержанием углерода до 0,5%. Для обеспечения бездефектного производства проведены исследования горячей пластичности с использованием Gleeble. Определены интервалы провала пластичности ниже 1000°C. В частности, для стали 30Г установлен глубокий провал пластичности (перепад относительного сужения ψ до 54%). Выполнено конечно-элементное моделирование для прокатки в эджере и двух черновых клетях. Определены параметры калибра с учетом перехода дефектов с кромки сляба на поверхность (Рисунок 10). Методом конечных элементов в QForm оптимизирована форма калибра эджера: симметричный выпуклый профиль с радиусом дна 90 мм, углом наклона полок 30° и высотой 110 мм. Промышленное внедрение калибровки позволило сократить длину контакта валка с поверхностью сляба с 50 до 20 мм, повысить стойкость валков до 500 тыс. тонн и значительно снизить количество прикромочных дефектов.

Проведены измерения температуры рулона при охлаждении, конечно-элементные расчеты (Рисунок 11, а, б) и исследования механических свойств по длине полосы (Рисунок 11, в). Показано, что время охлаждения внутренних слоев может отличаться от внешних в 3–10 раз, а разброс механических свойств может достигать 100 МПа. Разработана специальная промышленная установка для замедленного охлаждения (Рисунок 11, г). На стали с содержанием углерода 0,30% зону неравномерных механических свойств удалось сократить с 45 до 15 м, разброс предела текучести уменьшился с 60 до 30 МПа (Рисунок 11, в).

