

На правах рукописи

УДК 669.14.018.41:669.017:621.771.016

ГРНТИ 53.49.13



КОНДРАТЬЕВ НИКИТА АНДРЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ТОЛЩИНОЙ 5-15 ММ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОЙ
ХЛАДОСТОЙКОЙ СТАЛИ С ПРЕДЕЛОМ ТЕКУЧЕСТИ НЕ МЕНЕЕ 460 МПа
ДЛЯ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ**

Специальность 2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Научный руководитель:

Хлусова Елена Игоревна доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Вологжанина Светлана доктор технических наук, доцент, Федеральное
Антониновна государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский Горный
Университет императрицы Екатерины II», г. Санкт-Петербург

Воркачев Константин кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Григорьевич Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова
Российской академии наук», г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский технологический университет «МИСиС»,
г. Москва

Защита состоится **«20» мая 2026 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета 75.1.018.01, созданного на базе Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И. В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», по адресу: 191015, г. Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, дом 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» и на сайте:

<http://dissovet.cris-m-prometey.ru/ThesisDetails.aspx?id=52>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 75.1.018.01
доктор технических наук, профессор

Е. И. Хлусова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. С каждым годом в различных отраслях промышленности растет потребность в высокопрочном листовом прокате небольших толщин, в том числе и в судостроении. С повышением прочности снижается металлоемкость сварных конструкций: корпусов судов и кораблей, стрел грузоподъемных кранов, башен ветроэнергетических установок и т.д. В судостроении уменьшение массы корпуса – одна из важнейших проблем в настоящее время. Добиться высокой эффективности транспортных судов во время эксплуатации можно за счет увеличения количества перевозимого груза за один рейс. Для перечисленных объектов требуются листы толщиной от 5 до 15 мм из стали высокой прочности. Производство листового проката толщиной от 8 до 15 мм на сегодняшний момент реализуется преимущественно на реверсивных станах горячей прокатки с последующей термообработкой. При этом производство листов толщиной 8-15 мм на реверсивных станах ограничивает производительность ввиду необходимости использовать подкат промежуточной толщины и увеличивает энергозатратность процесса. Производство листов толщиной от 5 до 7,5 мм из судостроительной стали уровня прочности более 460 МПа на непрерывных широкополосных станах горячей прокатки (НШСГП) в России отсутствует. Продукция до настоящего времени приобреталась за рубежом, но часто не отвечала требованиям по изотропности механических свойств, в первую очередь, ударной вязкости на образцах, вырезанных вдоль и поперек направления прокатки.

В 20 веке в стране листовый прокат небольших толщин из судостроительной высокопрочной стали производился в основном на украинских заводах, затем эти технологии были утрачены и до настоящего времени не восстановлены. Преимущественной технологией для получения высокопрочного листового проката на непрерывных станах является термомеханическая обработка (с этапом высокоскоростной деформации) с ускоренным охлаждением (ТМО) и последующей смоткой в рулон. Такая технология реализована, например, для штрипса классов прочности X70-X80, из которого изготавливают спиралешовные трубы, для некоторых марок строительной стали. Особенностью прокатки на непрерывных станах является высокая скорость деформации и непрерывность процесса от момента выхода сляба из нагревательной печи и до получения методом термомеханической обработки рулона весом 12-40 тонн, который до момента порезки его на листы остывает затем медленно. Значительный вклад в создание технологии ТМО, в том числе на непрерывных станах горячей прокатки, низколегированных сталей для труб, карьерной, дорожно-строительной и сельскохозяйственной техники внесли Матросов Ю.И., Литвиненко Д.А., Погоржельский В. И, Морозов Ю.Д., Эфрон Л.И., Настич С.Ю., DeArdo A.J., Gray J.M., Kozasu I., Tamura I., Tanaka T. и другие ученые.

Однако вопросы производства листового проката небольших толщин применительно к сталям судостроительного назначения все еще не решены, а наиболее проблемными

моментами являются равномерность механических свойств по длине рулона, анизотропия структуры, коробление, особенно кромок, листов из высокопрочной стали при прокатке и смотке в рулон, которое появляется в результате неравномерного распределения температур по площади и по толщине.

В связи с этим с целью создания производства листового проката для морской техники на российских предприятиях и импортозамещения для других отраслей появилась необходимость в разработке технологии производства на непрерывных станах горячей прокатки листов небольших толщин (5-15 мм) из хладостойкой стали с пределом текучести 460 МПа и выше.

Для получения стали с пределом текучести 460 МПа и выше необходимо создать условия для образования ферритно-бейнитной, бейнитной или бейнитно-мартенситной структуры. При повышении прочности стали возникает проблема в сохранении высоких показателей пластичности и ударной вязкости материала при низких температурах. Обеспечение повышенной хладостойкости происходит за счет измельчения зерна, добавления никеля и микролегирующих элементов, повышения металлургического качества металла и многих других факторов. Стоит учитывать, кроме того, что экономическая целесообразность - это показатель, без которого невозможна организация нового производства. Поэтому при изготовлении листового проката толщиной 5-15 мм из высокопрочных хладостойких сталей от термической обработки следует отказаться, а при использовании термомеханической обработки важен рациональный подход к подбору технологии и химического состава.

В связи с этим **целью диссертационной работы** является разработка технологических режимов производства листового проката толщиной 5-15 мм из высокопрочной хладостойкой стали с пределом текучести не менее 460 МПа для морской техники на основании имитационного моделирования, их опробование в лабораторных условиях и разработка рекомендаций для промышленного производства.

В процессе выполнения работы **поставлены и решены следующие задачи:**

1. Разработка требований к листовому прокату толщиной 5-15 мм из стали с гарантированным пределом текучести 460, 500, 550, 620 и 690 МПа.

2. Разработка научно-обоснованных решений для создания технологии производства листового проката толщиной 5-15 мм на основе имитационного моделирования и определение влияния технологических параметров на формирование конечной микроструктуры:

- исследование фазовых превращений;
- исследование процессов динамической рекристаллизации в зависимости от температуры и скорости деформации;
- исследование процессов структурообразования при горячей пластической деформации и ускоренном охлаждении при имитационном моделировании

отдельных этапов и сквозного технологического процесса на дилатометре с возможностью сжатия и пластометре «Gleeble 3800».

3. Изготовление опытных образцов листового проката толщиной 5-15 мм на лабораторных станах «Дуо-600» и «Кварто 800».

4. Определение взаимосвязи структуры с механическими свойствами стали и сопротивлением хрупкому разрушению и оценка качества листового проката.

5. Опробование производства листового проката толщиной 8-15 мм в промышленных условиях и оценка его качества.

6. Разработка методических указаний для имитационного моделирования технологического процесса изготовления листового проката на непрерывном стане горячей прокатки.

7. Разработка рекомендаций для адаптации разработанных технологических режимов к промышленному производству на непрерывном стане.

Объект исследования: низкоуглеродистая низколегированная и легированная судостроительная сталь марок 07Г2НФБ и 09ХН2МД(Ф)Б.

Положения, выносимые на защиту:

1. Особенности влияния высокоскоростной горячей пластической деформации, характерной для непрерывных станов горячей прокатки, на фазовые превращения и структурообразование в листовом прокате марганцевоникелевой и хромникельмолибденовой стали.

2. Принципы назначения технологических параметров изготовления листового проката толщиной 5-15 мм для получения хладостойкой стали с гарантированным пределом текучести 460, 500, 550, 620 или 690 МПа на непрерывном стане горячей прокатки.

3. Влияние ключевых технологических параметров на структуру и механические свойства листового проката толщиной 5-15 мм из высокопрочной хладостойкой стали.

4. Разработанные опытные технологии для имитации изготовления листового проката на непрерывном стане горячей прокатки, позволяющие обеспечивать формирование необходимой микроструктуры и комплекса механических свойств.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Установлено, что из стали марганцевоникелевой композиции легирования 07Г2НФБ ($C_{\text{эКВ}}$: 0,35-0,45 %) может быть получен листовой прокат толщиной 5 мм уровня прочности 460-690 МПа. Для листового проката толщиной 7 мм с целью получения проката уровня прочности 500-690 МПа следует использовать сталь хромникельмолибденовой композиции легирования на базе марки 09ХН2МД ($C_{\text{эКВ}}$: 0,44-0,54 %).

2. Показано, что деформация 30% со скоростью 10 с^{-1} в аустенитной области увеличивает после охлаждения со скоростями 20-30 °С/сек до температур 650-570°С долю превращенного аустенита в стали 09ХН2МД, микролегированной ниобием, ускоряя

превращение в верхней области бейнитного интервала сильнее, чем в стали, микролегированной ванадием.

3. Исследование влияние скорости деформации (1, 5 и 10 с⁻¹) на процессы динамической рекристаллизации (ДР), показало, что однократная деформация в диапазоне от 26 до 34 % способствует её протеканию при скоростях до 5 с⁻¹ и температурах деформации от 1200 до 1150 °С для стали марок 07Г2НФБ и 09ХН2МДБ. Однако достижение таких деформаций на первых трех проходах на высокотемпературной стадии при непрерывной прокатке не реализуемо, что не позволяет обеспечить измельчение аустенитного зерна за счет ДР.

