

На правах рукописи

СОЛДАТОВ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ
ПРОКАТКИ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ХЛАДОСТОЙКИХ МАРОК СТАЛИ В
УСЛОВИЯХ ЛИТЕЙНО-ПРОКАТНОГО КОМПЛЕКСА

Специальность 2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва - 2024

Работа выполнена в АО «Выксунский металлургический завод», в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (Национальный исследовательский университет)

Научный руководитель: Мунтин Александр Вадимович,
кандидат технических наук, директор
инженерно-технологического центра АО
«Выксунский металлургический завод»

Официальные оппоненты: Шаталов Роман Львович
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский политехнический
университет»

Амиров Руслан Низамиевич
кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Магнитогорский
государственный технический университет им.
Г.И. Носова»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Липецкий государственный
технический университет»

Защита состоится «___» _____ 2024 года в ___ часов ___ минут на
заседании диссертационного совета 24.2.331.01 при Московском
государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, 2-я Бауманская, 5, стр. 1.

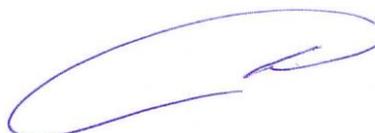
Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по
указанному адресу.

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 «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Плохих А.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Производство стальной горячекатаной полосы является одной из важнейших составляющих металлургической отрасли. Объёмы её изготовления составляют более 700 млн. тонн в мире и более 25 млн. тонн в России. Производство такой полосы осуществляется как на непрерывных широкополосных станах (НШПС) с повторным нагревом слябов, так и на литейно-прокатных комплексах (ЛПК), где заготовка поступает в прокатный стан непосредственно после машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Использование термомеханических режимов на ЛПК позволяет достигать заданных микроструктуры и свойств готового проката.

Применение рациональных режимов прокатки на непрерывных широкополосных станах различной конфигурации позволило достигнуть высокого уровня прочностных (временное сопротивление до 700 МПа) и вязких (при температурах до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) свойств рулонного проката толщиной до 22 мм из низколегированных сталей. В первую очередь за счёт применения контролируемой прокатки (КП), в том числе с ускоренным охлаждением (КП+УО), совместно с микролегированием ниобием. В работах российских и зарубежных учёных-металловедов (Эфрон Л.И., DeArdo A.J., Червонный А.В. и др.) обоснованы и определены термомеханические режимы КП+УО на ЛПК, обеспечивающие формирование дисперсной феррито-бейнитной структуры и требуемых механических свойств готовой полосы. Ими показано, что условия производства проката из микролегированных ниобием сталей на ЛПК отличаются от НШПС состоянием исходной структуры сляба (наличие крупных литых зёрен размером до 5 мм). Этот факт, совместно с небольшим суммарным обжатием (толщина заготовки 50-110 мм), обуславливает особенности процесса структурообразования, в частности рекристаллизации.

Опубликованные работы преимущественно имеют металлургическую направленность, и есть необходимость в решении вопроса уточнения рациональных режимов прокатки также с точки зрения энергосиловых параметров и особенностей оборудования. Кроме того, в известных работах детально не раскрыт вопрос применения альтернативных способов помимо КП+УО, в том числе для сталей без микролегирования ниобием. В ряде случаев применять технологию контролируемой прокатки совместно с добавками ниобия нецелесообразно и экономически неэффективно. Например, для проката без высоких требований по механическим свойствам или при ограничении импортных поставок ниобия. При этом возникает потребность во внедрении новых термомеханических режимов обработки.

Таким образом, развитие на литейно-прокатных комплексах новых эффективных и экономных термомеханических режимов прокатки с одновременным учётом особенностей деформирования производимых сталей и процесса их структурообразования является актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является обеспечение заданного комплекса механических свойств горячекатаных полос (временное сопротивление от 470 до 600 МПа, хладостойкость при температурах от -20 до

- 40 °С) из низкоуглеродистых марок стали и снижение затрат на их легирование при производстве на литейно-прокатном комплексе.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Анализ передовых технологий термомеханической обработки на широкополосных станах и литейно-прокатных комплексах, а также оборудования для их реализации. Определение возможных технологических приемов производства полос для обеспечения заданных механических свойств;

2. Изучение особенностей рекристаллизации аустенитного зерна низкоуглеродистых сталей различных систем микролегирования при производстве на ЛПК. Определение рациональных режимов обжаты при прокатке для формирования дисперсной структуры готового проката;

3. Получение термомеханических коэффициентов уравнения сопротивления деформации и расчёт энергосиловых параметров (ЭСР) для определения возможностей применения рациональных режимов обжаты на действующем оборудовании. Анализ прокатного оборудования и разработка рекомендаций по его модернизации;

4. Установление влияния параметров термомеханической обработки с последеформационным охлаждением на структуру и свойства готовой полосы при различных режимах и конфигурациях охлаждающего оборудования на отводящем рольганге стана;

5. Разработка научно-обоснованных рекомендаций по выбору режимов термомеханической обработки в зависимости от вариантов микролегирования (и без него) и заданного уровня механических свойств;

6. Внедрение новых технологий термомеханической обработки низколегированных сталей и оборудования для их реализации на литейно-прокатном комплексе АО «Выксунский металлургический завод» (АО «ВМЗ»).

Научная новизна:

1. Получены термомеханические коэффициенты уравнения сопротивления деформации стали с содержанием углерода 0,06 %, кремния 0,35 %, марганца 1,45 %, микролегированной по двум вариантам: 0,035 % ниобия и 0,1 % ванадия. Установлено, что при температурах деформации до 1000 °С, скоростях деформации до 5 с⁻¹, величине деформации до 1,0 сопротивление деформации обеих сталей отличается незначительно, при температурах свыше 1000 °С, скоростях деформации до 5 с⁻¹, величине деформации до 1,0 сопротивление деформации стали микролегированной ниобием выше в среднем на 10 МПа.

2. Установлены параметры термомеханической обработки (рекристаллизационной прокатки) с интенсивным охлаждением на литейно-прокатном комплексе низкоуглеродистых (С=0,06 %) низколегированных (кремний 0,35 %, марганец 1,45 %) сталей, обеспечивающие получение комплекса механических свойств (временное сопротивление более 550 МПа, ударная вязкость KCV не менее 250 Дж/см² при -40 °С) в прокате толщиной до 12 мм:

- минимальное относительное обжатие в первом проходе прокатки, необходимое для >90 % статической рекристаллизации крупного исходного аустенитного зерна размером 2000-5000 мкм при $T_{деф}=1100-1200$ °С для стали с ниобием – 30 %, без микролегирования ниобием – 20 %;

- применение не менее 7-8 проходов прокатки с >90% статической рекристаллизации с температурой завершения деформации 830-880 °С и суммарным обжатием не менее 85 %;

- обеспечение скорости интенсивного охлаждения полосы не менее 40 °С/с и температуры смотки 550-600 °С.