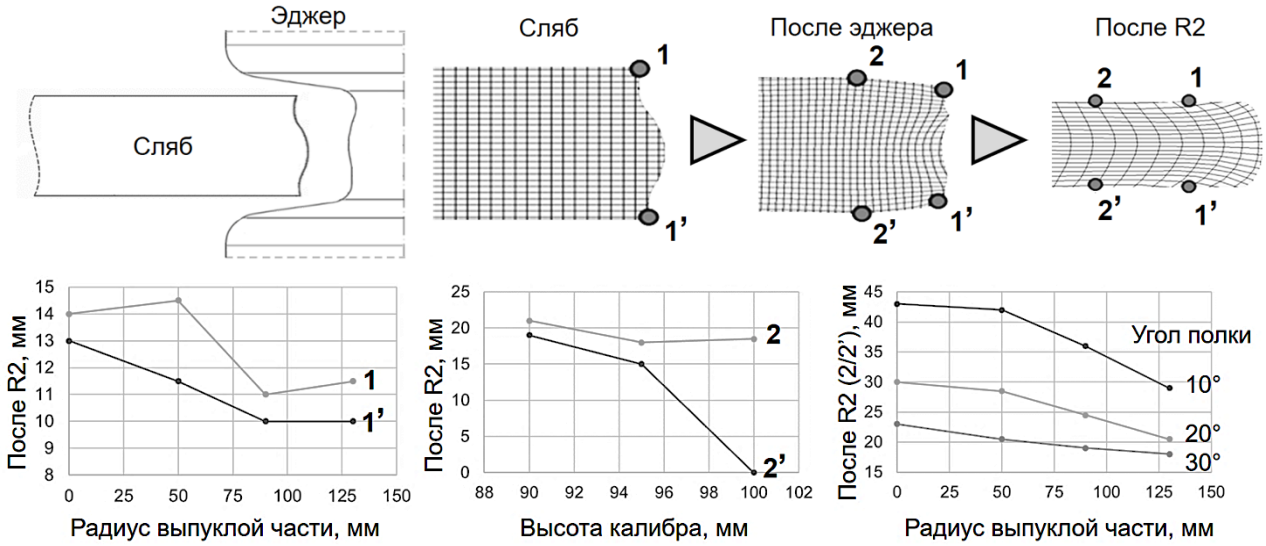


Рисунок 10 – Влияние параметров калибра эджера на форму боковой грани

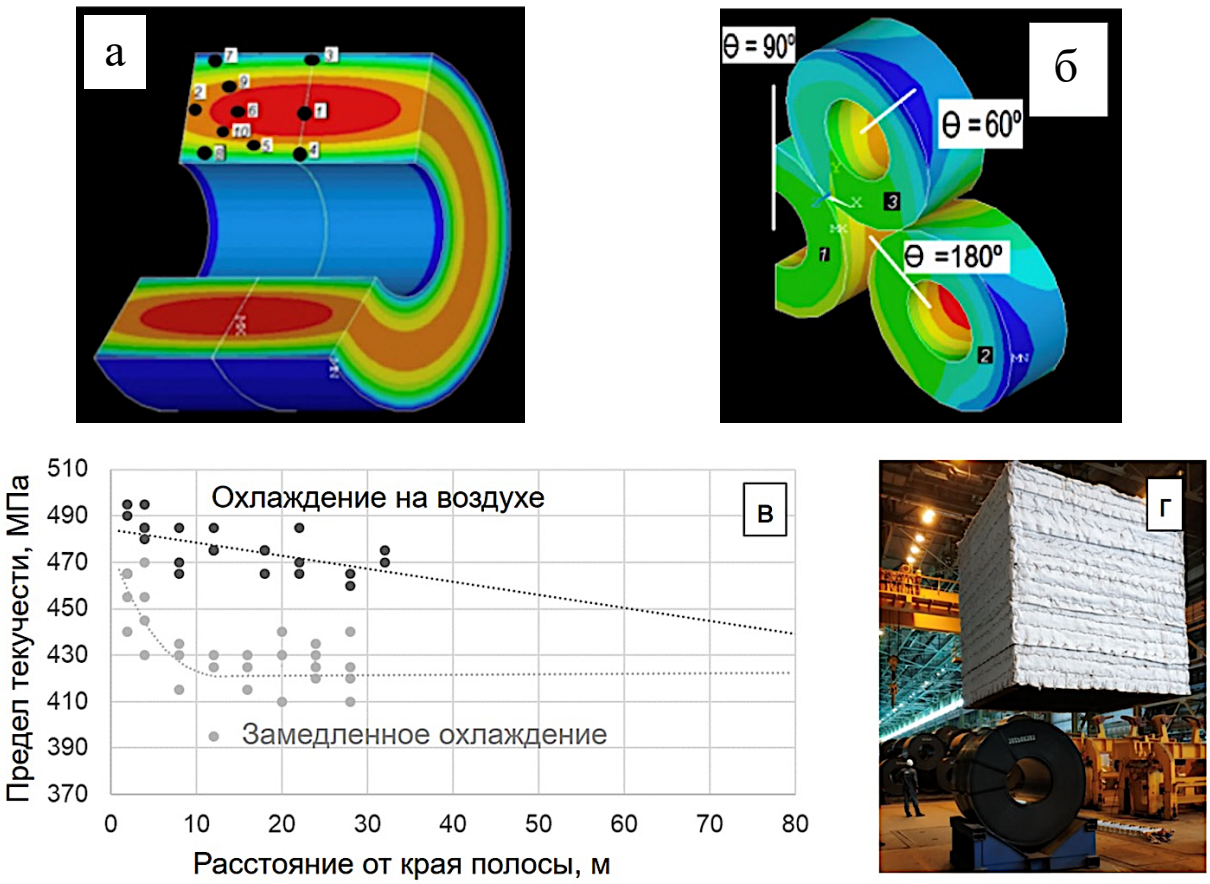


Рисунок 11 – Охлаждение рулонов на ЛПК: а) модель расчёта температуры рулона в разрезе; б) расчёт температуры рулонов, уложенных в два ряда; в) сравнение предела текучести при охлаждении на воздухе и замедленном охлаждении; г) термос для замедленного охлаждения рулона

Микролегированные бором стали характеризуются высокой прокаливаемостью и прочностью, несмотря на относительно низкое содержание легирующих элементов, с содержанием бора 0,002-0,006% по массе. Продукцию можно разделить на две основные категории: тонкий прокат (от 1,0 до 3,0 мм) для последующей холодной прокатки и/или штамповки для автомобильной промышленности и толстые полосы (до 12 мм), используемые в машиностроении и производстве электросварных труб. Общим требованием является достижение относительно низкой прочности (около 650 МПа) в полосе для облегчения дальнейшей обработки, а после закалки – предела прочности более 1000 МПа.

Реологические свойства микролегированной бором стали лишь незначительно отличаются от свойств аналогичных сталей без микролегирования, в пределах 5-7%. Для этих сталей не наблюдалось существенных нарушений пластичности. Исследования фазовых превращений показали смещение точки Ar_3 вниз на 30-40°C, а также увеличение доли бейнита и мартенсита. В ходе исследования изучена прокаливаемость сталей, микролегированных бором (Рисунок 12, а), и установлен режим термической обработки стали 22MnB5 для производства электросварных обсадных труб классов прочности Q125 и Q135 (Рисунок 12, б).

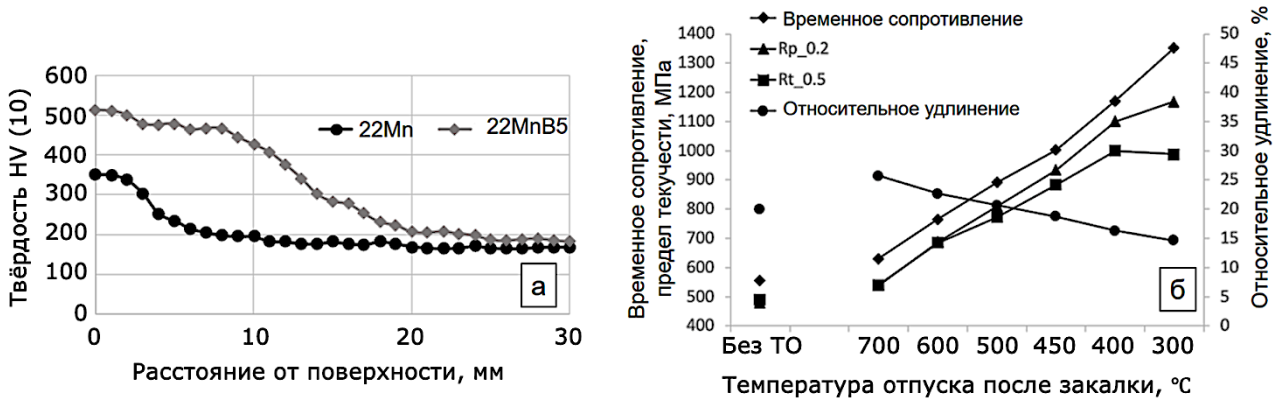


Рисунок 12 – Термическая обработка микролегированной бором стали: а) влияние добавок бора на прокаливаемость, б) влияние режимов отпуска на механические свойства при растяжении (сталь 22MnB5)

Глава 6 посвящена методике выбора состава оборудования прокатного стана ЛПК на основе технологических особенностей производства продукции. Представленные в главах 3–5 результаты для каждой сортаментной группы систематизированы в виде методики (Рисунок 13).

На первом шаге определяется способ задачи слябов (дискретно или в бесконечном режиме). Бесконечный режим эффективен при производстве полосы менее 2 мм, а также обеспечивает возможность изготовления полос менее 1 мм. В дискретном режиме производство тонких полос менее эффективно. В бесконечном режиме производство толстых полос сопряжено с очень низкой скоростью прокатки, а также большее значение может оказывать неравномерность температуры, структуры и свойств по толщине полосы.

На втором шаге требуется определить количество групп прокатных клетей (одна или две группы). Для бесконечной схемы задачи сляба возможен только вариант с двумя группами клетей, т.к. из-за медленной скорости прокатки требуется быстрый индукционный подогрев после нескольких проходов. При дискретной задаче возможно использование одной или двух групп клетей. Выбор осуществляется из необходимости полноценной реализации контролируемой прокатки (деление на две стадии) для обеспечения ударной вязкости и/или доли вязкой составляющей при ИПГ при отрицательных температурах.