4. Показано, что при понижении температуры ускоренного охлаждения с 650-600 до 550-500 °С структура стали 09ХН2МДБ изменяется с неоднородной ферритно-перлитно-бейнитной до бейнитной реечной и гранулярной морфологии, а твердость повышается на ~15%. После ускоренного охлаждения до 650-600 °С снижение скорости замедленного охлаждения от 0,070 до 0,025 °С/с, характерной для внешних и внутренних витков рулонного проката, соответственно, приводит к увеличению доли феррита и понижению твердости на 10-11 HV₁₀, тогда как после ускоренного охлаждения до 550-500 °С твердость не изменяется.

5. Сформулированы принципы назначения технологических параметров изготовления листового проката толщиной 5-15 мм для получения хладостойкой стали марки 09ХН2МДБ с гарантированным пределом текучести 460, 500, 550, 620 или 690 МПа на непрерывном стане: температура горячей пластической деформации на высокотемпературной стадии прокатки 1000-1100 °С позволяет формировать аустенит с размером зерна ~20-30 мкм, снижая его устойчивость к последующему фазовому превращению в бейнитной области, температура завершения горячей пластической деформации определяет соотношение бейнита различных морфологий, а изменение температуры конца и скорости ускоренного охлаждения позволяет изменять соотношение (феррита, гранулярного и реечного бейнита) и размер структурных составляющих (зерен феррита и пакетно-блочной структуры бейнита).

Практическая значимость работы заключается в следующем.

Разработаны научно-технологические основы изготовления листового проката толщиной 5-15 мм из высокопрочной хладостойкой стали с пределом текучести 460-690 МПа на непрерывных станах горячей прокатки с реверсивной и непрерывной клетями.

Разработаны методические указания для имитационного моделирования технологического процесса изготовления листового проката на непрерывном стане горячей прокатки (оформлен акт внедрения в учебный процесс СПбПУ Петра Великого).

Опробовано с положительными результатами изготовление листового проката из стали высокой прочности (с гарантированным пределом текучести 460, 500, 550, 620 и 690 МПа) толщиной 5-7 мм на лабораторных станах горячей прокатки путем имитационного

моделирования технологического процесса непрерывной прокатки, а также толщиной 8-15 мм с гарантированным пределом текучести 690 МПа в промышленных условиях на реверсивном стане горячей прокатки.

Достоверность положений, выводов и рекомендаций диссертации подтверждена:

- большим объемом проведенных лабораторных, опытных экспериментов и проанализированных данных, на основании которых сделаны научные выводы и разработаны требования к структуре и технологические режимы для опытного производства листового проката;

- высокой воспроизводимостью результатов исследований, полученных в лабораторных условиях с использованием пластометра «Gleeble-3800», верифицированных в опытных условиях;

- применением взаимодополняющих апробированных методик исследования структуры (оптической металлографии, растровой, в том числе с использованием EBSD-анализа, и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ));

- проведением испытаний в аккредитованных лабораториях.

Личный вклад автора в получении научных результатов, изложенных в диссертации, заключается в:

- постановке задачи и определении методов проведения экспериментальных исследований;

- разработке требований к листовому прокату толщиной от 5 до 15 мм уровня прочности не менее 460 МПа;

- исследовании фазовых превращений в марганцевоникелевой и хромоникельмолибденовой стали при высокоскоростной деформации в аустенитной области;

- изучении особенностей структур, формирующихся в марганцевоникелевой и хромоникельмолибденовой стали при высокоскоростной термомеханической обработке;

- разработке технологических режимов ТМО для изготовления опытной партии;

- анализе и обработке полученных результатов, разработке рекомендаций для опытно-промышленного производства.

Основные результаты работы были представлены на международных научно-технических конференциях, форумах и семинарах: VIII и X Всероссийском молодежном научном форуме «Open Science», 2021 и 2023 г., НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина; XIX, XX и XXII Конференциях молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии», 2022, 2023 и 2025 г., НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург; Конференции «Корабельная наука» в СПбГМТУ, 2022 г., Санкт-Петербург.

Основное содержание работы опубликовано в 9 печатных работах, в том числе 3 статьях в изданиях, **рекомендованных** перечнем **ВАК**, **1 публикация** издана на английском языке и индексируется в **базе данных SCOPUS**.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 186 наименований и 2 Приложений. Основной текст изложен на 226 страницах, содержит 104 рисунка и 42 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи проведенных исследований, научная новизна работы и положения, вынесенные на защиту, теоретическая и практическая значимость работы, описан личный вклад соискателя, приведены сведения о достоверности и апробации полученных результатов.

Первая глава посвящена литературному обзору, в котором на основании опубликованных данных проведен анализ рынка российских и зарубежных производителей листового проката толщиной от 5 до 15 мм класса прочности 460 МПа и выше. Отмечено, что преимущественно используют сталь марганцевой композиции легирования с небольшими добавками хрома, меди и молибдена и микролегированием ванадием, ниобием и титаном.

Выполнен анализ российского и зарубежного опыта производства сталей уровня прочности от 460 МПа и выше на основании литературных данных и патентных исследований. Отмечено, что основными технологическими параметрами, определяющими свойства горячекатаной стали, наряду с химическим составом являются температура нагрева под прокатку, температура конца чистовой прокатки, скорость деформации, скорость охлаждения в установке ламинарного типа и температура смотки рулонного проката. Проведен анализ влияния технологических параметров на структуру и свойства листового проката. Рассмотрено современное оборудование для производства листового проката небольших толщин.

Результаты выполненного анализа послужили основанием для постановки цели работы и задач исследования.

Вторая глава посвящена обоснованию выбора исследованных сталей и описанию методов исследований, использованных автором при выполнении диссертационной работы. Химический состав исследованных сталей приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых марок стали

№ п/п	Сталь	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni+Cu	Mo	Nb	V	Ti	N	Al	C _{экв}
		Масс. %													
1	07Г2НФБ (1)	0,07	0,28	1,25	0,001	0,006	0,02	0,79	0,04	0,035	0,023	0,005	0,005	0,05	0,35
2	07Г2НФБ (2)	0,07	0,35	1,50	0,005	0,040	0,09	1,06	0,08	0,040	0,03	–	0,007	0,050	0,42
3	09ХН2МДБ (1)	0,08	0,25	0,49	0,001	0,003	0,48	1,89	0,21	0,030	–	0,001	0,008	0,03	0,44
4	09ХН2МДБ (2)	0,09	0,26	0,47	0,002	0,007	0,42	2,42	0,26	0,030	–	0,0025	0,005	0,034	0,47
5	09ХН2МДФ	0,09	0,20	0,48	0,002	0,006	0,48	2,59	0,33	–	0,04	0,0026	0,005	0,050	0,51

В **третьей главе** разработаны требования к химическому составу, механическим свойствам и характеристикам работоспособности листового проката толщиной 5-15 мм из стали уровня прочности 460, 500, 550, 620 и 690 МПа, предназначенной для эксплуатации в арктических условиях, удовлетворяющие требованиям ГОСТ Р 52927-2023 на поставку судостали и «Правил классификации и постройки морских судов» Российского морского регистра судоходства. Дополнительно для контроля анизотропии структуры работу (энергию) удара необходимо определять на образцах, вырезанных как поперек, так и вдоль направления прокатки, для определения технологичности в судокорпусном производстве – проводить испытания на излом и холодный изгиб полнотолщинных проб.

Изучены фазовые превращения в представленных сталях под влиянием горячей пластической деформации в аустенитной области, в том числе при высоких скоростях деформации (0,01 и 10 с⁻¹), и процессы структурообразования при варьировании ключевых технологических параметров (при имитационном моделировании однократной горячей пластической деформации).

В диапазоне скоростей охлаждения от 20 до 30 °С/сек, характерных для охлаждения листового проката толщиной от 5 до 15 мм в установке ускоренного охлаждения ламинарного типа, в стали марки 07Г2НФБ формируется ферритно-бейнитная структура с различным соотношением структурных составляющих, рисунок 1, а.

В стали марки 09ХН2МД, микролегированной ниобием или ванадием, формируется бейнитная структура со смесью бейнита реечной и гранулярной морфологии. При этом в стали марки 09ХН2МД, микролегированной ниобием, по сравнению со сталью, микролегированной ванадием, после деформации в аустенитной области с высокой скоростью 10 с⁻¹ образуется преимущественно бейнит гранулярной морфологии, а температуры начала и конца бейнитного превращения находятся выше на 20-30 °С, рисунок 1, б.