3. Установлено, что на ЛПК после рекристаллизационной прокатки за 7-8 проходов марки стали без микролегирования ниобием формируется размер зерна аустенита ($D_{γ_{усл}}=8,5$ мкм), соответствующий эффективному размеру зерна при контролируемой прокатке стали микролегированной ниобием ($D_{eff} = 8 ÷ 9$ мкм). При этом отношение максимального размера зерна аустенита к среднему размеру зерна (d_{max}/d_{cp}) после всех проходов рекристаллизационной прокатки стали без ниобия составляет 1,03, а в стали с ниобием после черновой стадии контролируемой прокатки – 1,69.

4. Определена возможность применения термомеханической обработки с поздним интенсивным охлаждением (не менее 40 °С/с) для получения двухфазной структуры, имеющей матрицу феррита и высокоуглеродистую фазу, в основном представленную М/А-составляющей, в исследуемых низкоуглеродистых сталях. При этом увеличение длительности воздушного охлаждения между прокаткой и началом интенсивного охлаждения с 5 до 35 с позволяет увеличить долю М/А с 1,5 до 4 %, а изменение температуры смотки с 500 до 200 °С увеличить долю М/А с 0,5 до 5 %.

Практическая значимость.

С применением результатов представленной работы произведено более 70 тысяч тонн горячекатаной полосы толщиной до 12,7 мм из низколегированных сталей в условиях ЛПК АО «ВМЗ». Разработаны технологии ТМО, которые снижают нагрузку на оборудование стана горячей прокатки и позволяют получить мелкозернистое однородное по размеру зерно аустенита в линии стана.

Впервые в России при производстве стальных горячекатаных полос внедрена промышленная технология термомеханической обработки с интенсивным охлаждением (скорость охлаждения для полос толщиной 12 мм свыше 40 °С/с). Это позволило обеспечить заданные механические свойства в прокате толщиной до 12 мм (временное сопротивление (σ_B) более 510 Н/мм², предел текучести (σ_T) более 380 Н/мм², ударная вязкость (KCV_{40}) более 150 Дж/см²) при использовании модификации низкоуглеродистых низколегированных марок стали без микролегирования импортными ферросплавами (в частности феррониобием), а также снизить затраты на легирование стали до 500 рублей на тонну.

Достоверность результатов. Достоверность результатов исследований обеспечивалась применением стандартных методов с использованием современного оборудования. Экспериментальные исследования доли

рекристаллизованного зерна проводили на имитационном комплексе Gleeble 3800 и дилатометре DIL 805 A/D. Механические свойства стали определяли по стандартным методикам на оборудовании компании Zwick/Roell. Обоснованность теоретических выводов и результатов экспериментальных исследований подтверждена результатами производства промышленных партий продукции на литейно-прокатном комплексе АО «ВМЗ».

Личный вклад автора. Солдатов Е.А. непосредственно участвовал в постановке работы, формулировке задач, планировании, организации исследований, проводил лабораторные и промышленные эксперименты, обработку и анализ экспериментальных данных, установил закономерности влияния режимов прокатки, параметров интенсивного охлаждения на структуру и свойства горячекатаного проката. Автор участвовал в разработке и освоении технологии производства горячекатаных полос на ЛПК АО «ВМЗ»

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертации доложены и обсуждены на 2-х международных и 4-х российских конференциях: Восьмая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», Москва, 2015; XII научно-практическая конференция молодых специалистов ОМК, Выкса, 2019 г; SEYMARTEC METAL. Модернизация сталеплавильного и прокатного производства, Челябинск, 2019 г; METAL 2019 – 28th International Conference on Metallurgy and Materials, Брно, Чехия, 2019 г; XII Международный конгресс прокатчиков, Выкса, 2019 г; XIII научно-практическая конференция молодых специалистов ОМК, Выкса, 2020 г

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 10 научных трудах, из которых 3 научных публикации в журналах, входящих в базу Scopus, 5 научных публикаций – в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, а также 2 патента на изобретение РФ.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе рассмотрены способы производства проката на литейно-прокатных комплексах, проведен сравнительный анализ сортамента, принципов работы оборудования при различных компоновках оборудования. Для НШПС в составе литейно-прокатных комплексов определены особенности использования вариантов термомеханической обработки (ТМО), таких как контролируемая прокатка (КП) и рекристаллизационная контролируемая прокатка (РКП или рекристаллизационная прокатка). Отмечены возможности использования новой технологии ТМО с интенсивным охлаждением, оборудование для реализации которой разрабатывается и внедряется в мире в последние годы.

Под интенсивным понимается охлаждение полосы водой на отводящем рольганге со скоростью $40 \div 140$ °С/с и более. Под КП понимается технология, разделённая на два основных этапа (с точки зрения структурообразования): первый этап – черновая прокатка выше температуры остановки

рекристаллизации, второй этап – чистовая прокатка в температурном интервале отсутствия рекристаллизации. Под РКП понимается процесс, при котором все проходы прокатки выполняются за одну стадию (с точки зрения структурообразования), при этом стремятся к обеспечению полной рекристаллизации во всех проходах.

В качестве материалов исследования выбраны низкоуглеродистые стали с химическим составом, соответствующим маркам 09Г2С и 09Г2С-1 по ГОСТ 19281. При этом использованы несколько модификаций: без микролегирования, с микролегированием ниобием в количестве 0,01 % (по массе), с микролегированием ниобием в количестве 0,035 % (по массе) и с микролегированием ванадием в количестве 0,1 % (по массе). Более детально информация о химических составах представлена в тексте диссертации.

Вторая глава включает в себя исследование двух вариантов ТМО (КП и РКП) на ЛПК с различной конфигурацией прокатного оборудования.

Важным этапом формирования правильной структуры аустенита является протекание полной рекристаллизации (доля статически рекристаллизованных зерен – $X_{srh} \geq 90$ %) в первых проходах. При этом отличительной особенностью исходной аустенитной структуры тонкого сляба на ЛПК является наличие крупных зерен размером от 500 до 5000 мкм.

Для оценки влияния режимов ТМО на изменение размеров аустенитных зерен при прокатке использован программный инструмент Hot Rolling Recrystallization Model (HRRM) – разработка специалистов АО «ВМЗ». Инструмент учитывает химический состав стали, исходную структуру, особенности процессов измельчения зерна аустенита в процессе горячей деформации. Расчёт режимов прокатки (геометрические размеры сляба и полосы, температурно-деформационные условия в проходах) осуществлялся с использованием программного модуля 2-го уровня автоматизации прокатного стана 1950 АО «ВМЗ».