На третьем шаге определяется толщина сляба. Для конфигураций с одной группой клетей целесообразно рассматривать малую толщину 50-70 мм для толщин полосы до 6 мм, а 70-90 для толщин полосы до 12 мм. Для конфигураций с двумя группами клетей уже целесообразно использование большей толщины с 70-90 мм и до 100-130 мм, если требуется производство толщин до 16 мм.

Далее на четвёртом шаге определяют количество клетей. Для станов с одной группой клетей количество определяется в первую очередь отношением толщины сляба к толщине полосы. При отсутствии необходимости прокатки полос менее 2 мм целесообразно стремиться к минимизации количества клетей (например, 0 черновых + 5 чистовых). Для станов с двумя группами клетей их суммарное количество также в первую очередь определяется максимальным отношением между толщиной сляба и минимальной толщиной полосы. При этом

применение двух черновых клетей позволяет получить более дисперсное и равномерное аустенитное зерно, что важно для обеспечения ударной вязкости. Для бесконечной прокатки наиболее подходящей конфигурацией является 3 черновые + 5 чистовых, т.к. именно после третьего обжатия формируется толщина подката наиболее подходящая для индукционного нагрева.

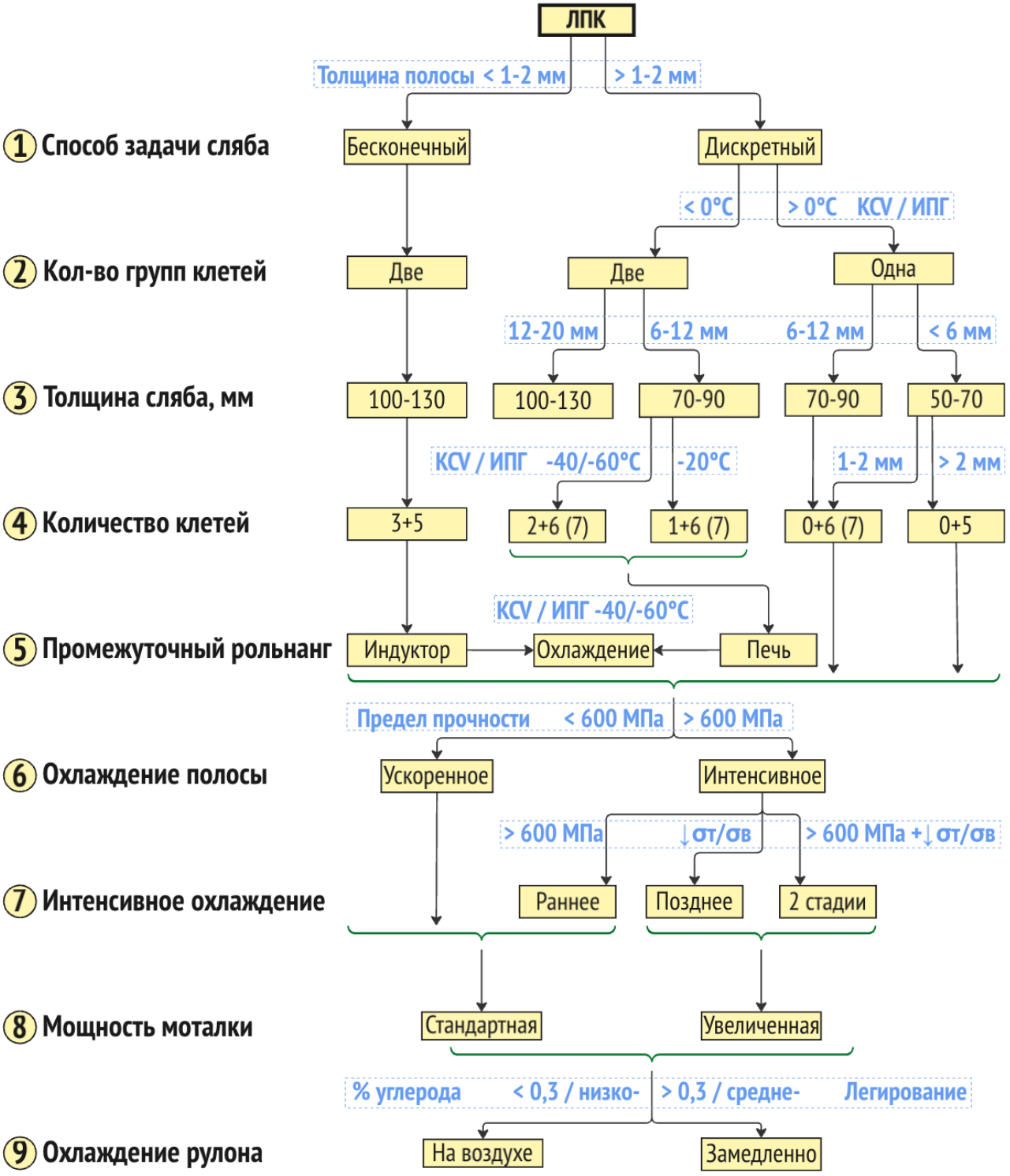


Рисунок 13 – Методика выбора состава оборудования станов ЛПК

На пятом шаге необходимо определиться со вспомогательным оборудованием промежуточного рольганга между черновой и чистовой группами клетей (для конфигураций с двумя группами клетей). Для бесконечной прокатки

нужен индукционный нагрев, а для дискретной задачи тоннельная печь (подогреваемый рольганг) с газовым нагревом. При необходимости получения высоких вязких свойств требуется установка охлаждения подката для предотвращения частичной рекристаллизации в чистовых проходах.

На шестом шаге определяют тип системы охлаждения полосы на отводящем рольганге. При производстве проката из низкоуглеродистых сталей с временным сопротивлением до 600 МПа достаточно применять стандартные скорости охлаждения (5-20 °С/с при толщине 8-10 мм), для высокопрочных сталей рационально применение интенсивного охлаждения (30-50 °С/с при 8-10 мм).

На седьмом шаге определяют расположение секций интенсивного охлаждения в зависимости от требований. Раннее охлаждение целесообразно для сталей с повышенным требованием к прочностным свойствам. Позднее позволяет получать двухфазные стали. При небольшой (менее 100 м) длине отводящего рольганга может быть применено двухстадийное охлаждение для двухфазных и многофазных сталей, в том числе повышенной прочности.