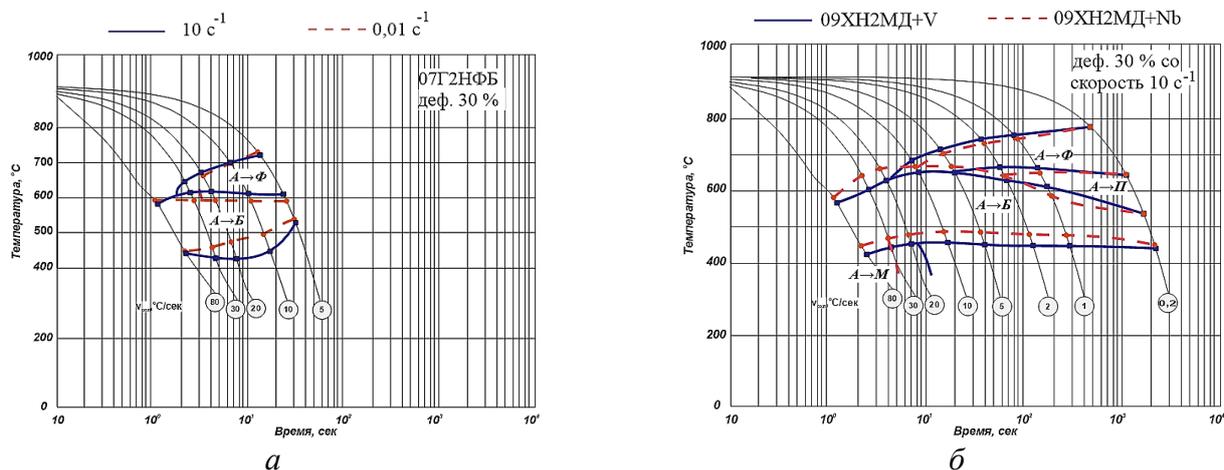


Рисунок 1 – Влияние скорости деформации в аустенитной области на фазовые превращения при непрерывном охлаждении в стали марки 07Г2НФБ (а) и влияние микролегирующих добавок (Nb и V) на фазовые превращения в стали марки 09ХН2МД после деформации со скоростью 10 c^{-1} при $T = 930 \text{ }^\circ\text{C}$ со степенью 30 % (б)

Установлено, что повышение скорости деформации в аустенитной области в стали марки 07Г2НФБ способствует увеличению скорости фазовых превращений после охлаждения со скоростью 20 °C/сек в области формирования речного бейнита, тогда как после охлаждения со скоростью 30 °C/сек она снижается, что может иметь значение для формирования структуры листов разных толщин, рисунок 2, а, б. При этом основное превращение протекает при температурах $\sim 500\text{-}525 \text{ }^\circ\text{C}$.

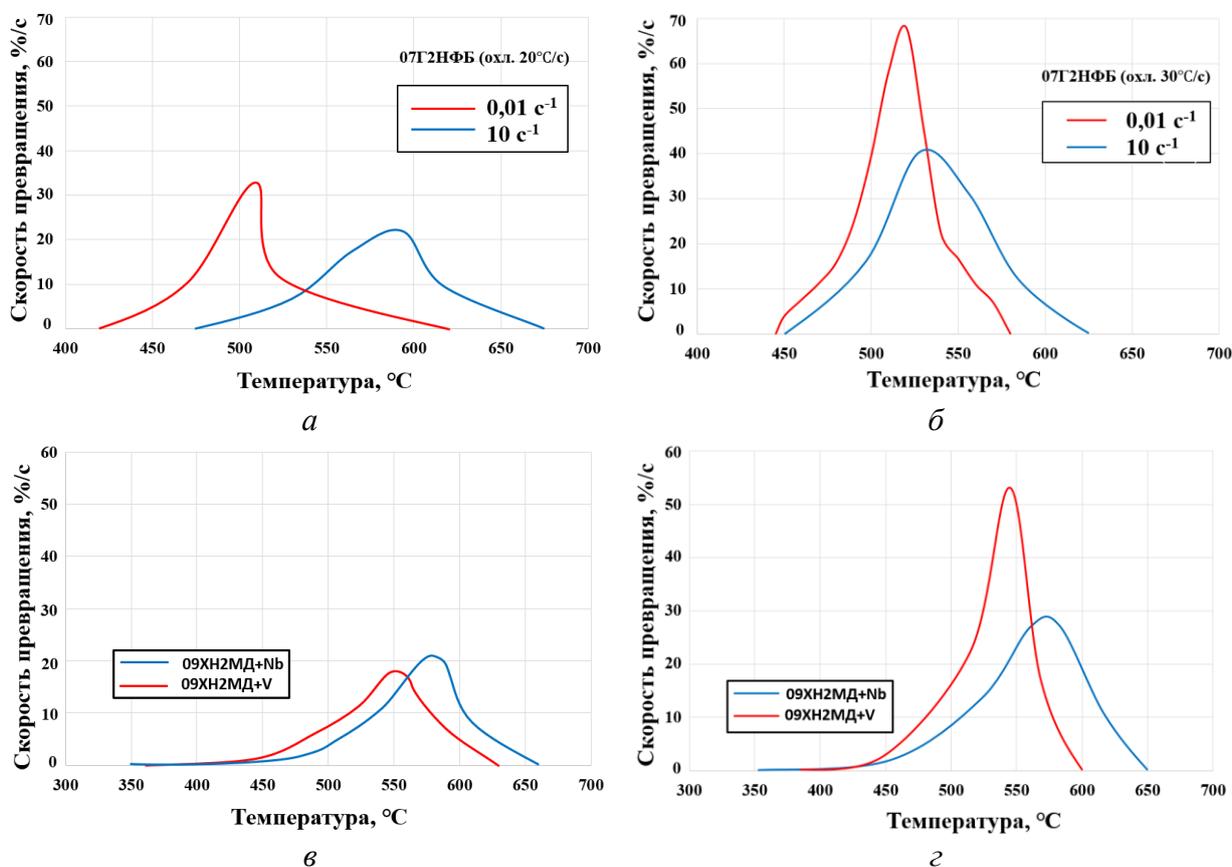


Рисунок 2 – Влияние скорости деформации в аустенитной области для стали марки 07Г2НФБ (а, б) и влияние микролегирования (Nb и V) стали марки 09ХН2МД (после деформации 10 c^{-1}) (в, г) на скорость фазовых превращений после охлаждения со скоростями 20 °C/сек (а, в) и 30 °C/сек (б, г)

Показано, что после деформации 30 % со скоростью 10 с^{-1} в аустенитной области и охлаждения $20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{сек}$ скорость превращения в стали 09ХН2МДБ в области формирования гранулярного бейнита выше, тогда как после охлаждения со скоростью $30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{сек}$ она снижается, что также может иметь значение для формирования структуры листов разных толщин, рисунок 2, в, г. Для стали 09ХН2МДФ основное превращение протекает при более низких температурах $\sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$, а скорость превращения, наоборот, выше после охлаждения со скоростью $30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{сек}$. Изменение системы микролегирования хромоникельмолибденовой стали способствует изменению соотношения бейнита реечной и гранулярной морфологии, что позволит варьировать требуемые прочностные характеристики.

На основе изучения влияния высокоскоростной горячей деформации в аустенитной области и микролегирования показано, что для получения заданной преимущественно бейнитной структуры в листах указанной толщины могут быть использованы марганцевоникелевая сталь марки 07Г2НФБ и хромоникельмолибденовая сталь марки 09ХН2МДБ.

По литературным данным определено, что резкий рост аустенитного зерна для стали 07Г2НФБ (с комплексным микролегированием ниобием и ванадием) начинается при температуре $1250 \text{ }^\circ\text{C}$. Для стали марки 09ХН2МД, микролегированной ниобием, эффект сдерживания роста аустенитного зерна при нагреве больше примерно в 2-3 раза по сравнению с микролегированием ванадием, однако резкий рост аустенитного зерна для стали марки 09ХН2МД, микролегированной ниобием, также наблюдается при температурах выше $1250 \text{ }^\circ\text{C}$, что позволяет применить обе марки стали для опробования технологических режимов обработки на непрерывных станах горячей прокатки, для которых характерны высокие температуры нагрева под прокатку.

Из-за совокупности факторов (большое аустенитное зерно при нагреве до высоких температур, а также образование большого количества реечного бейнита в стали, микролегированной ванадием) применение стали марки 09ХН2МДФ для опробования технологических режимов, характерных для непрерывных станов горячей прокатки, признано нецелесообразным для получения стали в широком диапазоне прочности.

Исследования динамической рекристаллизации при разных температурах (1100 , 1150 и $1200 \text{ }^\circ\text{C}$) и скоростях деформации (1 , 5 и 10 с^{-1}) для стали марганцевоникелевой и хромоникельмолибденовой композиции легирования марок 07Г2НФБ и 09ХН2МДБ показали, что пороговая степень динамической рекристаллизации при температурах 1200 и $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет примерно $26-34 \%$ и $30-33 \%$ соответственно, что не реализуемо на первых трех проходах горячей прокатки на непрерывном стане (в реверсивной клетки), следовательно, преимущественным процессом формирования аустенитного зерна на черновой стадии прокатки будет статическая рекристаллизация.

Исследование структурообразования в стали марки 09ХН2МДБ позволило определить оптимальный температурный диапазон горячей пластической деформации в черновых клетях непрерывного стана. Установлено, что наиболее мелкозернистая аустенитная структура со средним размером бывшего аустенитного зерна ~ 19 мкм формируется в стали марки 09ХН2МДБ после однократной деформации со степенью 50 % при температурах 1100-1000 °С.