Расчёты в HRRM исследуемых сталей показали, что рекристаллизация крупных зерен аустенита в первом проходе прокатного стана ЛПК при исходной температуре сляба 1100 °С и ниже затруднена, т.е. необходимо использовать большие обжатия (ϵ). В стали, микролегированной ванадием $V=0,1$ %, 90-100 % статическая рекристаллизация зерен размером до 5000 мкм достигается при относительном обжатии $\epsilon \geq 35$ %, а в стали с содержанием $Nb=0,035$ % - только при $\epsilon \geq 45-50$ %. Подобные обжатия не всегда возможны в промышленных условиях. Увеличение температуры исходной заготовки на 50 °С (до 1150 °С) снижает необходимую для протекания полной рекристаллизации величину относительной деформации на 9-10 % для обоих типов стали. При температуре 1200 °С достаточным условием для измельчения зерна является минимальная степень деформации в 35 %, что выполнимо для большинства прокатных клеток в составе ЛПК, однако потребует дополнительных энергозатрат на нагрев заготовки. Исследование вопросов сопротивления деформации и допустимых нагрузок представлено в Главе 3.

Процесс структурообразования (после первой клетки) зависит от конфигурации прокатного оборудования, которая отличается для различных

ЛПК. Рисунок 1, а демонстрирует ЛПК без выделенной черновой группы, которые могут содержать 4, 5, 6 или 7 чистовых клетей (такие комплексы широко распространены в мире). На Рисунке 1, б показан ЛПК с выделенной непрерывной черновой группой из 2-х клетей и чистовой группой из 6-ти клетей (стан 1950 с такой конфигурацией работает в составе ЛПК АО «ВМЗ»).



Рисунок 1. ЛПК различной конфигурации: а –компоновка с непрерывной чистовой группой из 4÷7 рабочих клетей, б – с выделенными черновой и чистовой группой (2R+6F)

С помощью программного инструмента HRRM исследовали особенности РКП для 4, 5, 6 и 7-ми клетевых станах (без выделенных черновых клетей). Рассмотрены толщины исходного сляба 50, 70, 90, 110 мм и конечные толщины полосы 3, 6, 8, 10, 12 мм. Комбинируя данные толщины можно получить диапазон истинного суммарного обжатия во всех клетях от 1,43 до 3,60. Рассчитывали среднее значение степени рекристаллизации по клетям, т.к. данный параметр является показательным для сравнения различных конфигураций станом. Для расчёта выбраны типичные для подобных конфигураций станом температуры начала прокатки 1150 °С и 1030 °С.

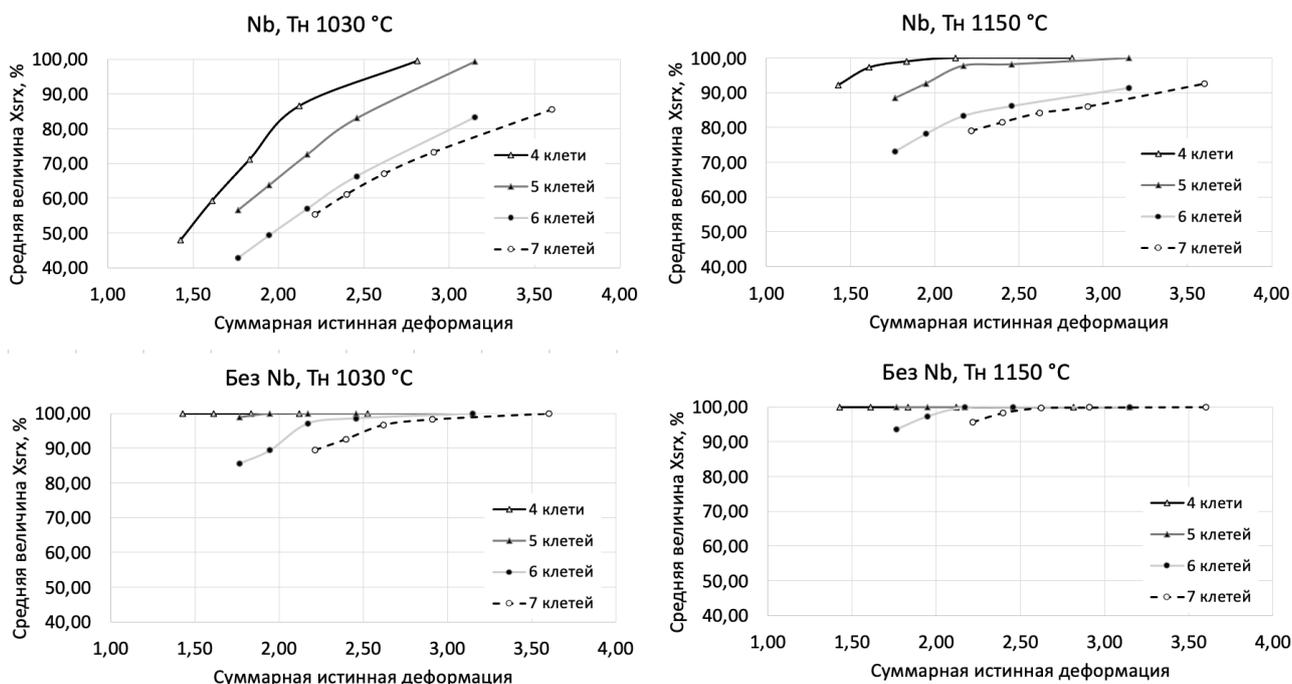


Рисунок 2. Средняя величина доли статически рекристаллизованного зерна в зависимости от суммарного обжатия для станом с различным количеством клетей

По результатам исследования установлено (Рисунок 2) что:

- в низкоуглеродистой стали с содержанием ниобия 0,035 % РКП эффективно реализуется на станах ЛПК из 4-х и 5-ти клеток во всём диапазоне исследованных суммарных обжатий при температуре начала деформации 1150 °С и при суммарных истинных деформациях более 2,5 при температуре 1030 °С. При прокатке в 6-ти и 7-ми клетевых станах микролегированной ниобием стали (0,035 %) не может быть реализована РКП, что объясняется снижением величины частных обжатий.

- в низкоуглеродистой стали без микролегирования ниобием (в том числе микролегированной ванадием 0,1 %) рекристаллизационная прокатка реализуется во всём диапазоне суммарных истинных деформаций и при любом количестве клеток от 4-х до 7-ми как при температуре начала деформации 1150 °С, так и 1030 °С, за исключением небольших суммарных истинных обжатий (менее 2) для станов с 6-ю и 7-ю клетями.