Восьмой шаг заключается в выборе параметров подпольной моталки. Для обеспечения низкой температуры охлаждения, в частности после позднего охлаждения, требуются усиленные моталки.

На девятом шаге необходимо предусмотреть участок или устройства замедленного охлаждения рулонов для среднеуглеродистых сталей с дополнительным легированием и содержанием углерода свыше 0,3%.

Проведенные исследования охватывают все описанные семь групп материалов, что позволяет раскрыть детально предложенный подход: «требования к продукции – ключевые показатели – технология прокатки – рекомендуемое оборудование». Он трансформируется в рекомендации по выбору состава оборудования (Рисунок 14). Они могут быть применены при проектировании нового ЛПК на основе целевого сортамента.

Рекомендации по каждой сортаментной группе:

1. Рядовой низкоуглеродистый сортамент нетребователен составу оборудования и может быть произведён по технологии свободной прокатки (arbitrary rolling). Для повышения эффективности могут быть применены бесконечный процесс, индукционный нагрев и интенсивное охлаждение.
2. Для производства тонкого проката эффективной является технология бесконечного производства, а особую важность имеют устройства для подогрева подката (подогреваемый рольганг или индукционный нагрев).
3. Трубные и строительные хладостойкие марки стали требуют увеличенной (от 90 мм) толщины сляба, наличия отдельной черновой группы клетей (рекомендовано – 2 черновые клети), охлаждения подката. Повысить эффективность может применение раннего и интенсивного охлаждения.
4. Машиностроительные высокопрочные стали требовательны к правильному и эффективному этапу последеформационного охлаждения, поэтому применение раннего, интенсивного охлаждения рекомендовано. Также может потребоваться усиленная моталка (для определённого сортамента).

5. Для автомобильных двух- и многофазных сталей важна гибкость охлаждения полосы, применение двухстадийного и позднего охлаждения различной интенсивности для формирования требуемой микроструктуры.

6. Среднеуглеродистые марки стали могут более эффективно производиться с подогреваемым рольгангом и замедленным охлаждением рулонов.

7. Для микролегированных бором сталей рекомендуется бесконечная схема (в первую очередь для тонких полос), а также применение индукционного нагрева или подогреваемого рольганга.

Сформулированы рекомендации для модернизации оборудования действующего ЛПК Выксунского завода ОМК, которые позволяют повысить качество производимой полосы, получить новые виды продукции:

1. Усиленные муфты привода черновых клетей для прокатки сляба толщиной свыше 100 мм с полной рекристаллизацией крупных зёрен (внедрено);

2. Раннее интенсивное охлаждения для повышения механических свойств высокопрочных низкоуглеродистых сталей (внедрено);

3. Позднее интенсивное охлаждение для производства двухфазных сталей для автомобилестроения (сформулированы рекомендации);

4. Тонкая регулировка температуры сляба перед задачей в прокатный стан за счёт применения индукционного нагрева, что необходимо при установке второй МНЛЗ (сформулированы рекомендации);

5. Тонкая регулировка температуры начала чистовой стадии прокатки с применением дополнительных секций охлаждения, в том числе совмещённых с установкой гидросбива окалины (сформулированы рекомендации).

Результаты исследований подкреплены внедрением новых технологий и продукции на ЛПК Выксунского завода ОМК.

Рядовая низкоуглеродистая кремнемарганцевая сталь составляет порядка 30% производства. Несмотря на достижение качественных показателей большей части подобного сортамента (в толщинах 2-6 мм) свободной прокаткой, в рамках работы внедрены новые технические решения для получения хладостойкого проката в толщинах 8-12 мм. К 2020 году производство рулонного проката толщиной 1-2 мм достигло 65 000 тонн в год, сохраняясь на данном уровне в последующие годы. Выполненные настройки автоматизированных систем управления позволяют производить полосы 1,3 мм сериями до 35 штук.

Произведено свыше 700 тысяч тонн хладостойкого рулонного проката классов прочности К42-К60, из данного металлопроката произведены и отгружены потребителям одношовные трубы диаметром от 219 до 530 мм, полученные методом непрерывной формовки и сварки токами высокой частоты (ТВЧ), а также одношовные трубы диаметром 530 мм и двухшовные диаметром 1020 мм, полученные методом шаговой формовки и дуговой сварки под флюсом.

До 30% производства ЛПК Выксунского завода ОМК составляет прокат из среднеуглеродистых марок стали, которые преимущественно используются для изготовления электросварных обсадных труб классов прочности J55 (сталь 22ГЮ) и K55 (30Г). Из микролегированных бором низкоуглеродистых сталей получены трубы класса прочности N80Q, а из среднеуглеродистых – P110.