Наиболее рациональными температурами конца ускоренного охлаждения (смотки) для стали марки 09ХН2МДБ после имитации горячей деформации при температурах 1000-950 °С (при температурах чистовой стадии прокатки) со степенью 50 %, способствующей измельчению аустенитного зерна, являются 500-550 °С, что позволяет получить близкие структурные составляющие с развитым субзерненным строением с характерным размером 4-5,8 мкм (при угле толерантности 5°) после замедленного охлаждения со скоростями 0,07 и 0,025 °С/с, характерными для охлаждения внешних и внутренних витков рулона после смотки, рисунок 3.

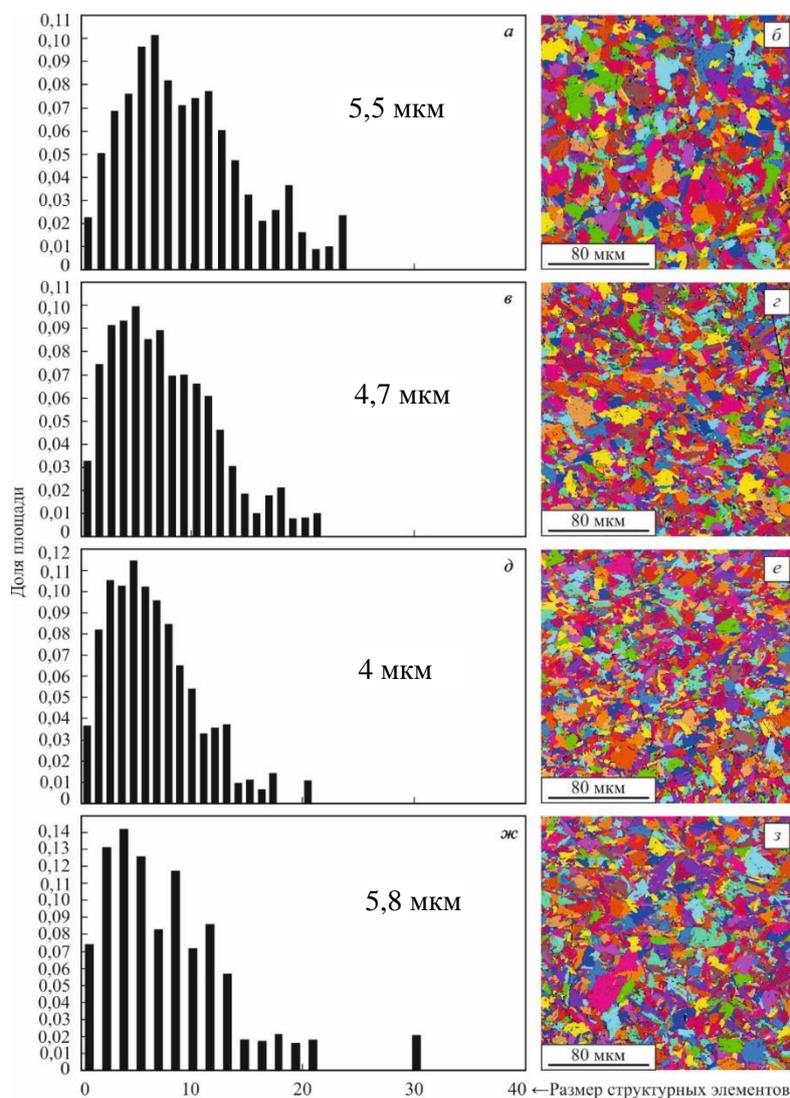


Рисунок 3 – Гистограммы распределения значений структурных элементов по размерам при угле толерантности 5° (а, в, д, ж) и карты зерен (б, г, е, з) образцов из стали марки 09ХН2МДБ после охлаждения до температуры 550 °С (а-г) и 500 °С (д-ж) со скоростью 0,070 °С/с (а, б, д, е) и 0,025 °С/с (в, г, ж, з)

Установленные закономерности позволяют выполнить имитационное моделирование сквозного технологического процесса.

В четвертой главе проведено имитационное моделирование полного цикла производства листового проката толщиной от 5 до 15 мм на пластометре «Gleeble-3800», соответствующее термомодеформационной обработке с ускоренным и последующим замедленным охлаждением на непрерывном стане горячей прокатки.

Промышленный цикл горячей прокатки на непрерывных станах характеризуется дробной деформацией, при которой в каждом проходе происходят специфические структурно-фазовые изменения, а наиболее высокие скорости деформации достигаются на этапе чистовой прокатки. По режимам из таблицы 2 рассмотрено влияние накопленной деформации на процессы структурообразования для определения параметров высокоскоростной термомодеформационной обработки, позволяющей сформировать заданную структуру.

Таблица 2 – Режимы имитационного моделирования горячей пластической деформации полного цикла с ускоренным охлаждением

№ режима	$T_n, ^\circ\text{C}$	Время выдержки, сек	Охлаждение со скоростью $50 ^\circ\text{C}/\text{c}$ до темп. начала горячей деформации, $^\circ\text{C}$	Темп. конца горячей деформации, $^\circ\text{C}$	Схема деформации (по проходам), %	Скорость деформации на соответствующих проходах, c^{-1}
1	1250	240	1100	1050	25-25-25 (суммарная деф. 56 %)	2-4-8
2						
3						
4						
5					10-22-30 (суммарная деф. 51 %)	
6						
7						
8						

Продолжение табл. 2

№ режима	Температура начала деформации при заторможенной рекристаллизации, $^\circ\text{C}$	Температура конца деформации, $^\circ\text{C}$	Схема деформации (по проходам), %	Скорость деформации на соответствующих проходах, c^{-1}	Охлаждение со скоростью $20 ^\circ\text{C}/\text{c}$ до температуры ускоренного охлаждения, $^\circ\text{C}$	Замедл. охл., $^\circ\text{C}/\text{c}$
1	1000	$A_{r3}+240$	21-10-11 (суммарная деф. 36,5 %)	20-40-70	550	0,07
2					500	
3	1000	$A_{r3}+240$	30-20-12 (суммарная деф. 50,7 %)		550	0,07
4		$A_{r3}+190$				
5		$A_{r3}+140$				
6		$A_{r3}+240$				
7	950	$A_{r3}+190$				
8		$A_{r3}+140$				

Определено, что в стали марки 09ХН2МДБ реализация схем деформации, приближенных к промышленным, приводит к укрупнению (в 2-3 раза) элементов структуры по сравнению с однократной деформацией, что, скорее всего, связано с развитием процессов статической рекристаллизации, рисунок 4.

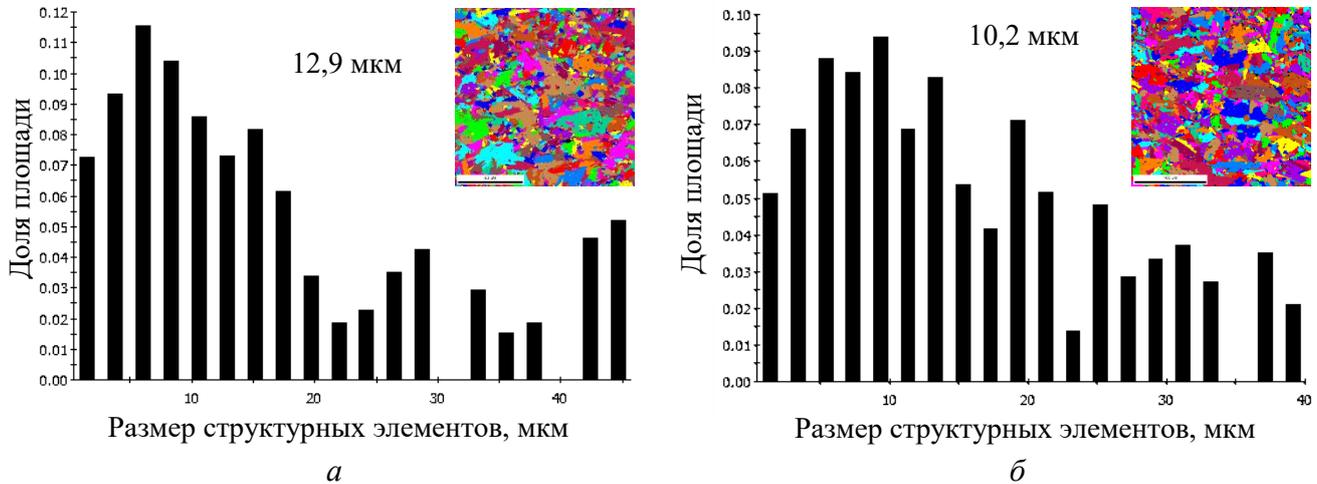


Рисунок 4 – Гистограммы распределения значений структурных элементов по размерам при угле толерантности 5° для образцов, обработанных по режимам № 1 (а) и № 2 (б)

Установлено, что после термодформационной обработки по режимам №№ 1 и 2 с постоянной схемой обжатий на высокотемпературной стадии прокатки в стали марки 09ХН2МДБ формируется бейнитная структура, рисунок 5, а, б, тогда как в стали марки 07Г2НФБ – ферритно-бейнитная, рисунок 5, в, г. Изменение температуры конца ускоренного охлаждения (T_{y0}) с 550 на 500 °С при постоянной схеме обжатий в стали марки 09ХН2МДБ приводит к существенному повышению в показателях твердости с 231 до 287 HV_{10} , что соответствует уровню прочности 620 и 690 МПа. В стали марки 07Г2НФБ существенных изменений в показателях твердости не было обнаружено, она составляла 186 и 184 HV_{10} (после охлаждения от температуры 550 и 500 °С соответственно).

