

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Воркачева Константина Григорьевича

на диссертацию Никиты Андреевича Кондратьева «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», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Представленная на оппонирование диссертационная работа выполнена Никитой Андреевичем Кондратьевым в федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Актуальность и тема исследования

Высокопрочный листовый прокат из низкоуглеродистых сталей широко применяется в различных отраслях промышленности: в судостроении, в строительстве, в машиностроении, используется в качестве материала для производства элементов строительной техники в грузовом автомобилестроении. Отличительной особенностью данного класса сталей является сочетание высокой прочности, вязкости, технологических свойств, хорошей свариваемости с относительно низкой себестоимостью. Потребность Российской Федерации в освоении Крайнего Севера делает актуальным применение таких сталей в хладостойком исполнении, что приводит к повышению уровня их легирования. Особо актуальным представляется производство листового проката высокопрочных низкоуглеродистых сталей толщинами от 5 до 15 мм с пределом текучести выше 460 МПа судостроительного сортамента, чему и посвящена работа Н.А. Кондратьева. Особо стоит отметить, что в настоящее время Листовой прокат толщиной 5-7,5 мм из стали с пределом текучести более 460 МПа в судостроении в настоящее время практически не используется из-за отсутствия его производства на непрерывных широкополосных станах горячей прокатки (НШСГП).

Структура и основное содержание работы. 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.

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.

В **первой главе** приведен литературный обзор, включающий анализ рынка и основных технологических операций, применяемых на практике производства листового проката толщиной от 5 до 15 мм класса прочности 460 МПа и выше российскими и зарубежными производителями.

Рассмотрены влияние микролегирующих элементов и температуры нагрева на рост зерна аустенита, влияние скорости деформации на процессы динамической рекристаллизации, влияние междеформационных пауз на процессы статической рекристаллизации, влияние легирующих элементов и скорости деформации на превращение аустенита низкоуглеродистых сталей при охлаждении до заданной температуры в процессе смотки рулонов, влияние условий охлаждения на неравномерность структуры и свойств рулонного проката, влияние условий прокатки на дефекты формы рулонного проката. Отмечается, что для создания хладостойкого проката из

НИЦ «Курчатовский институт» ЦНИИ КМ «Прометей»	
Вх. № 1075/09	28/09
22.04.09	

низкоуглеродистых сталей с пределом текучести 460 МПа необходимо варьировать не только содержание легирующих элементов, но и осуществлять контроль структурного состояния стали за счет изменения технологических параметров контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением.

По результатам литературного обзора автором была определена цель работы: 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.

Во **второй главе** описаны материалы и методики проведения исследований. Для разработки технологических параметров изготовления листового проката толщиной 5-15 мм на непрерывном стане горячей прокатки использовали марганцево-никелевую сталь марки 07Г2НФБ двух плавов, микролегированную ниобием и ванадием, и хромникельмолибденовую сталь 09ХН2МД трех плавов, микролегированную ванадием (09ХН2МДФ) или ниобием (09ХН2МДБ). Для построения термокинетических диаграмм использовался деформационный дилатометр. На пластометре GLEEBLE 3800 изучены процессы динамической рекристаллизации, проведено имитационное моделирование микроструктуры в условиях горячей деформации и ускоренного охлаждения, а также смоделированы технологические режимы. Действительную микроструктуру изучали методами оптической металлографии и EBSD. В работе применено два метода выявления микроструктуры бывшего аустенита: посредством термического травления и восстановлением на основе EBSD данных. Строение тонкой структуры изучено с применением просвечивающей электронной микроскопии. Проведен комплекс стандартных механических испытаний: измерение твердости, испытания на статическое растяжение, испытания на ударный изгиб, в том числе механически состаренных образцов. Стоит отметить, что сериальные кривые по результатам испытаний на ударный изгиб построены по 3 образцам на температуру. На основе утверждения о том, что для высокопрочных сталей снижение ударной вязкости (работы удара) имеет плавный характер, температуру вязко-хрупкого перехода принимали за минимальное допустимое пороговое значение ударной вязкости, установленное в ГОСТ Р 52927-2023 для листового проката выбранной толщины данной марки стали. Определены технологические характеристики и характеристики работоспособности материала: проведены испытания на изгиб, на излом, на коррозионное растрескивание под напряжением в условиях искусственной морской воды (3,5% раствор NaCl) и на воздухе. Предложенный в работе методический подход охватывает всю полноту доступных методов, необходимых для отработки технологии подготовки к производству низкоуглеродистых низколегированных и легированных сталей.

В **третьей главе** приведены результаты выбора химического состава, а также исследование фазовых превращений и процессов структурообразования в низкоуглеродистой стали.