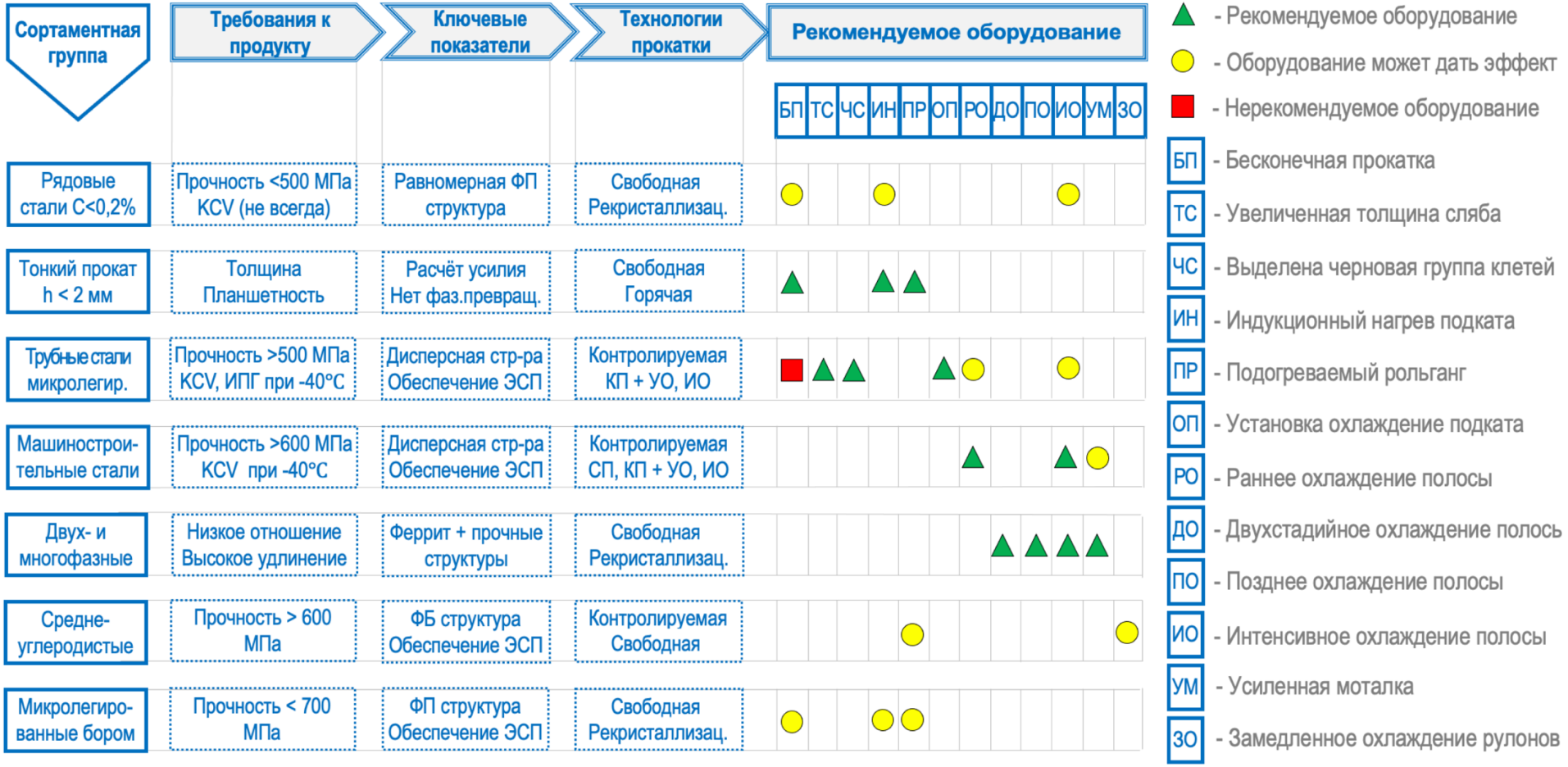


Рисунок 14 – Рекомендации по выбору состава оборудования станов ЛПК

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанная научно обоснованная методика выбора рационального состава оборудования прокатных станов ЛПК (на основе подхода «требования к продукции – ключевые показатели – технология прокатки – рекомендуемое оборудование») совместно с новыми технологическими режимами термомеханической обработки позволяют обеспечить требуемое качество горячекатаных стальных полос для семи основных сортаментных групп.

2. Выполнен комплекс лабораторных исследований сопротивления деформации широкого круга низколегированных сталей (более 30 составов, включая микролегированные ниобием, ванадием, титаном и бором). Предложена модель, отличающаяся от известных учётом влияния деформационных параметров на чувствительность к скорости и температуре. Модель верифицирована на лабораторном и промышленном оборудовании. Показаны особенности реологии: для стали S700MC уровень сопротивления деформации до 20% выше, чем для трубной стали К60; микролегирование бором изменяет реологические свойства в пределах 5–7% по сравнению с аналогами без бора.

3. На основе системного анализа больших промышленных данных и совместного применения классических инженерных моделей с методами машинного обучения для условий прокатных станов ЛПК установлены количественные закономерности изменения коэффициента трения, износа и теплового профиля рабочих валков чистовой группы. Показано, что:

- коэффициент трения при установившемся процессе изменяется в диапазоне 0,12…0,32 в зависимости от скорости прокатки и обжатия, а отношение коэффициента трения при захвате к коэффициенту трения при установившемся процессе является функцией окружной скорости валков;
- механический износ валка наиболее точно описывается не линейной регрессией, а моделями на основе градиентного бустинга (R^2=0,77), при этом выявлены критические режимы (ширина полосы <1300 мм, обжатие 2–4 мм, усилие противоизгиба 1800–2400 кН), приводящие к повышенному износу;
- разработанная конечно-разностная модель температурного поля валка, адаптированная по данным 60 промышленных замеров, обеспечивает погрешность не выше 1,5 °С, что соответствует ошибке расчёта теплового расширения по диаметру не более 0,014 мм.

4. Проведены исследования рекристаллизации для различных конфигураций прокатных станов ЛПК. Установлены основные особенности структурообразования при производстве на станах различных конфигураций:

- с учётом толщины сляба 70-110 мм для производства рулонного проката толщиной 12 мм из трубных марок стали класса прочности К60 рациональным является использование двух черновых обжатий как с точки зрения параметров структуры аустенита (средний размер зерна после черновой прокатки $D\gamma$черн = 55 мкм, эффективный размер зерна после чистовой прокатки $D\gamma$эфф = 7,6 мкм), так и с точки зрения гибкости технологических параметров (варьирование температур чистовой прокатки и толщины подката);

- три черновых обжатия позволяют улучшить показатели структуры аустенита (Dγчерн = 31 мкм; Dγэфф = 4,8 мкм, как и выше на примере производства проката 12 мм из сляба толщиной 110 мм), однако при определенных соотношениях толщины сляба и проката не выполняется критерий R (из-за малых обжатий в черновой);

- вариант без использования черновых клетей, как правило, не позволяет обеспечить выполнение предложенных критериев;

- применение одного чернового обжатия не позволяет получить мелкое и однородное зерно аустенита перед чистовой стадией (Dγчерн =110-127 мкм), а также низкое значение эффективного размера зерна (Dγэфф = 15,1…17,4 мкм).