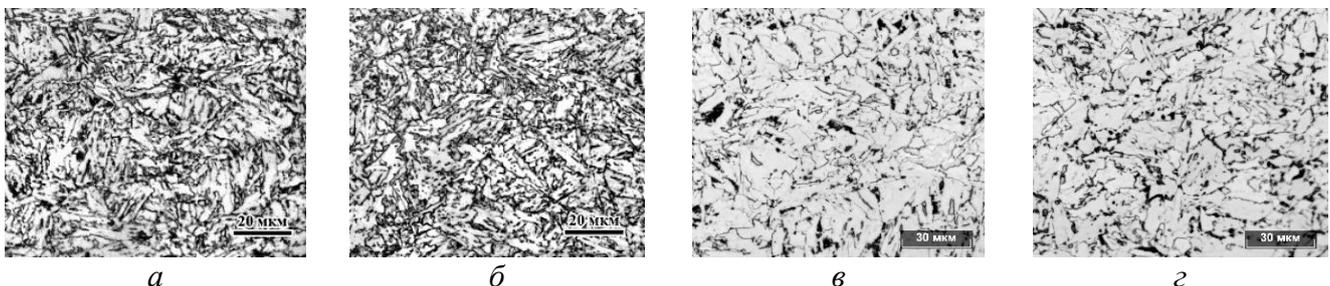
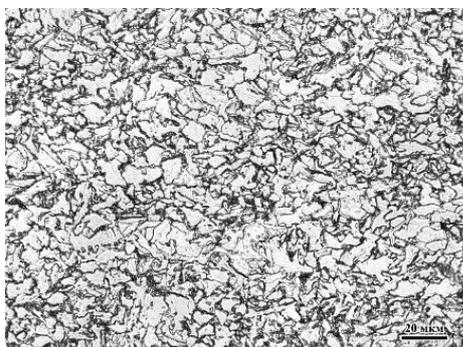


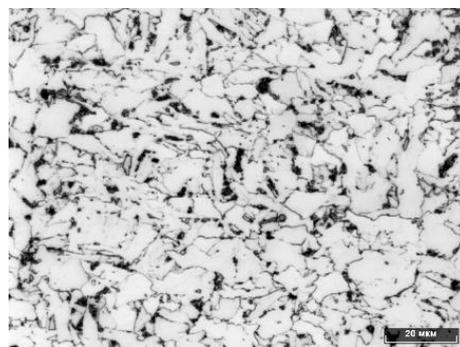
Рисунок 5 – Структура образцов из стали марки 09ХН2МДБ (а, б) и 07Г2НФБ (в, г), обработанных по режимам №№ 1 (а, в) и 2 (б, г)

Определено, что при изменении схемы деформации на черновой стадии прокатки (с постоянной на возрастающую, см. режим № 3 в таблице 2), а также корректировки схемы обжатий на чистовой стадии, структура стали марки 09ХН2МДБ существенно меняется: образуется бейнит преимущественно гранулярной морфологии, что способствует понижению твердости на 38 HV_{10} до 193 HV_{10} и, соответственно, прочность понижается до

500 МПа, рисунок 6, а. При этом структура стали марки 07Г2НФБ и показатели твердости (180 HV₁₀) с изменением схемы деформации не изменяются, рисунок 6, б.



а



б

Рисунок 6 – Структура образцов из стали марки 09ХН2МДБ (а) и 07Г2НФБ (б), обработанных по режиму № 3

Показано, что изменение температуры начала и конца деформации на чистой стадии прокатки (при возрастающей схеме деформации на черновой стадии прокатки) существенно не изменяет фазовый состав как для стали марки 07Г2НФБ, так и для стали марки 09ХН2МДБ.

Установлено, что изменения термомодеформационных схем на черновой и чистой стадиях прокатки (сравнение режимов №№ 1 и 8) приводят к существенным изменениям структуры хромоникельмолибденовой стали, таблица 3.

Таблица 3 – Сводные данные о морфологических параметрах структуры образцов, обработанных по режимам №№ 1 и 8

Характеристика компоненты	Компоненты структуры				
	РБ	ГБ	МА-фаза	Ост. ауст.	КПФ
Режим № 1: 1100→1050°С-(25-25-25)%-1000→A_{r3}+240°С (21-10-11)%					
Объёмная доля, %	65-75	10-20	5-15		–
Размер реек (фрагментов), мкм	1,00	1,1	0,9x1,5	2,3x3,8	–
Плотность дислокаций, ×10 ¹⁴ м ⁻²	1,34	1,46	–	–	–
Режим № 8: 1100→1050°С-(10-22-30)%-950→A_{r3}+140°С (30-20-12)%					
Объёмная доля, %	5-15	65-75	5-10		≤ 10
Размер реек (фрагментов), мкм	1,8	1,7	0,9x1,8	0,7x1,2	≤ 5,0
Плотность дислокаций, ×10 ¹⁴ м ⁻²	–	0,98	–	–	0,46

Структура образца, обработанного по режиму № 1, образована преимущественно реечным бейнитом, тогда как в структуре образца, обработанного по режиму № 8, основной составляющей является гранулярный бейнит, рисунок 7. При этом в структуре образца № 8 содержится не более 10 % квазиполигонального феррита, что, вероятнее всего, обусловлено

наклепом вследствие низкой температуры конца деформации, рисунок 7, *ж*. В структуре обоих образцов встречаются островки МА-фазы примерно одинаковых размеров, но содержание этих островов в образце № 1 ~5-15 %, тогда как в образце № 8 оно не превышает 5-10 %.

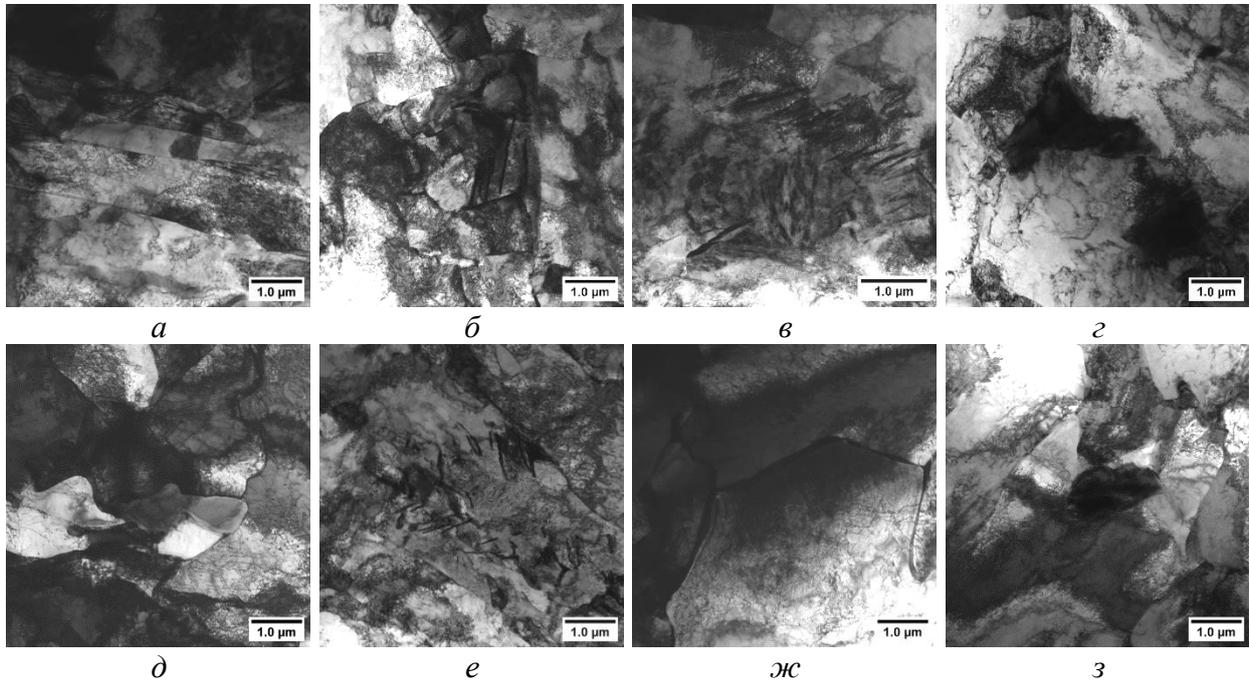


Рисунок 7 – Структура образцов из стали марки 09ХН2МДБ, обработанных по режимам № 1 (речной бейнит – *а*; гранулярный бейнит – *б*; остаточный аустенит – *в*; мартенситная-аустенитная составляющая (МА-фаза) – *з*) и № 8 (гранулярный бейнит – *д*; речной бейнит с остаточным аустенитом по следам двойников на границах реек – *е*; полигональный феррит – *ж*; МА-фаза – *з*)

Таким образом, показано, что варьируя схемы деформации (при постоянной или возрастающей схеме обжатий) на черновой стадии прокатки, а также температуры начала и конца деформации на чистовой стадии можно изменять твердость в широком диапазоне значений (от 230 до 188 HV₁₀) для стали марки 09ХН2МДБ и получать сталь различного уровня прочности (от 500 до 690 МПа).