На станах с компоновкой без черновых клетей (Рисунок 1, а) невозможно полноценно реализовать КП. Сравнение структуры аустенитного зерна после РКП и КП провели для компоновки стана Рисунка 1, б. Выявлено, что на данном стане технология РКП может быть реализована для безниобиевой марки стали. Рассчитанный условный размер зерна аустенита при температуре начала чистовой прокатки 1030 °С и при условии протекания полной статической рекристаллизации в 2 черновых и как минимум 5 чистовых проходах составляет $D_{у\text{ усл}}=8,5$ мкм. После чистовой прокатки по технологии РКП отношение d_{max}/d_{cp} , характеризующее однородность структуры, за счет процесса образования новых зерен снижено до величины 1,03. Такой показатель достигается за счёт дополнительных 5-6 циклов рекристаллизации в чистовой группе клетей.

Условие отсутствия рекристаллизации при КП ниобиевой стали выполняется только при прокатке в области низких температур прокатки ($T_{нп} < 900$ °С). При этом рассчитанный эффективный размер зерна (D_{eff}) составил 8,3 мкм (Рисунок 3). Отношение d_{max}/d_{cp} после черновой прокатки составило в среднем 1,69.

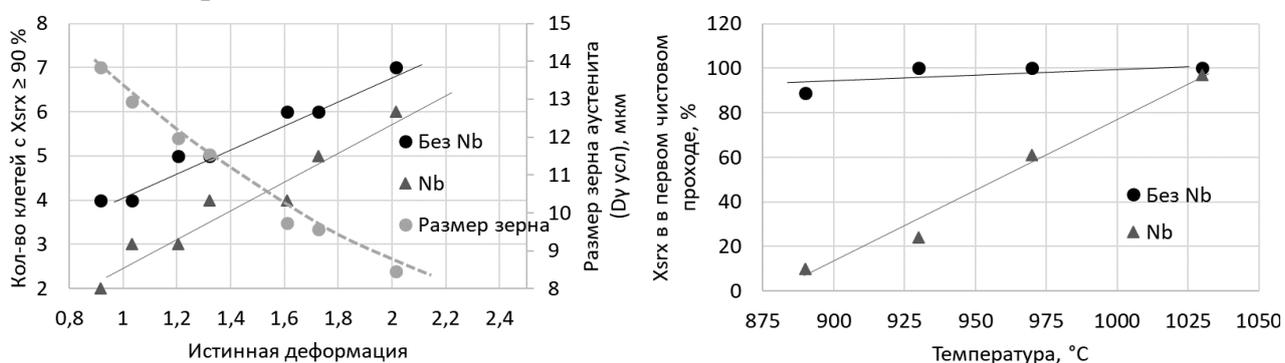


Рисунок 3. Зависимости полноты протекания статической рекристаллизации от параметров прокатки в чистовой группе клетей для компоновки стана 2 черновых + 6 чистовых клетей

Полученные расчетные данные верифицированы при производстве опытно-промышленных партий на стане 1950 ЛПК АО «ВМЗ». Микроструктура проката из исследуемой стали, микролегированной V=0,1 %, после РКП (не менее 7

проходов с $X_{srx} \geq 90 \%$) аналогична по размеру зерна стали, микролегированной $Nb=0,035 \%$ после КП (2 прохода с $X_{srx} \geq 90 \%$ и 6 проходов с $X_{srx} \leq 10 \%$). Коэффициент анизотропии конечной структуры после РКП – 1,1, после КП – 1,8.

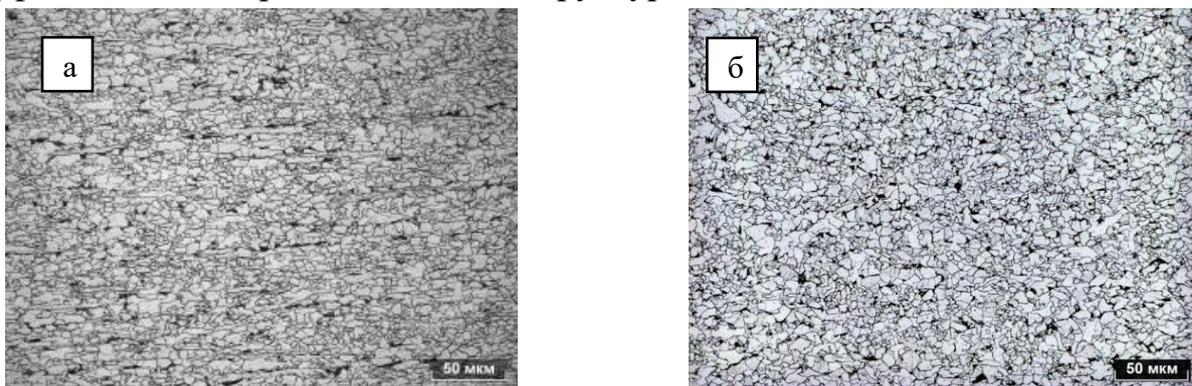


Рисунок 4. Микроструктура в промышленных образцах металла, прокатанных по режиму а) КП ($X_{srx} < 10 \%$), б) РКП ($X_{srx} > 90 \%$)

В третьей главе представлены исследования реологических свойств сталей, расчёт ЭСП, анализ прокатного оборудования (главная линия черновых клеток стана 1950) и разработка рекомендаций по его модернизации.

В Главе 2 показано, что для эффективной реализации как рекристаллизационной, так и контролируемой прокатки на ЛПК требуются повышенные обжатия до 30-50 %, особенно в первых проходах. Для расчёта ЭСП в работе экспериментально определены реологические свойства исследуемых сталей в интервале температур 950-1150 °С, величиной деформаций до 60 % и скоростях деформации 1 – 10 с⁻¹. Исследования проводились на Gleeble 3800 испытанием на сжатие цилиндрических образцов Ø 10×15 мм

На Рисунке 5 представлены кривые напряжение-деформации для исследуемых микролегированных сталей с ванадием и ниобием. При температуре 950 °С значения истинного напряжения двух сталей значительно не отличаются. С увеличением температуры до 1050-1150°С сталь, микролегированная ванадием, имеет меньший уровень сопротивления деформации, в среднем на 10 МПа.