5. Проведено исследование фазовых превращений (построены термокинетические диаграммы и имитация реальных режимов охлаждения полосы на отводящем рольганге). Впервые в России внедрена технология рекристаллизационной прокатки с интенсивным охлаждением, обеспечивающим скорость охлаждения до 65 °С/с для полос толщиной 12 мм. Предложено и реализовано оборудование раннего интенсивного охлаждения, а также сформированы рекомендации по модернизации отводящего рольганга для обеспечения рациональных режимов позднего интенсивного охлаждения.

6. Расчёты в конечно-элементной модели индукционного нагрева показали, что для О-образного индуктора при нагреве подката толщиной 20 мм при бесконечной схеме производства определено, что для нагрева на 250°С необходимо 8 секций, получены графики средней и поверхностной температур, разработана конструкция устройства индукционного нагрева. Сформулированы рекомендации для применения индукционного нагрева сляба при прокатке на действующем стане ЛПК с двух МНЛЗ.

7. Установлены закономерности дефектообразования при прокатке на ЛПК, определяемые сочетанием горячей пластичности стали, исходной геометрии узкой грани сляба и неравномерностью деформации. На основе конечно-элементного моделирования формоизменения угловых участков и длины контакта полок калибра с поверхностью сляба предложены рациональные параметры калибровки эджерных валков, обеспечивающие сокращение зоны контакта валка с заготовкой более чем в два раза и повышение стойкости валкового комплекта до 500 тыс. т. Промышленное внедрение разработанной калибровки позволило существенно снизить количество прикромочных дефектов на полосах, в первую очередь из среднеуглеродистых сталей.

8. Внедрены на действующем ЛПК новые технологии изготовления рулонного проката из рядовых низкоуглеродистых марок сталей, рулонного проката толщиной 1…2 мм, хладостойкого трубного проката классов прочности К42-К60, среднеуглеродистых марок стали, применяемых для труб высоких классов прочности. Опробовано производство проката из высокопрочных машиностроительных сталей. Рекомендации по выбору состава оборудования и технологическим вопросам, сформулированные в диссертационной работе, приняты для внедрения и проработки. Общий объём продукции, произведённой на ЛПК с использованием разработок автора, составил 1 131 873 тонны, фактический экономический эффект составил 1 462,55 млн. руб.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях

Монографии

1. Современные технологии производства плоского проката из низкоуглеродистых микролегированных сталей / **А.В. Мунтин** [и др.]. Монография. М.: Металлургиздат, 2024. 456 с. (26 п.л. / 6 п.л.)

2. Управление качеством полос и листов при горячей прокатке / **А.В. Мунтин** [и др.]. Монография. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. 280 с. (16 п.л. / 4 п.л.)

Статьи в рецензируемых журналах ВАК РФ

3. **Мунтин А.В.** Технологические особенности производства стальной полосы различного сортамента на литейно-прокатных комплексах // Металлург. 2024. № 11. С. 40-50. (0,6 п.л. / 0,6 п.л.)

Muntin A.V. Technological features of the production of steel strips of various ranges in casting and rolling complexes // Metallurgist. 2025. DOI 10.1007/s11015-025-01879-7. (переводная версия в Scopus)

4. **Мунтин А.В.** Передовые технологии совмещенного процесса непрерывного литья тонких слябов и горячей прокатки стальной полосы // Металлург. 2018. № 9. (0,6 п.л. / 0,6 п.л.)

Muntin A.V. Advanced Technology of Combined Thin Slab Continuous Casting and Steel Strip Hot Rolling // Metallurgist. 2019. Vol. 62, No. 9-10. P. 900-910. DOI 10.1007/s11015-019-00747-5. (переводная версия в Scopus)

5. **Мунтин А.В.**, Солдатов Е.А. Современное оборудование для охлаждения горячекатаной полосы на отводящем рольганге непрерывных широкополосных станов и литейно-прокатных комплексов // Заготовительные производства в машиностроении. 2018. Т. 16. № 3. С. 120-127. (0,6 п.л. / 0,3 п.л.)

6. **Мунтин А.В.**, Куренков Ю.М., Колесников А.Г. Современные технологические решения и оборудование для производства ультратонкой горячекатаной полосы // Производство проката. 2016. № 8. С. 13-21. (0,6 п.л. / 0,3 п.л.)

7. Эволюция аустенитной структуры при производстве рулонного проката из трубных сталей на литейно-прокатных комплексах различных конфигураций / **А.В. Мунтин** [и др.] // Металлург. 2019. № 3. С. 43-53. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

Austenitic Structure Evolution During Pipe Steel Coiled Rolled Product Manufacture in Casting and Rolling Complexes of Different Configurations / **A.V. Muntin** [et al.] // Metallurgist. 2019. Vol. 63, No. 3-4. P. 264-276. – DOI 10.1007/s11015-019-00820-z. (переводная версия в Scopus)

8. Разработка технологии производства рулонного проката трубного назначения класса прочности К60 в условиях литейно-прокатного комплекса / **А.В. Мунтин** [и др.] // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2016. № 3. С. 17-25. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.) (журнал включён в RSCI)

9. Анализ технологических факторов обеспечения плоскостности при прокатке ультратонкой горячекатаной полосы на широкополосном стане 1950 / **А.В. Мунтин** [и др.] // Производство проката. 2019. № 7. С. 4-13. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

10. Анализ особенностей износа рабочих валков чистовой группы клетей в условиях стана 1950 ЛПК АО «ВМЗ» / **А.В. Мунтин** [и др.] // Металлург. 2021. № 3. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

Analysis of the Specific Features of Wear of the Working Rolls of the Finishing Group of Stands Under Conditions of the 1950 Mill at the Casting-Rolling Complex of the “VMZ” JSC / **A.V. Muntin** [et al.] // Metallurgist. 2021. Vol. 65, No. 3-4. P. 305-313. DOI 10.1007/s11015-021-01158-1. (переводная версия в Scopus)

11. Севидов А.Е., **Мунтин А.В.**, Колесников А.Г. Моделирование механического износа рабочих валков широкополосного стана горячей прокатки методами машинного обучения // Черные металлы. 2022. № 11. С. 22-27. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