Разработаны требования к микроструктуре, химическому составу, механическим свойствам и характеристикам работоспособности листового проката толщиной 5-15 мм из стали категории прочности 460, 500, 550, 620 и 690 МПа, предназначенной для эксплуатации в арктических условиях, удовлетворяющие требованиям ГОСТ Р 52927-2023 и «Правилам...» РМРС. Исследованы фазовые превращения под влиянием горячей пластической деформации в аустенитной области, в том числе при высоких скоростях деформации (1 и 10 с⁻¹). 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.

Особо стоит отметить взаимосвязь технологии прокатки с формированием в микроструктуре бейнитов различной морфологии. В стали марки 09ХН2МД, микролегированной ниобием или ванадием, формируется бейнитная структура со смесью бейнита реечной и гранулярной морфологии. При этом в стали марки 09ХН2МДБ, микролегированной ниобием, по сравнению со сталью, микролегированной ванадием, после деформации в аустенитной области с высокой скоростью образуется преимущественно бейнит гранулярной морфологии, а температуры начала и конца бейнитного превращения находятся выше на 20-30 °С.

Исследования динамической рекристаллизации при разных температурах (1100, 1150 и 1200 °С) и скоростях деформации (1, 5 и 10 с⁻¹) для стали марок 07Г2НФБ и 09ХН2МДБ показали, что при увеличении скорости деформации динамическая рекристаллизации не развивается, и преимущественным процессом формирования аустенитного зерна на черновой стадии прокатки на непрерывном стане будет являться статическая рекристаллизация.

Исследование структурообразования в стали марки 09ХН2МДБ позволило определить оптимальный температурный диапазон горячей пластической деформации.

В четвертой главе проведено определение оптимальных параметров термомодеформационной обработки на основании имитационного моделирования технологических режимов на пластометре «GLEEBLE 3800». Для имитации технологии контролируемой прокатки для сталей в зависимости от особенностей химического состава применены различные схемы деформации, нагрева и охлаждения. Для стали марки 09ХН2МДБ схема деформации с постоянными обжатиями на черновой стадии прокатки (с суммарным обжатием 56 %) и с дальнейшим уменьшением обжатий на чистовой стадии прокатки (с суммарными обжатием 36,5 %) способствует формированию бейнитной структуры преимущественно реечной морфологии и небольшой доли бейнита гранулярной морфологии, которая характеризуется твердостью ~230 HV10 (при температуре конца ускоренного охлаждения 550 °С), что соответствует уровню прочности 620 МПа. Снижение температуры конца ускоренного охлаждения для стали марки 09ХН2МДБ на 50 °С (до 500 °С) при реализации схемы деформации с постоянными обжатиями на черновой стадии прокатки и убывающей на чистовой способствует формированию большего количества реечного бейнита (до 65 %) и повышению твердости стали до 278 HV10, что соответствует уровню прочности 690 МПа. Увеличение степени наклепа при возрастающей схеме обжатий на черновой стадии, снижение температуры конца деформации до Ar₃+140 °С и увеличение суммарной деформации до 50% на чистовой стадии прокатки при температуре конца охлаждения 550°С для стали марки 09ХН2МДБ приводит к увеличению доли гранулярного бейнита до 75% и снижению твердости до 188 HV10, что соответствует уровню прочности 500 МПа.

В пятой главе приведены результаты апробации опытной технологии производства листового проката толщиной от 5 до 15 мм из хладостойкой стали уровня прочности более 460 мпа. На основании проведенных исследований процессов структурообразования на дилатометре и пластометре «Gleeble-3800» были разработаны имитационные режимы для опытного опробования изготовления листового проката толщиной от 5 до 15 мм из стали марок 07Г2НФБ и 09ХН2МДБ уровней прочности 460, 500, 550, 620 и 690 МПа применительно к станам «Дуо-600» и «Кварто-800». Установлено, что после изготовления листового проката толщиной 5 мм из стали марки 07Г2НФБ на стане «Дуо-600» по предложенным режимам формируется бейнитная структура, которая в зависимости от температуры конца прокатки позволяет получить материал уровня прочности 620 или 690 МПа с высокими показателями работы удара вплоть до температуры минус 60 °С. Для