Пятая глава посвящена разработке режимов термомодеформационной обработки листового проката толщиной 5-15 мм, соответствующей горячей прокатке на непрерывном стане, и их опробованию на лабораторных станах («Дуо-600» и «Кварто-800»), и оценке его качества, в том числе для листового проката толщиной 8-15 мм, изготовленного на стане «5000».

Показано, что для изготовления листового проката толщиной 5 мм уровня прочности до 690 МПа с высокими показателями работы удара до минус 60 °С (с чашечным строением поверхности излома образцов, рисунки 8, *в* и 9) можно использовать сталь 07Г2НФБ марганцевоникелевой композиции легирования, в которой формируется бейнит преимущественно речной морфологии, таблица 4 и рисунок 8, *а*. Увеличение толщины листового проката до 7 мм приводит к снижению прочности до 460 МПа при сохранении

высоких показателей работы удара до минус 60 °С, что связано с формированием дисперсной ферритно-перлитно-бейнитной структуры, рисунок 8, б. Однако дальнейшее увеличение толщины листового проката до 15 мм из этой стали приводит к снижению прочности до 355-420 МПа и ухудшению хладостойкости.

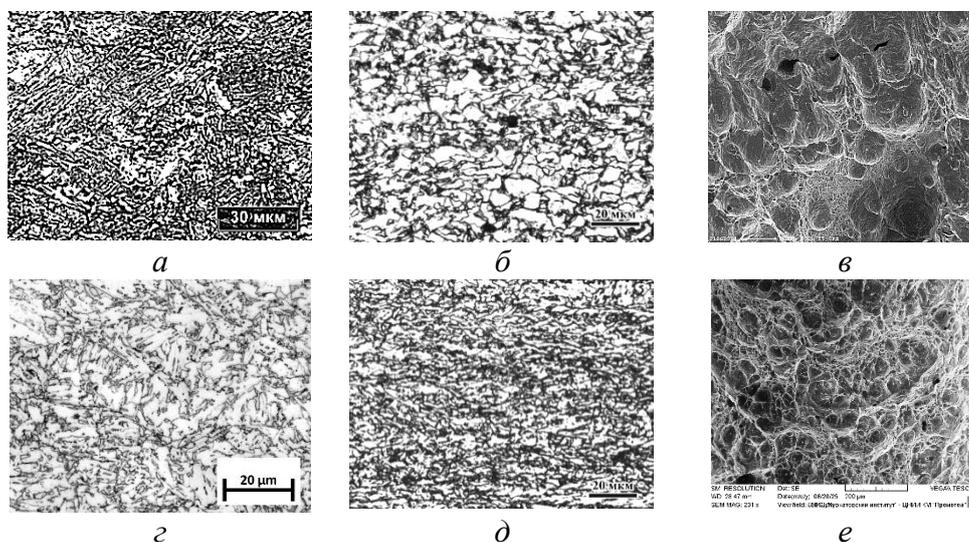


Рисунок 8 – Структура (а, з) и фотографии поверхности разрушения образцов при температуре испытания минус 60 °С (в, е) листового проката толщиной 5 мм уровня прочности 690 МПа (а, з) и 7 мм уровня прочности 460 МПа (б) и 620 МПа (д), изготовленного из стали марки 07Г2НФБ (а, б, в) и 09ХН2МДБ (з, д, е)

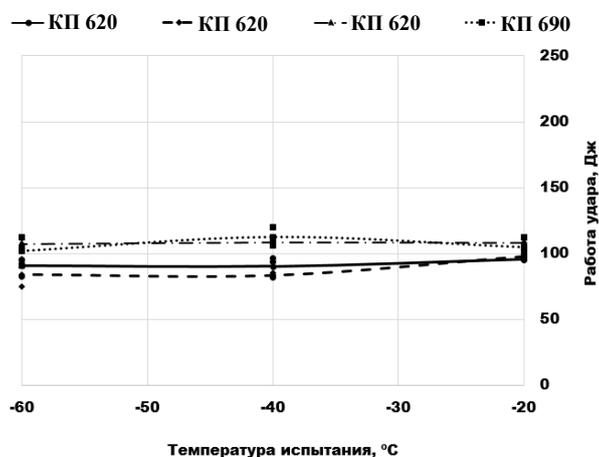


Рисунок 9 – Изменение работы удара на поперечных образцах, вырезанных от листовых прокатов толщиной 5 мм, изготовленных из стали марки 07Г2НФБ

Установлено, что для изготовления листового проката толщиной 5-7 мм уровня прочности 620-690 МПа с высокими показателями работы удара до минус 60 °С следует использовать сталь 09ХН2МДБ хромоникельмолибденовой композиции легирования для формирования в структуре бейнита речной и гранулярной морфологии, рисунок 8, з, д.

При этом диапазон прочности в сочетании с высокими показателями работы удара (в том числе после механического старения) для листового проката толщиной 5 мм, изготовленного из стали марки 09ХН2МДБ, при варьировании скорости охлаждения от 20 до 30 °С/сек составляет от 500 до 890 МПа, таблица 4 и рисунок 10. Увеличение толщины

листового проката до 9 мм приводит к понижению прочности до 460 МПа и повышению хладостойкости до минус 40 °С. Однако использование стали марки 09ХН2МДБ для изготовления листового проката толщиной 15 мм (уровня прочности 460 и 550 МПа) по технологии ТМО+УО не позволяет достичь требуемых значений работы удара, таблица 4.

Таблица 4 – Механические свойства листового проката толщиной 5-15 мм

№ режима (листа)	Толщина, мм	Уровень прочности, МПа	Механические свойства							
			$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	δ_p , %	KV, Дж, поперечные		Изгиб на 120°	Излом, %
							-40	-60		
<i>листовой прокат из стали марки 07Г2НФБ</i>										
1	5	620	667	838	21,8	–	93, 96, 82	95, 95, 82	–	–
2		620	635	838	22,3	–	84, 85, 82	82, 75, 96	–	–
3		620	666	761	20,7	–	106, 111, 109	105, 108, 108	–	–
4		690	765	912	19,6	–	110, 120, 107	102, 112, 91	–	–
5	7	460	500	570	27,0	–	80, 87, 90	65, 84, 87		
6	15	420	441	572	29	–	56, 182, 27	17, 146, 11	–	–
7		355	375	514	30,9	–	7, 157, 159	8, 9, 8	–	–
<i>листовой прокат из стали марки 09ХН2МДБ</i>										
1	5	890	900	1164	10,2	2,5	65, 69, 59	69, 63, 64	Уд.	–
2		690	691	811	16,5					
3		620	665	731	20,5					
4		500	521	698	20,9	12,1	71, 73, 75	69, 68, 76	Уд.	–
5	7	620	660	750	16,0	–	59, 54, 56	52, 45, 51	–	–
6	9	460	489	713	28,0	13,2	85	43, 32	–	–
7	15	550	583	714	15,9	6,1	21, 26, 39	–	Уд.	78
8		460	460	643	22,3	9,5	19, 20, 18	–	Уд.	79
Минимальные требования	для проката толщиной от 5,0 до 7,5 мм									
	500	≥ 500	610-770	≥ 11	–	≥ 22	–	Уд.	–	
	620	≥ 620	720-890	≥ 9	–	≥ 28	–	Уд.	–	
	690	≥ 690	770-940	≥ 9	–	≥ 31	–	Уд.	–	
	для проката толщиной от 8,0 до 9,5 мм									
	460	≥ 460	570-720	≥ 11	–	≥ 24	–	Уд.	–	
	500	≥ 500	610-770	≥ 10	–	≥ 28	–	Уд.	–	
	для проката толщиной свыше 10,0 мм									
	460	≥ 460	570-720	≥ 12	–	≥ 80	–	Уд.	90	
	500	≥ 500	610-770	≥ 11	–	≥ 80	–	Уд.	90	
550	≥ 550	640-820	≥ 11	–	≥ 80	–	Уд.	90		