12. Севидов А.Е., **Мунтин А.В.,** Румянцев А.В. Исследование коэффициента трения при установившемся процессе непрерывной горячей прокатки стальных полос в условиях промышленного стана 1950 // Черные металлы. 2021. № 9. С. 29-35. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

13. Влияние параметров интенсивного последеформационного охлаждения горячекатаной полосы на процессы структурообразования в низкоуглеродистых сталях / **А.В. Мунтин** [и др.] // Металлург. 2021. № 1. С. 24-33. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

Effect of Hot-Rolled Strip Intense Post-Deformation Cooling Parameters on Structure Formation Processes in Low-Carbon Steels / **A.V. Muntin** [et al.] // Metallurgist. 2021. Vol. 65, No. 1-2. P. 21-33. DOI 10.1007/s11015-021-01130-z. (переводная версия в Scopus)

14. Скачков С.Д., **Мунтин А.В.** Перспективы производства микролегированных бором сталей на литейно-прокатном комплексе // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. Т. 18. № 12. С. 544-550. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

15. Особенности формирования микроструктуры и механических свойств низколегированной стали при использовании различных схем термомеханической обработки / **А.В. Мунтин** [и др.] // Черные металлы. 2013. № 12. С. 19-26. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

16. Даниленко А.В., **Мунтин А.В.**, Хлыбов А.А. Методика оценки склонности металла к трещинообразованию при различных режимах прокатки // Черные металлы. 2023. № 10. С. 85-92. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

17. Колесников А.Г., **Мунтин А.В.**, Зинягин А.Г. Особенности физического моделирования контролируемой прокатки // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 1. С. 32-35. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

18. Влияние микролегирования на микроструктуру и уровень механических свойств рулонного проката класса прочности К56, произведенного в условиях ЛПК / **А.В. Мунтин** [и др.] // Сталь. 2015. № 7. С. 50-54. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

Influence of microalloying on the coiled strip (strength class K56) produced in a casting and rolling complex / **A.V. Muntin** [et al.] // Steel in Translation. 2015. Vol. 45, No. 7. P. 521-525. DOI 10.3103/S0967091215070128. (переводная версия в Scopus)

19. Исследование природы образования поверхностных дефектов горячекатаного проката в прикромочной зоне / **А.В. Мунтин** [и др.] // Сталь. 2020. № 1. С. 40-45. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

Study of the Surface Defect Nature of Hot-Rolled Products in the Edge Zone / **A.V. Muntin** [et al.] // Steel in Translation. 2020. Vol. 50, No. 1. P. 46-52. DOI 10.3103/S0967091220010088. (переводная версия в Scopus)

20. Эфрон Л.И., Рингинен Д.А., **Мунтин А.В.** Особенности реализации термомеханической прокатки на станах различных типов // Металлург. 2022. № 4. С. 45-59. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

Efron L.I., Ringinen D.A., **Muntin A.V.** Features of Implementing Thermomechanical Rolling in Various Types of Mills // Metallurgist. 2022. Vol. 66, No. 3-4. P. 403-421. DOI 10.1007/s11015-022-01342-x. (переводная версия в Scopus)

21. Особенности формирования прикромочных трещин при производстве горячекатаного проката на современных толстолистовых, широкополосных станах и литейно-прокатных комплексах. Часть 1 / **А.В. Мунтин** [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. – 2017. – Т. 15. – № 8. – С. 361-369. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

22. Особенности формирования прикромочных трещин при производстве горячекатаного проката на современных толстолистовых, широкополосных станах и литейно-прокатных комплексах. Часть 2 / **А.В. Мунтин** [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. Т. 15. № 10. С. 462-468. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

23. Микролегирование хладостойких трубных сталей для производства рулонного проката на литейно-прокатном комплексе / **А.В. Мунтин** [и др.] // Сталь. 2015. № 9. С. 56-61. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

Microalloying of low-temperature pipe steel for coil production by casting and rolling / **A.V. Muntin** [et al.] // Steel in Translation. – 2015. – Vol. 45, No. 9. – P. 705-711. – DOI 10.3103/S0967091215090041. (переводная версия в Scopus)

24. Разработка системы микролегирования стали для хладостойкого рулонного проката трубного назначения в условиях ЛПК / **А.В. Мунтин** [и др.] // Металлург. 2016. № 10. С. 38-44. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

Development of Steel Microalloying System for Cold-Resistant Coiled Product Designated for Pipes Under CRC Conditions / **A.V. Muntin** [et al.] // Metallurgist. 2017. Vol. 60, No. 9-10. P. 1038-1045. DOI 10.1007/s11015-017-0405-0. (переводная версия в Scopus)

25. Формирование структуры и свойств рулонного проката трубного назначения при производстве в условиях литейно-прокатного комплекса / **А.В. Мунтин** [и др.] // Металлург. 2018. № 10. С. 40-47. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

Structure and Property Formation for Pipe Coiled Rolled Product During Manufacture Under Casting And Rolling Complex Conditions / **A.V. Muntin** [et al.] // Metallurgist. 2019. Vol. 62, No. 9-10. P. 1012-1021. DOI 10.1007/s11015-019-00748-4. (переводная версия в Scopus)

26. Особенности технологии производства рулонного проката из микролегированных бором сталей на литейно-прокатном комплексе / **А.В. Мунтин** [и др.] // Прокатное производство. Приложение к журналу "Технология металлов". 2024. № 19. С. 12-19. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

27. Особенности формирования структуры и механических свойств в прокате различной толщины из низкоуглеродистой микролегированной стали в условиях

литейно-прокатного комплекса / **А.В. Мунтин** [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 9. С. 669-678. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

Formation Features of the Structure and Mechanical Properties in Rolled Products with Various Thicknesses from Low-Carbon Microalloyed Steel Produced at an Integrated Casting and Rolling Facility / **A.V. Muntin** [et al.] // Steel in Translation. 2021. Vol. 51, No. 9. P. 607-615. DOI 10.3103/S0967091221090096. (переводная версия в Scopus)