получения листового проката толщиной 5 мм уровня прочности 460-550 МПа следует изменять скорость охлаждения и температуры конца прокатки. При увеличении толщины листового проката до 15 мм наблюдалось образование большого количества феррита и перлита, связанного с недостаточным легированием данной марки стали, что не позволяет сформировать необходимую структуру для достижения уровня прочности 460 МПа и более. Благодаря использованию более легированной марки стали 09ХН2МДБ по сравнению с 07Г2НФБ после изготовления опытной партии листового проката толщиной 5 мм по предложенным режимам на стане «Кварто-800» в зависимости от скорости охлаждения был получен материал разного уровня прочности (500, 620, 690, а также 890 МПа) с высокими показателями работы удара до температур минус 60 °С на образцах, вырезанных как поперек, так и вдоль направления прокатки. Для листового проката толщиной 7 мм достигнут уровень прочности, не превышающий 620 МПа. Прокатка стали марки 09ХН2МДБ в двухфазной области привела к формированию разнотермической ферритно-перлитно-бейнитной структуры и не позволила достичь уровня прочности более 460 МПа для листового проката толщиной 9 мм. Установлено, что при изготовлении листового проката толщиной 15 мм из стали марки 09ХН2МДБ возможно получить материал уровня прочности 460 и 550 МПа в отличие от стали марки 07Г2НФБ. Однако формирование разнотермической структуры с крупными областями речного бейнита (70-100 мкм) не позволяет достичь необходимую хладостойкость для листового проката толщиной 15 мм. В связи с тем, что изготовление листового проката толщиной более 8-15 мм из стали уровня прочности более 500 МПа с высокими показателями работы удара затруднительно на непрерывном стане, то изготовление листового проката данного диапазона толщин было опробовано на стане «5000» по технологии термоулучшения. В результате были получены листовые прокаты из стали уровня прочности 690 МПа для толщин 8 мм и 620 МПа – для 15 мм с высокими показателями работы удара и показана принципиальная возможность изготовления такого сортамента.

В работе представлен ряд результатов, обладающих **научной новизной**. Стоит отметить некоторые из них:

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 речной 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. 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 речного бейнита) и размер структурных составляющих (зерен феррита и пакетно-блочной структуры бейнита).

Практическая значимость. Диссертационная работа имеет ярко выраженный прикладной характер. 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.

Замечания по диссертационной работе

1. Для определения содержания бейнита различной морфологии использовали частично качественную характеристику, основанную на оптической микроскопии после травления ниталом. Количественное определение мартенситно-аустенитной составляющей микроструктуры осуществлено на основе локальных данных просвечивающей электронной микроскопии, что является недостаточно статистически достоверным. Для более надежной и достоверной количественной характеристики размера и содержания мелкодисперсных составляющих микроструктуры следовало бы использовать методики, основанные на анализе EBSD данных.
2. Из приведенных в Главе 5 фрактографических данных непонятно, где по отношению к верхней и нижней полкам вязко-хрупкого перехода располагается сталь. Утверждение о плавности и условности температуры вязко-хрупкого перехода для высокопрочных сталей (из Главы 2) недостаточно обосновано фрактографическими данными. Нахождение стали в интервале температур вязко-хрупкого перехода характеризуется как повышенным рассеянием величин ударной вязкости, так и вариативностью содержания вязкой и хрупкой составляющих в изломах ударных образцов. Углубленный анализ температурной зависимости доли вязкой составляющей изломов ударных образцов позволил бы прояснить этот вопрос.
3. Для более полного согласования заявленной цели диссертационной работы с ее результатами пункт 6 выводов к главе 5 : «В связи с тем, что изготовление листового проката толщиной более 8-15 мм из стали уровня прочности более 500 МПа с высокими показателями работы удара затруднительно на непрерывном стане, то изготовление листового проката данного диапазона толщин было опробовано на стане «5000» по технологии термоулучшения», следовало бы поместить в заключение как диссертационной работы, так и автореферата в дополнение к пункту 9 заключения.
4. В работе допущен ряд опечаток и терминологических неточностей, например М-А (мартенситно-аустенитная) составляющая микроструктуры неоднократно называется М-А фазой.

Сделанные замечания не умаляют научной и практической значимости диссертационной работы.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановки задач исследования, использованием большого количества современного оборудования, методов и методик исследований, воспроизводимостью результатов, полученных различными методами.

Содержание автореферата Н.А. Кондратьева соответствует содержанию диссертационной работы.

Основные результаты работы доложены на 6 научных конференциях. По результатам работы опубликовано 9 печатных работ, в том числе 3 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК и 1 публикации индексируемой в базе данных Scopus.

Диссертационная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную квалификационную работу.

По научному уровню, объему полученных достоверных результатов исследований, содержанию и оформлению работы, представленная диссертация удовлетворяет всем требованиям п.п.9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842. Автор работы Кондратьев Н.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Старший научный сотрудник лаборатории
«Новых технологий металлических и керамических материалов»
ИМЕТ РАН к.т.н.

20.04.2026  К.Г. Воркачев

Подпись Воркачева Константина Григорьевича удостоверяю:

Ученый секретарь ИМЕТ РАН
(должность)





(подпись)

Фомина О.Н.
(Ф.И.О.)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук

Почтовый адрес:
119334, г. Москва, Ленинский пр-кт, д. 49
Телефон: +7 (499) 135 9463
Адрес эл. Почты: kgv@imet.ac.ru


28.04.26