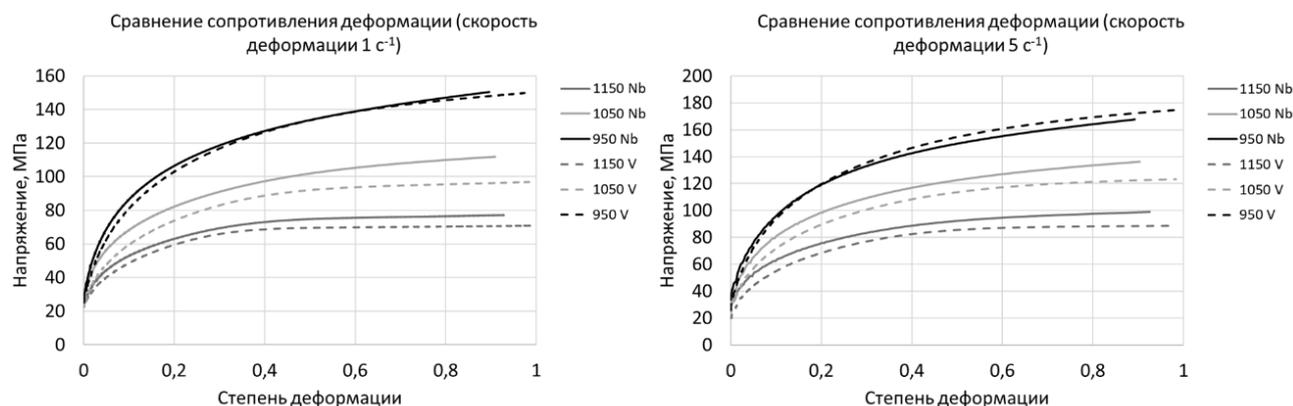


Рисунок 5. Сравнение значений сопротивления деформации исследуемых низколегированных сталей с ванадием (V) и ниобием (Nb)

После обработки кривых получены коэффициенты уравнения Хензеля-Шпиттеля:

$$\sigma_{(0,035 Nb)} = 1722 \cdot \varepsilon^{0,2651} \cdot u^{0,1024} \cdot e^{-0,00268 \cdot T} \quad (1)$$

$$\sigma_{(0,1 V)} = 1625 \cdot \varepsilon^{0,2368} \cdot u^{0,1410} \cdot e^{-0,00271 \cdot T} \quad (2)$$

где ε - относительная деформация, u – скорость деформации, T - температура металла, e – основание натурального логарифма.

Сравнение фактических усилий при прокатке и рассчитанных с использованием формул (1) и (2) показало высокую сходимость данных. Коэффициент детерминации составил 0,98. Полученные коэффициенты модели использованы для расчета ЭСП при прокатке в клетях черновой группы сляба шириной 1800 мм, толщиной от 50 до 110 мм с обжатиями необходимыми для выполнения условий полной рекристаллизации в линии стана 1950 АО «ВМЗ».

Разница по усилиям и мощности между ниобиевой и ванадиевой модификацией 09Г2С-1 составляет от 0,17 до 1,45 МН и от 0,03 до 0,57 МВт соответственно. Установлено, что при прокатке сляба из стали микролегированной ниобием толщиной 90 мм с относительным обжатием 45-50 % в первой черновой клетки электродвигатель главной линии работает с перегрузкой свыше 140 %. Для исключения аварийных простоев проанализирована работа привода и установлены предельные нагрузки стана. На основании анализа прокатки исследуемых марок стали показана возможность увеличения порога допустимой нагрузки со 140÷160 % до 180 %, рекомендовано изменить максимально допустимый угол захвата с 16,2 ° до 17,3 °. Производителю оборудования предложено расширить эксплуатационные характеристики элементов привода за счет усиления конструкции приводных муфт.

В четвёртой главе проведено исследование фазовых превращений исследуемых сталей, а также влияние режимов ТМО с различными схемами последеформационного охлаждения на структуру и свойства готовой полосы.

Исследования выполняли на деформационном дилатометре DIL 805 A/D на цилиндрических образцах Ø 5×10 мм. Методика проведения эксперимента предусматривала деформацию образцов и охлаждение с имитацией режима прокатки на стане 1950 ЛПК, а также построение типовых термо-кинетических диаграмм (ТКД) распада горячедеформированного аустенита. На полученных деформированных образцах исследовали микроструктуру на оптическом микроскопе «Carl Zeiss Axio Observer.Dlm», измеряли твёрдость по Виккерсу при нагрузке 1 кг (HV1).

В работе получены ТКД для сталей с различным микролегированием (Nb, V) и без микролегирования. Общим для каждой ТКД является то, что с ростом интенсивности охлаждения доля структур, образующихся в результате промежуточного превращения аустенита, растёт, а твердость стали увеличивается. В интервале скоростей охлаждения 20 ÷ 80 °С/с доля бейнита

повышается с 15 % до 50-60 %. Учитывая данные закономерности, предложен новый для станов ЛПК вид ТМО с интенсивным охлаждением.

Обобщены данные зарубежного опыта применения интенсивного охлаждения. Построены зависимости скорости охлаждения от толщины полосы для нескольких стратегий охлаждения на отводящем рольганге стана 1950 (Рисунок 6). Максимальная скорость охлаждения полосы в случае использования интенсивных секций охлаждения может достигать $110 \div 140 \text{ }^\circ\text{C/s}$ для полосы толщиной 2 мм и $40 \div 60 \text{ }^\circ\text{C/s}$ для толщин 10-14 мм, что выше на $80 \text{ }^\circ\text{C/s}$ и $20 \text{ }^\circ\text{C/s}$ относительно стандартного ламинарного охлаждения.