28. Науменко В.В., Мурсенков Е.С., **Мунтин А.В.** Разработка технологии производства сталей класса прочности К52 с пониженным содержанием хрома с требованиями по хладостойкости и коррозионной стойкости в условиях литейно-прокатного комплекса // Черные металлы. 2021. № 3. С. 10-16. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

29. Исследование влияния микролегирования на формирование структуры и комплекса механических свойств рулонного проката класса прочности К52, произведенного в условиях ЛПК / **А.В. Мунтин** [и др.] // Металлург. 2020. № 8. С. 28-35. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

Study of the Effect of Microalloying on Microstructure and Mechanical Property Formation for Rolled Product of Strength Class K52 Produced Under CRU Conditions / **A.V. Muntin** [et al.] // Metallurgist. 2020. Vol. 64, No. 7-8. P. 759-769. DOI 10.1007/s11015-020-01052-2. (переводная версия в Scopus)

30. Влияние системы микролегирования на структуру рулонного проката, произведенного в условиях ЛПК / **А.В. Мунтин** [и др.] // Сталь. 2020. № 7. С. 58-64. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

The Influence of a Microalloying System on the Structure of a Coiled Strip Produced under Conditions of Endless Strip Production / **A.V. Muntin** [et al.] // Steel in Translation. 2020. Vol. 50, No. 7. P. 501-508. DOI 10.3103/S0967091220070104. (переводная версия в Scopus)

Патенты РФ

31. Способ производства рулонной полосы на широкополосном прокатном стане: Патент 2686504 РФ / **А.В. Мунтин** [и др.]; заявл. 01.10.2018: опубл. 29.04.2019. Бюлл. №13.

32. Способ производства рулонного проката из низколегированной стали: Патент 2736468 РФ / **А.В. Мунтин** [и др.]; заявл. 04.06.2020: опубл. 17.11.2020. Бюлл. №32.

33. Способ производства особо тонких горячекатаных полос на широкополосном стане литейно-прокатного комплекса: Патент 2679159 РФ / **А.В. Мунтин** [и др.]; заявл. 07.03.2018; опубл. 06.02.2019. Бюлл. №4.

34. Способ производства горячекатаного хладостойкого проката: Патент 2768396 РФ / **А.В. Мунтин** [и др.]; заявл. 28.12.2020: опубл. 24.03.2022. Бюлл. №9.

35. Способ производства горячекатаного рулонного проката из низколегированной стали: Патент 2709075 РФ / **А.В. Мунтин** [и др.]; заявл. 19.08.2019: опубл. 13.12.2019. Бюлл. №35.

36. Способ производства трубы с низким отношением предела текучести к пределу прочности: Патент 2682984 РФ / **А.В. Мунтин** [и др.]; заявл. 07.03.2018: опубл. 25.03.2019. Бюлл. №9.

Сборники трудов конференций

37. **Muntin A.** Design of rolling equipment at casting and rolling complexes for steel strips according to the features of various products range manufacturing technology // Proceedings of the 9th International Conference Asiasteel, 4-7 сентября 2024 года, Чанша, Китай. С. 831-833. (0,1 п.л. / 0,1 п.л.)

38. Development of rolling technology for pipe steel grades at casting and rolling complex / **A. Muntin** [и др.] // Proceedings of the Asia Steel International Conference, 5-8 октября 2015 года, Йокогама, Япония. С. 644-645. (0,1 п.л. / 0,1 п.л.)

39. Thermo-mechanical thin slab rolling technology for X60-X70 steel grades with low temperature toughness / **A. Muntin** [и др.] // Proceedings of the 10th International Rolling Conf., 6-9 июня 2016 года, Грац, Австрия. С. 1236-1240. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.)

40. Разработка и освоение технологии производства хладостойкого проката для электросварных труб в условиях литейно-прокатного комплекса / **А.В. Мунтин** [и др.] // Труды международной научно-практической конференции Трубы-2014, 15-18 сентября 2014 года, Челябинск. С. 127-131. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.)

41. Pushing the limits of the thin slab casting and rolling process for pipe grades / **A. Muntin** [и др.] // Proceedings of the International Symposium on thin slab casting and rolling, 25-27 апреля 2018 года, Ухань, Китай. С. 142-150. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.)

42. Development of X60-X70 pipe steel TRDR technology for low-temperature toughness increasing / **A. Muntin** [и др.] // Proceedings of Iron and Steel Technology Conference, 08-11 мая 2017 года, Нэшвилл, США. С. 2893-2899. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.)

43. Soldatov E., **Muntin A.** Research of the effect of intensive cooling on the characteristics of the hot-rolled strip // 28th International Conference on Metallurgy and Materials, 22-24 мая 2019 года, Брно, Чехия. С. 821-825. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.)

44. Sevidov A., **Muntin A.** Determination of the friction coefficient during hot strip rolling under industrial condition using forward slip // Proceedings the 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, 26-28 мая 2021 года, Брно, Чехия. С. 299-305. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.)

45. Low temperature toughness stability increasing of X65 and X70 steel using austenite evolution models / **A. Muntin** [и др.] // Proceedings of THERMEC - International Conference on Processing & Manufacturing of advanced Materials, 29 мая – 3 июня 2016 года, Грац, Австрия. С. 470. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.)

46. Productivity and performances enhancing in OMK for X70 arctic via thin-slab rolling fed by EAF / **A. Muntin** [и др.] // Proceedings of AISTech - Iron and Steel Technology Conference Proceedings, 31 августа - 03 сентября 2020 года, Кливленд, США. С. 1034-1048. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.)

47. Солдатов Е.А., **Мунтин А.В.** Исследование влияния интенсивного охлаждения на характеристики широкополосного проката // Труды XII Международного конгресса прокатчиков, 8-10 октября 2019 г. Выкса. С. 37-41. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.)

48. Скачков С. Д., **Мунтин А. В.** Исследование фазовых превращений при непрерывном охлаждении стали 34MnB5 // Труды 12-й Всероссийской конференции «Будущее машиностроения России», 24-27 сентября 2019 г. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. С. 421-425. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.)