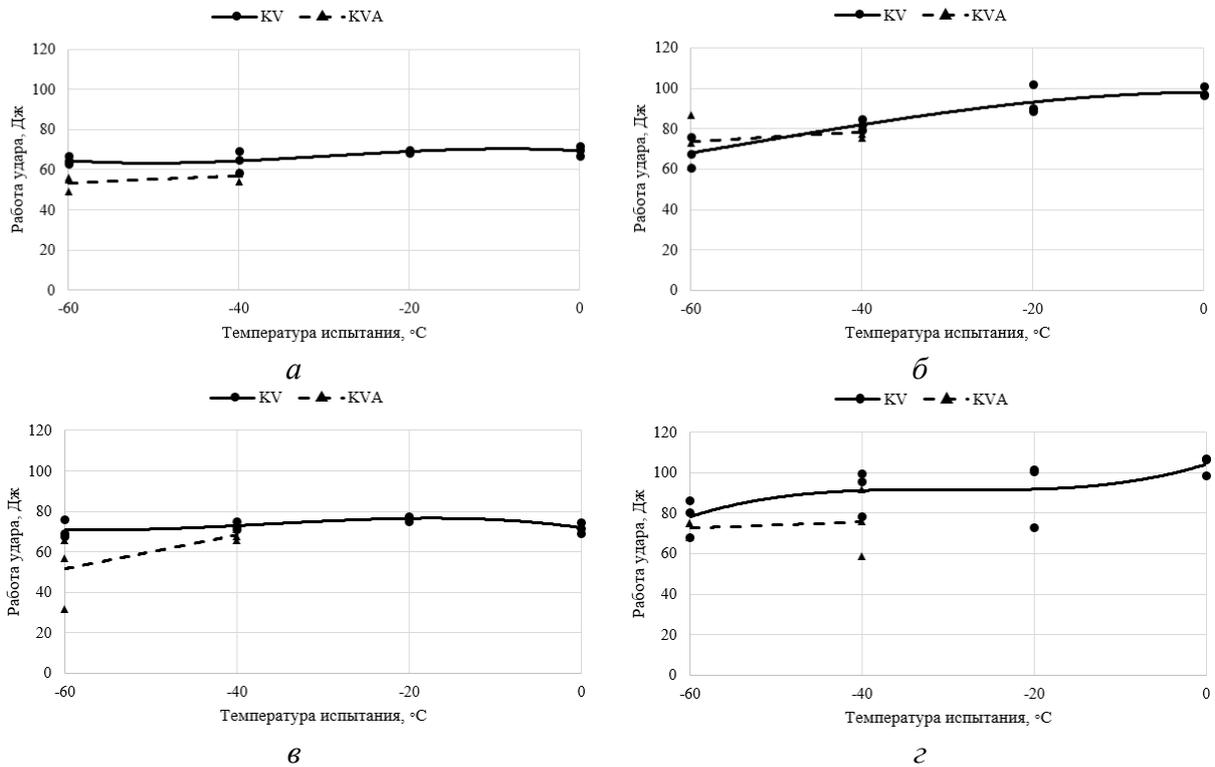


Рисунок 10 – Изменение работы удара (KV), в том числе после механического старения (KVA), на поперечных (а, б) и продольных (в, г) образцах, вырезанных от листового проката толщиной 5 мм уровня прочности 500 (а, в) и 890 (б, г), изготовленного из стали марки 09XH2MDБ

На основании проведенных экспериментов были построены зависимости прочностных и вязких свойств листового проката толщиной 5 мм в зависимости от углеродного эквивалента ($C_{\text{ЭКВ}}$), рисунок 11.

Установлено, что с увеличением углеродного эквивалента повышаются прочностные свойства листового проката толщиной 5 мм, а значения работы удара, снижаясь, остаются на требуемом уровне. Однако с увеличением $C_{\text{ЭКВ}}$ хладостойкость стали снижается, что, скорее всего, обусловлено формированием речных структур.

В связи с тем, что производство листового проката толщиной более 7 мм из стали уровня прочности более 460 МПа на непрерывном стане затруднено, была опробована технология производства листового проката толщиной 8-15 мм из стали марки 09XH2MDБ на реверсивном стане «5000» с использованием закалки и высокого отпуска (З+О). Прокатка осуществлялась из слябов толщиной 250 мм. В результате были получены листовой прокат уровня прочности 690 МПа для листового проката толщиной 8 мм и 620 МПа – для листового проката толщиной 15 мм с высокими показателями работы удара и показана принципиальная возможность изготовления такого сортамента.

На основании проведенных исследований были разработаны методические указания по имитационному моделированию технологического процесса изготовления листового проката высокопрочной судостроительной стали на непрерывном стане горячей прокатки, включающие этапы моделирования на dilatометре с возможностью сжатия, пластометре «Gleeble 3800» и лабораторных станах горячей прокатки «Дуо-600» и «Кварто-800»

(внедрены в учебный процесс СПбПУ Петра Великого).

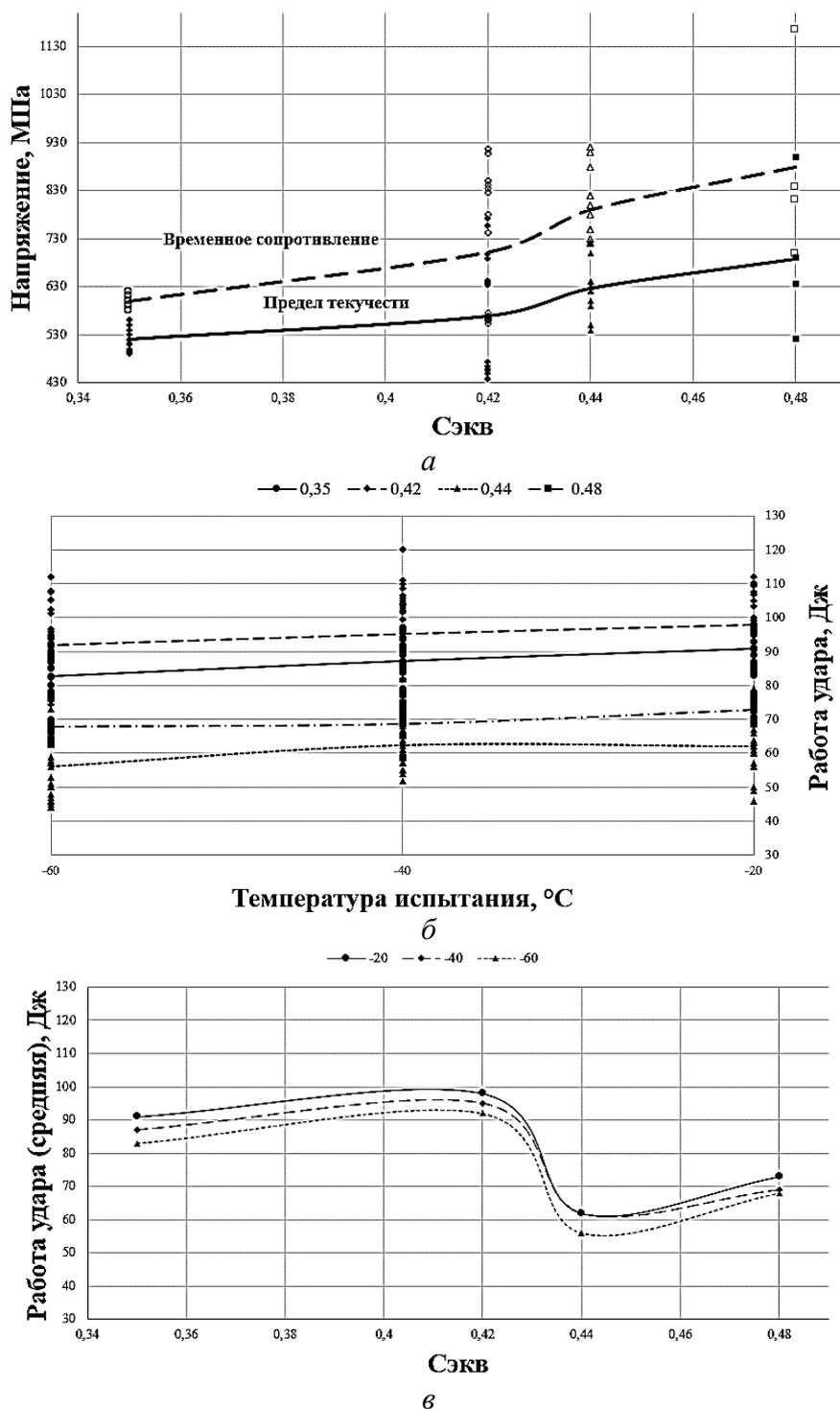


Рисунок 11 – Зависимость прочностных (а) и вязких свойств (б, в) листового проката толщиной 5 мм от значений углеродного эквивалента

Разработаны рекомендации для промышленного изготовления листового проката с гарантируемым пределом текучести более 460 МПа из стали марок 07Г2НФБ и 09ХН2МДБ на непрерывных станах с использованием ТМО+УО.

В Приложениях 1 и 2 - представлен акт внедрения результатов диссертационной работы, а также материалы, не вошедшие в основной текст диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны научно-технологические основы производства листового проката толщиной 5-15 мм из высокопрочной хладостойкой марганцевоникелевой и хромоникельмолибденовой стали с пределом текучести 460-690 МПа для морской техники для непрерывных станов горячей прокатки.

1. Разработаны требования к листовому прокату толщиной 5-15 мм уровня прочности 460 – 690 МПа, изготавливаемому на непрерывном широкополосном стане горячей прокатки. Показано, что наряду со «стандартными» требованиями к механическим свойствам для листового проката толщиной 5-15 мм целесообразно определять работу (энергию) удара на образцах, вырезанных как поперек, так и вдоль направления прокатки, а для оценки технологичности в судокорпусном производстве – проводить испытания на излом и холодный изгиб полнотолщинных проб.