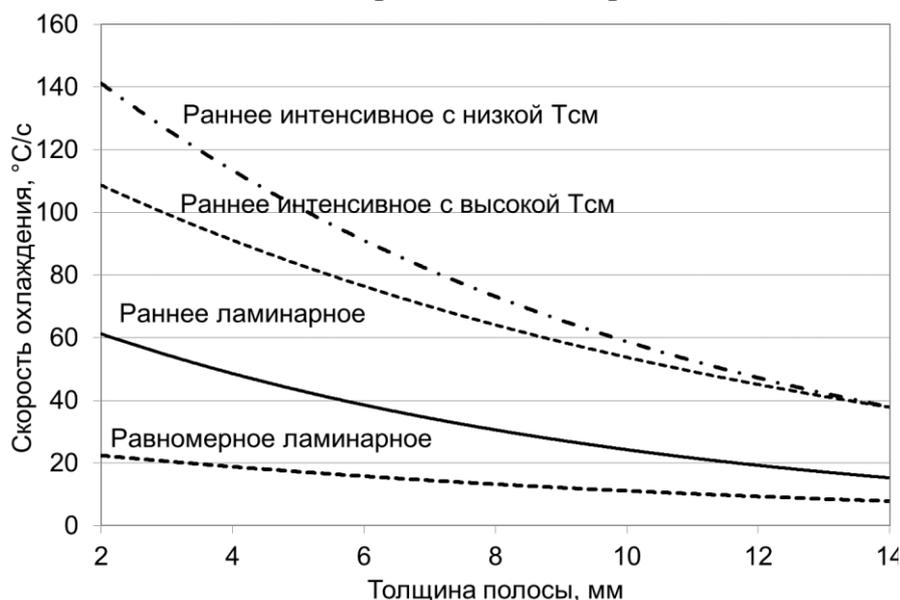


Рисунок 6. Обобщенные зависимости скорости охлаждения от толщины проката

В лабораторных условиях имитировались варианты охлаждения для разных сталей на отводящем рольганге стана 1950. Сравнивались варианты ТМО с обычным ламинарным охлаждением и интенсивным охлаждением (ИО). ТМО с ИО делилось в свою очередь на ТМО с ранним ИО, ТМО с поздним ИО, а также двухстадийное ИО (Рисунок 7).

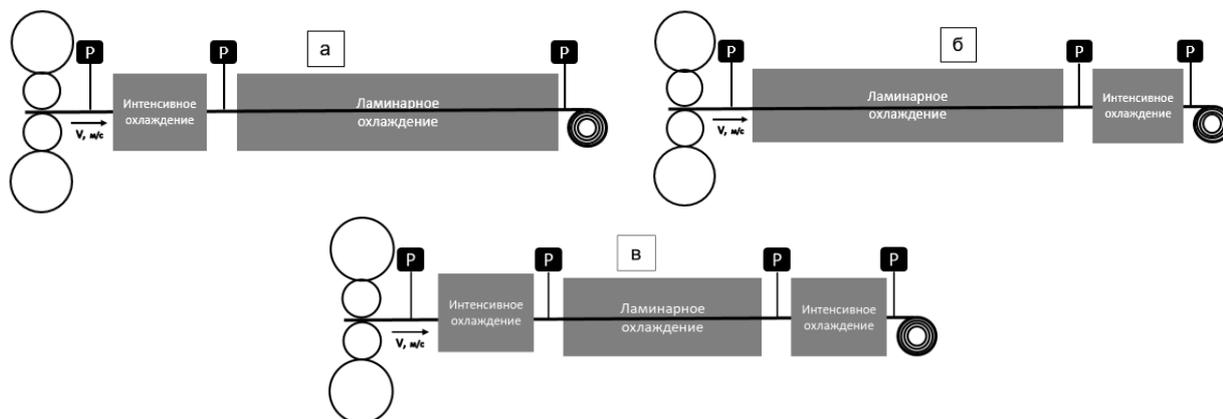


Рисунок 7. Схемы отводящих рольгангов с участком интенсивного охлаждения: а – раннее ИО, б – позднее ИО, в – двухстадийное ИО

Установлено, что в исследуемых сталях реализуется повышение временного сопротивления при использовании ТМО с ИО по сравнению со стандартным ламинарным охлаждением. В частности, при производстве полосы толщиной 6

мм прирост временного сопротивления составляет 50 МПа и выше. Обобщенные зависимости при различных режимах последеформационного охлаждения при ТМО представлены на Рисунке 8, а.

При использовании ТМО с поздним интенсивным охлаждением в микроструктуре микролегированной ниобием (0,035%) стали получена М/А-составляющая в количестве до 4-5 %. На Рисунке 8, б-в приведены зависимости, отражающие влияние на долю М/А времени между окончанием прокатки и началом позднего интенсивного охлаждения («воздушной паузы»), а также температуры завершения охлаждения (смотки полосы).

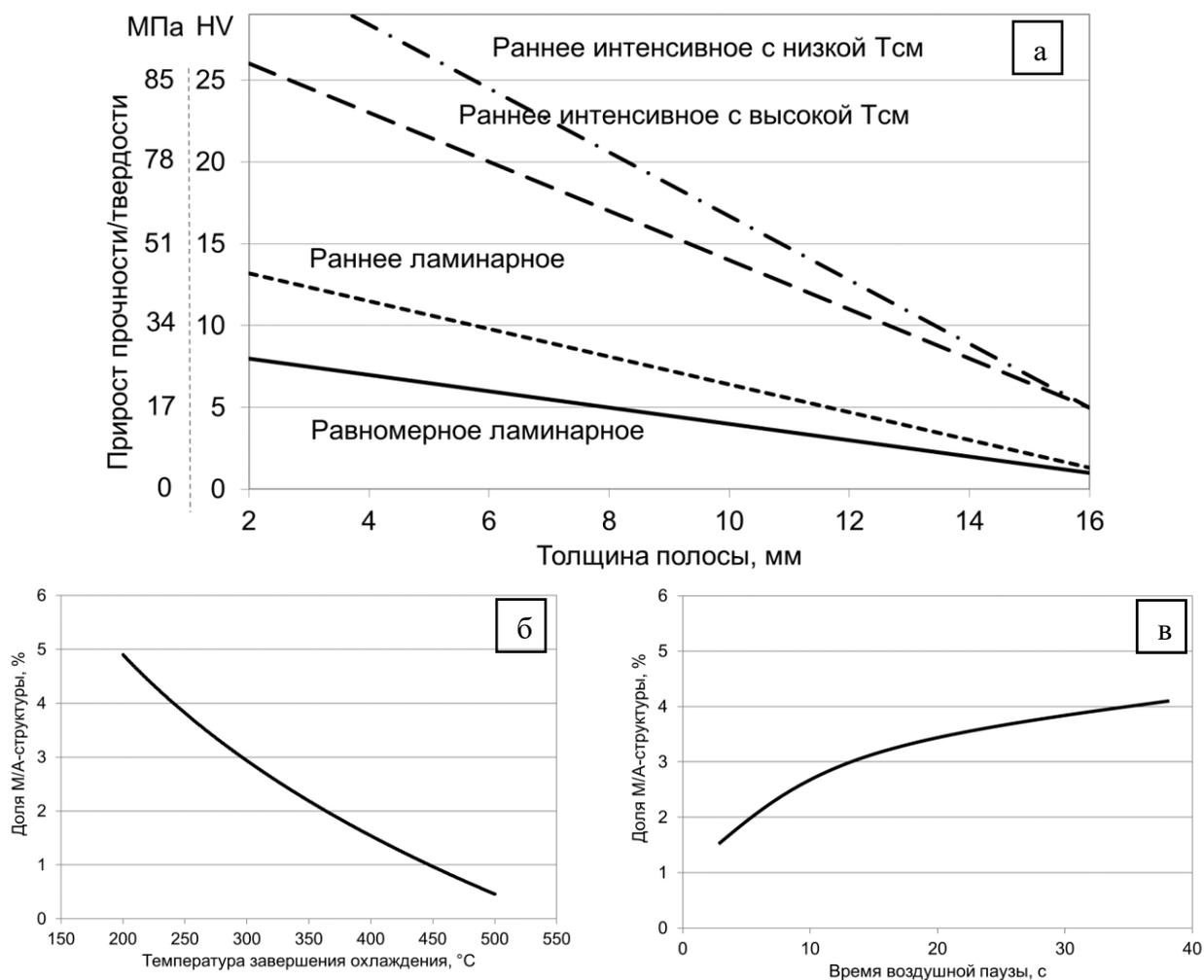


Рисунок 8. Влияние стратегий охлаждения на твердость и расчетное временное сопротивление проката различной толщины из исследуемых сталей (а), влияние температуры завершения охлаждения (б) и времени «воздушной паузы» (в) на долю М/А-составляющей в микроструктуре стали

Пятая глава посвящена описанию области применения новых технологий ТМО, внедрению данных технологий и оборудования для их реализации на стане 1950 ЛПК АО «ВМЗ».

Выше показано, что для получения требуемой микроструктуры, а значит и комплекса механических свойств (прочности и хладостойкости) в горячекатаной полосе из низкоуглеродистых микролегированных сталей могут использоваться

различные схемы ТМО (КП и РП), том числе с ускоренным и интенсивным охлаждением (КП+УО, КП+ИО, РП+УО, РП+ИО).

Согласно нормативной документации на прокатную продукцию (в частности, ГОСТ 19281-2014) по требованию потребителя устанавливаются характеристики исполнения проката. К ним относят класс прочности и категории поставки. Разные варианты ТМО могут обеспечивать различные классы прочности и категории в зависимости от применяемого микролегирования. На основании проведённых исследований влияния температурно-деформационных режимов прокатки на механические свойства и с учетом возможностей модернизированного оборудования в работе предложены схемы ТМО в зависимости от требований к механическим свойствам готовой продукции, которые обобщены в Таблице 1 и описаны далее по тексту.

Обеспечение уровня хладостойкости при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ возможно и без микролегирования стали, при этом стабильные свойства для класса прочности К50 будут обеспечиваться сочетанием РП+УО, для К52 рекомендуется использование РП+ИО. Получение хладостойкости при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ для классов прочности К56-К60 без микролегирования осуществить сложно. Использование микролегирования ванадием позволяет по технологии РП+УО обеспечить требования к испытаниям на ударный изгиб при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ на К50-К52, а для К56 и К60 целесообразно использовать РП+ИО.

Таблица 1.

Рекомендуемые схемы производства проката исследуемых марок стали в зависимости от механических характеристик

Температура испытаний на ударную вязкость (КСУ), $^{\circ}\text{C}$	Микролегирование	Класс прочности			
		К50 (345)	К52 (375)	К56 (390)	К60 (440)
-20	Без м\л	РП+УО	РП+ИО	-	-
	+ V	РП+УО	РП+УО	РП+ИО	РП+ИО
	+ Nb	КП+УО	КП+УО	КП+УО	КП+УО
-40	Без м\л	РП+ИО	-	-	-
	+ V	РП+УО	РП+ИО	-	-
	+ Nb	КП+УО	КП+УО	КП+УО	КП+УО
-60	Без м\л	-	-	-	-
	+ V	-	-	-	-
	+ Nb	КП+УО	КП+УО	КП+УО	КП+УО

Для обеспечения уровня хладостойкости при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ без микролегирования рекомендуется применять РП+ИО для класса прочности К50, а с добавлением ванадия до К52. Обеспечение требуемых вязкостных характеристик при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ без микролегирования или с микролегированием ванадием невозможно. При этом для всех категорий и классов прочности допускается использование КП+УО для сталей, микролегированных ниобием (в содержаниях, обеспечивающих отсутствие рекристаллизации в чистой стадии). Однако применение данного варианта может быть нецелесообразным из-за повышенных нагрузок при чистой прокатке, высокой себестоимостью и/или ограничений в поставках ниобия. Проведённые в лабораторных и промышленных условиях исследования показали, что использование

интенсивного охлаждения позволяет по сравнению со стандартным ламинарным снизить содержание марганца в стали на 0,1 % или эквивалентное содержанию марганца массовую долю иных элементов без потери в механических свойствах.

Для реализации режимов ТМО в более широких диапазонах технологических параметров разработаны рекомендации и по ним реализованы следующие мероприятия:

- установлены модернизированные муфты привода черновых клетей стана 1950 ЛПК с усиленными элементами конструкции (увеличена толщина стенки корпуса), что позволяет увеличить обжатия в первых клетях для более эффективного измельчения литой структуры) – Рисунок 9, а;

- установлены 4 секции интенсивного охлаждения общей длиной 9,28 метра после измерительного блока на выходе из чистой группы клетей на отводящем рольганге стана 1950 ЛПК (позволяет реализовать схемы КП+ИО и РП+ИО) – Рисунок 9, б.



Рисунок 9. Общая вид модернизированного оборудования (а – муфта с усиленными элементами, б – участок интенсивного охлаждения)

В ходе горячих испытаний новых секций интенсивного охлаждения достигнуты следующие показатели: фактическая скорость охлаждения для полос толщиной 6 мм составила $82 \div 86$ °C/с; для 9,2 мм – $60 \div 70$ °C/с; для 9,6 мм – $56 \div 61$ °C/с. Разработан способ производства рулонной полосы на многоклетьевом широкополосном стане, обеспечивающий высокое качество горячекатаной полосы (патент № 2686504 С1), в патенте описано применение термомеханической обработки с интенсивным охлаждением.