2. Показано, что за счет варьирования содержания легирующих (марганца, никеля и молибдена) и микролегирующих (ниобия или ванадия) элементов возможно получать сталь разного уровня прочности (460, 500, 550, 620 и 690 МПа) для листового проката толщиной 5-15 мм. Использование марганца в качестве основного легирующего элемента в стали с комплексным микролегированием ниобием и ванадием позволяет формировать феритно-бейнитную или бейнитную структуру (в зависимости от скорости охлаждения) и получать сталь разного уровня прочности для листового проката толщиной от 5,0 до 7,5 мм. Увеличение содержания хрома, никеля, молибдена и уменьшение содержания марганца позволяет расширить спектр возможности получения листового проката с разным уровнем прочности до 15 мм.

3. Показано, что горячая пластическая деформация оказывает влияние на кинетику и скорость фазового превращения в стали композиций легирования 07ГНМДФ и 09ХН2МДБ(Ф): с увеличением скорости деформации от 0,01 до 10 с⁻¹ температуры начала и конца бейнитного превращения после охлаждения со скоростями 20-30 °С/сек повышаются на ~ 85 и 40 °С соответственно, возрастает доля превращенного аустенита в верхней области бейнитного интервала, что приводит к увеличению доли гранулярного бейнита в бейнитной структуре стали.

4. Установлено, что динамическая рекристаллизация не играет решающей роли в формировании аустенитного зерна при высокоскоростной деформации: пороговая деформация динамической рекристаллизации для стали марок 07Г2НФБ и 09ХН2МДБ, которая протекает при температурах 1200 и 1150 °С при деформации со скоростью 1-10 с⁻¹, составляет примерно 26-34 % и 30-33 % соответственно, что не реализуемо на первых трех проходах горячей прокатки на непрерывном стане (в реверсивной клетки) и не позволит обеспечить измельчение аустенитного зерна за счет ДР на высокотемпературной стадии прокатки.

5. В диапазоне скоростей охлаждения от 20 до 30 °С/сек, характерных для охлаждения листового проката толщиной от 5 до 15 мм в установке ускоренного охлаждения ламинарного типа, в стали марки 07Г2НФБ формируется преимущественно ферритно-бейнитная структура с различным соотношением структурных составляющих. В стали марки 09ХН2МД, микролегированной ниобием или ванадием, формируется бейнитная структура со смесью бейнита реечной и гранулярной морфологии в различных соотношениях. Микролегирование ниобием по сравнению с микролегированием ванадием стали марки 09ХН2МД способствует образованию большего количества гранулярного бейнита вследствие большей скорости его образования в диапазоне температур 650-570 °С.

6. Разработаны технологические параметры изготовления листового проката толщиной 5-15 мм для получения хладостойкой стали с гарантированным пределом текучести 460, 500, 550, 620 и 690 МПа с заданной ферритно-бейнитной, бейнитной или бейнитно-мартенситной структурой с целью имитации прокатки на непрерывном стане и ускоренного охлаждения:

6.1. Обоснован выбор схем горячей пластической деформации в высокотемпературной области (возрастающей при снижении температуры конца деформации или с постоянными обжатиями с повышением температуры конца деформации), а также при ее завершении (с изменением температуры конца деформации) для стали марки 09ХН2МДБ, позволяющих за счет изменения соотношения структурных составляющих после ускоренного охлаждения варьировать прочностные характеристики листового проката.

6.2. Определены наиболее рациональные температуры конца ускоренного охлаждения листового проката и выявлено влияние скорости последующего замедленного охлаждения после смотки рулона на структуру и твердость хромоникельмолибденовой стали: показано, что при снижении температуры конца охлаждения с 650-600 до 550-500 °С происходит измельчение структурных составляющих.

7. Разработаны методические указания по имитационному моделированию технологического процесса изготовления листового проката на непрерывном стане горячей прокатки (оформлен акт внедрения в учебном процессе СПбПУ), включающие этапы моделирования на дилатометре с возможностью сжатия, пластометре «Gleeble 3800» и прокатку на лабораторных станах горячей прокатки «Дуо-600» и «Кварто-800».

8. Изготовлена опытная партия листовых прокатов из стали марки 07Г2НФБ и показано, что из стали данного химического состава возможно получить материал уровня прочности 620 и 690 МПа с высокими показателями работы удара в толщинах до 5 мм. При повышении толщины листового проката до 7-15 мм наблюдается понижение прочностных и вязких свойств материала, изготовленного из стали марки 07Г2НФБ, вследствие формирования разнотермической ферритно-бейнитной структуры.

9. Изготовлена опытная партия листовых прокатов из стали марки 09ХН2МДБ толщиной 5, 7, 9 и 15 мм. Прокат толщиной 5 мм обладает уровнем прочности 500, 620 и 690 МПа, сохраняются высокие значения работы удара при температурах до минус 60 °С как вдоль, так и поперек направления прокатки. При повышении толщины листового проката до 7 мм достигается уровень прочности не выше 620 МПа, а для проката толщиной 9-15 мм – не выше 460-550 МПа. Изготовлена опытная партия листовых прокатов толщиной 8 и 15 мм на стане «5000» по технологии термоулучшения, и показано, что предложенная технология позволяет получить листовой прокат толщиной 8 мм уровня прочности 690 МПа, а толщиной 15 мм – 620 МПа.

10. Разработаны рекомендации для адаптации к промышленному производству листового проката толщиной от 5 до 9,5 мм из стали марок 07Г2НФБ и 09ХН2МДБ уровня прочности от 460 до 690 на непрерывных широкополосных станах горячей прокатки.

Основные результаты диссертационной работы представлены в следующих публикациях:

1. Knyazyuk T.V., Motovilina G.D., Novoskoltsev N.S., **Kondratiev N.A.** Simulation of rolling and analysis of structure and properties of F420W cold-resistant steel for manufacture of wind turbine towers / Knyazyuk T.V., Motovilina G.D., Novoskoltsev N.S., Kondratiev N.A. // **Key Engineering Materials**, February. – 2022. – p. 403-410.

2. Князюк Т.В., Мотовилина Г.Д., Новоскольцев Н.С., **Кондратьев Н.А.** Зависимость микроструктуры и механических свойств листового проката из хладостойкой стали с гарантированным пределом текучести 420 МПа от режима термомеханической обработки / Князюк Т.В., Мотовилина Г.Д., Новоскольцев Н.С., Кондратьев Н.А. // **Вопросы материаловедения**, № 2(110). – Санкт-Петербург. – 2022. – С. 5-14.

3. **Кондратьев Н.А.**, Хлусова Е.И., Анисимов Д.М., Боровская О.Д. Выбор параметров высокоскоростной термомеханической обработки Cr-Ni-Mo стали на основании имитационного моделирования / Кондратьев Н.А., Хлусова Е.И., Анисимов Д.М., Боровская О.Д. // **Вопросы материаловедения**, № 1(117). – Санкт-Петербург. – 2024. – С. 5-19.

4. **Кондратьев Н.А.**, Хлусова Е.И., Мотовилина Г.Д., Беликова Ю.А. Имитационное моделирование процессов структурообразования при производстве листового проката толщиной менее 10 мм из высокопрочной бейнитно-мартенситной стали / Кондратьев Н.А., Хлусова Е.И., Мотовилина Г.Д., Беликова Ю.А. // **Вопросы материаловедения**, № 1 (125). – Санкт-Петербург. – 2026. – С. 10-24.

5. **Кондратьев Н.А.**, Князюк Т.И., Новоскольцев Н.С. Разработка технологий производства листового проката из высокопрочной хладостойкой стали / Кондратьев Н.А., Князюк Т.И., Новоскольцев Н.С. // Сборник тезисов VIII Всероссийского молодежного научного форума «Open Science 2021». – Санкт-Петербург. – 2021. – 126 с.

6. Никитина В.Р., Сыч О.В., **Кондратьев Н.А.** Исследование структуры и свойств хладостойкого листового проката класса прочности 420 мпа в толщинах 5-100 мм / Никитина В.Р., Сыч О.В., Кондратьев Н.А. // Сборник тезисов XIX конференции молодых

ученых и специалистов «Новые материалы и технологии». – 2022. – Санкт-Петербург. – 62-63 с.

7. **Кондратьев Н.А.** Влияние микролегирования и условий горячей деформации на структуру бейнитной стали при имитации охлаждения листов небольших толщин / Кондратьев Н.А. // Сборник тезисов XX конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии». – 2023. – Санкт-Петербург. – 41 с.

8. **Кондратьев Н.А.** Взаимосвязь микроструктуры и механических свойств листового проката из хладостойкой стали с гарантированным пределом текучести 420 МПа с термомеханическими параметрами термомеханической обработки / Кондратьев Н.А. // Двадцать шестая Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов: Сборник тезисов – СПб.: Изд-во СПбГУПТД, 2023. – 151 с.

9. **Кондратьев Н.А.** Разработка научно-обоснованных решений для создания технологии изготовления листового проката толщиной 5-9 мм из высокопрочной хладостойкой стали / Кондратьев Н.А. // Сборник тезисов XXII конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии». – 2025. – Санкт-Петербург. – 31 с.