В рамках диссертации разработано 16 технологий производства проката толщиной до 12,7 мм из низкоуглеродистых сталей классов прочности от 345 (К48) до 440 (К60) по которым произведено свыше 70 тысяч тонн готовой продукции. В период с 2020 по 2022 год с использованием новой технологии ТМО+ИО произведено около 43,5 тыс. тонн экономнолегированного рулонного проката строительного и трубного назначения (09Г2С, К48-К60). Экономический эффект от внедрения составил 50 млн. руб.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Показано, что для проработки крупной литой структуры сляба на ЛПК требуется обеспечение больших единичных обжатий в первом проходе прокатки. Минимальная степень деформации, необходимая для измельчения зерна

аустенита размером от 2000 до 5000 мкм при температуре сляба 1150 °С составляет 35 % для безниобиевой стали и 45 % для микролегированной ниобием стали. При прокатке низкоуглеродистых сталей с содержанием ниобия 0,035% рекристаллизационная прокатка эффективно реализуется на станах ЛПК, включающих не более 5-ти клетей, достигается X_{srx} не менее 90 % в диапазоне исследованных суммарных обжатий от 1,43 до 3,60 при температуре начала деформации 1150 °С и при суммарных истинных деформациях от 2,50 до 3,60 при температуре 1030 °С. В стали без микролегирования ниобием рекристаллизационная прокатка реализуется во всём исследованном диапазоне суммарных истинных деформаций и при количестве клетей от 4-х до 7ми при температуре начала деформации 1150 °С и 1030 °С, за исключением суммарных истинных обжатий менее 2 для станов с 6-ю и 7-ю клетями.

2. На ЛПК за счет рекристаллизационной прокатки безниобиевой стали может быть сформирован размер зерна аустенита $D_{y\text{ усл}}=8,5$ мкм, сопоставимый с эффективным размером зерна после контролируемой прокатки ниобиевых сталей $D_{eff}=8,3$ мкм. При 7-8 циклах полной рекристаллизации в безниобиевой стали формируется однородная структура с отношением $d_{max}/d_{cp} = 1,03$ (для КП показатель составляет 1,69). Полученные расчетные данные коррелируют с данными, полученными при исследовании микроструктуры опытно-промышленных партий рулонного проката на стане 1950 ЛПК АО «ВМЗ».

3. Получены коэффициенты уравнения Хензеля-Шпиттеля для определения сопротивления деформации исследуемых низкоуглеродистых сталей, микролегированных ниобием (0,035%) или ванадием (0,1%). Это позволило установить предельные нагрузки при прокатке в черновой группе клетей. Для выполнения условий полной рекристаллизации в первом деформационном проходе проведена модернизация элементов привода (муфты) клетей черновой группы. Предельные ограничения по нагрузкам увеличены с 140-160 % до 180 %, предельные ограничения по углу захвата с 16,2 ° до 17,3 °.

4. В процессе лабораторных исследований влияния режимов ТМО с ускоренными и интенсивным охлаждением на структуру и свойства = низкоуглеродистых сталей установлено, что в зависимости от толщины и исходного химического состава на низкоуглеродистом низколегированном сортаменте может быть реализовано повышение временного сопротивления при использовании интенсивного охлаждения относительно ламинарного охлаждения. В прокате толщиной 6 мм прирост составляет 50 МПа и выше при использовании ТМО с ИО. При использовании ТМО с поздним интенсивным охлаждением низкоуглеродистых низколегированных сталей возможно получение до 4-5% М/А составляющей в микроструктуре при увеличении воздушной паузы между последней деформацией и началом интенсивного охлаждения до 30 секунд и снижении температуры смотки полосы до 300 °С.

5. Определены рекомендации по производству ниобиевых и безниобиевых модификаций марки стали 09Г2С/09Г2С-1 классов прочности от 345 (К50) до 440 (К60) с обеспечением уровня хладостойкости при температурах от -20 °С до -60 °С. Установлена возможность получения проката классов прочности до 375

(K52) с минимальными затратами на легирование. Показано, что с использованием нового технологического приема ТМО (РП+ИО) может быть обеспечен уровень прочности до 440 (K60) и до 375 (K52) с требуемыми вязкостными характеристиками при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Достичь высоких механических характеристик при температуре испытания $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в стали без микролегирования и с микролегированием ванадием невозможно.

6. Проведена модернизация охлаждения на отводящем рольганге стана горячей прокатки 1950 ЛПК АО «ВМЗ», установлены 4 новые секции интенсивного охлаждения (ИО) суммарной длиной 9,28 м. Достигнуты следующие показатели: фактическая скорость охлаждения для полос толщиной 6 мм составила $82\text{--}86\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$; для 9,2 мм – $60\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$; для 9,6 мм – $56\text{--}61\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

В рамках диссертации разработаны новые технологические режимы прокатки и термомеханической обработки полос толщиной до 12,7 мм из низкоуглеродистых сталей классов прочности от 345 (K48) до 440 (K60) по которым произведено свыше 70 тысяч тонн готовой продукции. В период с 2020 по 2022 год с использованием новой технологии ТМО+ИО произведено около 43,5 тыс. тонн экономнолегированного рулонного проката строительного и трубного назначения (09Г2С, K50-K60). Экономический эффект от внедрения составил 50 млн. руб.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. Разработка и освоение технологии производства хладостойкого проката для электросварных труб в условиях литейно-прокатного комплекса АО "ОМК-Сталь" /Солдатов Е.А. [и др.] // Будущее машиностроения России. 2015. С. 352-357.

2. 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.

3. Исследование влияния микролегирования на формирование структуры и комплекса механических свойств рулонного проката класса прочности K52, произведенного в условиях ЛПК /В.В. Науменко [и др.] // Металлург. 2020. № 8. С. 28-35.

4. Влияние параметров интенсивного последедеформационного охлаждения горячекатаной полосы на процессы структурообразования в низкоуглеродистых сталях /Е.А. Солдатов [и др.] // Металлург. 2021. № 1. С. 24- 33.

5. Повышение производительности литейно-прокатного комплекса /В.В. Кислица [и др.] // Металлург, 2022. №. 4. С. 18-24.

6. Способ производства рулонной полосы на широкополосном прокатном стане: патент 2686504 РФ / А. В. Мунтин, В. А. Ерыгин, А. Е. Севидов [и др.]; заявл. 01.10.2018; опубл. 29.04.2019. Бюлл. №13.

7. Soldatov E., Muntin A. Research of the effect of intensive cooling on the characteristics of the hot-rolled strip // METAL 2019 - 28th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. Brno. 2019. P. 821-825.

8. Литейно-прокатный комплекс: микролегирование трубных сталей для производства хладостойкого рулонного проката /В.В. Науменко [и др.] // Развитие технологий производства стали, проката и труб на Выксунской производственной площадке. Сб. тр. под общей ред. А.М. Барыкова. М.: Metallurgizdat. 2016. С. 248-273.

9. Солдатов Е.А., Мунтин А.В. Исследование влияния интенсивного охлаждения на характеристики широкополосного проката // Труды XII Конгресса прокатчиков (том I). Москва: ООО Грин Принт. 2019. С. 37-41.

10. Способ производства горячекатаного хладостойкого проката: патент 2768396 РФ / Л. И. Эфрон, А. В. Мунтин, Е. А. Солдатов [и др.]; заявл. 28.12.2020; опубл. 24.03.2022. Бюлл. №9.