

НИИ «Курчатовский институт» ЦНИИ КМ «Прометей»	
Вх. № 1937/17	в ДЕЛО
« 11 » 06 20 24 г.	№
Осн. 9 л.	подп.
Допл. 1 л.	

## ОТЗЫВ

официального оппонента Пышминцева Игоря Юрьевича на диссертацию Сыч Ольги Васильевны «Научно-технологические основы формирования структуры и свойств хладостойких сталей для Арктики», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Непрерывное развитие техники и технологий делает возможным и актуальным разработку материалов и технологий их обработки, обеспечивающих лучшие, чем ранее, комплекс физико-механических и эксплуатационных свойств, улучшая их работоспособность, надежность и срок эксплуатации в составе конструкций. Одним из современных вызовов является создание конструкционных материалов повышенной и высокой прочности для эксплуатации в экстремальных условиях для изготовления машин и устройств нового поколения, отличающихся высоким эксплуатационным ресурсом, улучшенными техническими характеристиками и уникальной энерговооруженностью. Для России исключительное значение имеет эффективное использование ресурсов Крайнего Севера и Арктики, что невозможно без расширенной эксплуатации транспортных коридоров северных морей Северного Ледовитого океана. Значительный опыт освоения северных морей, продолжительная история использования флота, включая ледокольный, позволил сформулировать новые задачи. При этом задачей XXI века в области стального проката для изготовления техники в арктическом исполнении стала разработка технологий производства, обеспечивающих высокую прочность при гарантированном запасе вязкости и хладостойкости при особо низких температурах эксплуатации. Гарантия высоких свойств за счет применения рациональных методов обработки и применения новых марок стали на основе изучения параметров микроструктуры новыми высокоточными методами стало важной особенностью создания инноваций в данной сфере. Решению задачи способствует завершенная в последние годы комплексная реконструкция металлургической промышленности, позволяющая контролировать химический состав стали и ключевые параметры ее деформационной обработки, обеспечивающей формирование микроструктуры и свойств, с высокой точностью.

В связи с вышеизложенным поставленная в работе цель создания технологий производства и упрочнения проката из хладостойких судостроительных сталей с минимальным пределом текучести от 355 до 750 МПа и гарантированной работоспособностью при низких температурах, характерных для эксплуатации в арктическом климате, является важной в масштабах страны и не имеющей аналогов в мире. На момент постановки работы отсутствовали необходимые решения. Создание таких технологий имеет определяющее значение для создания новых типов ледоколов с атомными и дизель-электрическими энергетическими установками, судов ледового плавания, судов обеспечения, плавучих атомных энергоблоков, хладостойких морских стационарных и самодвижущихся платформ. Несомненно, что это важно для создания других судов, например для транспорта сжиженного природного газа,

способных эксплуатироваться в сложной ледовой обстановке. Задачи, поставленные и решенные в данной актуальной работе, имеют важное значение для развития металлостроения и металлургических технологий. Важнейшей задачей, имеющей большое теоретическое и практическое значение, является разработка требований к параметрам микроструктуры в листовом прокате, позволяющих достичь характеристики, необходимые для техники в арктическом исполнении. Показаны особенности формирования микроструктуры в прокате данного класса при термомеханическом и термическом воздействии, разработаны химические составы сталей, обеспечивающие достижение свойств в соответствии с новыми требованиями. Проведенные исследования позволили определить оптимальные схемы и параметры термо-деформационного воздействия на стали для достижения микроструктуры с целевыми параметрами. Найденные решения позволили разработать режимы термомеханической и термической обработки для реализации на ряде специализированных производств, создать набор нормативно-технической и технологической документации для масштабного практического внедрения.

Сформулированная автором научная новизна результатов, полученных в работе, не вызывает сомнения и в общем плане состоит в формулировке и обосновании требований к новым количественным параметрам микроструктуры, обеспечивающим достижение свойств в прокате для арктического исполнения. При этом были предложены новые, не использованные ранее количественные характеристики микроструктуры, получаемые в результате применения современных методов исследования. Предложенные в работе параметры позволили охарактеризовать и учесть особенности микроструктуры современных сталей, оказывающих определяющее влияние на комплекс механических и служебных характеристик. Таким образом, была решена задача количественного измерения характеристик структурной неоднородности и вытянутости элементов микроструктуры на разных масштабных уровнях. Кроме того, предложены и экспериментально обоснованы параметры микроструктуры современных сталей, характеризующие дисперсность структурных составляющих, а через это и соотношение прочности и хладостойкости. Автором обоснованы значения целевых параметров микроструктуры для проката из сталей различного структурного типа: умеренной прочности с феррито-бейнитной структурой, формируемой в ходе термомеханической обработки и ускоренного охлаждения (ТМО+УО), а также повышенной прочности с преимущественно бейнитной или бейнито-мартенситной микроструктурой, формируемой при закалке с прокатного нагрева (ЗПН), являющейся фактически закалкой в линии прокатного стана, или при закалке с отдельного нагрева (З), в состоянии после финального отпуска (О).

В первой главе приведен анализ известных подходов к созданию высокопрочных судостроительных сталей для применения в условиях низких температур. Представлено развитие технологий и технических требований к прокату из этих сталей различной толщины. Отдельное внимание уделено терминологии в части описания типов микроструктуры, формирующейся в прокате из современных малоуглеродистых сталей со значительной долей низкотемпературных составляющих микроструктуры. Показано, что применение сталей с комплексным легированием, а также управление структурой за счет использования рацио-

нальных режимов термической и термомеханической обработки позволяет достигать высокий комплекс механических свойств и обеспечивать работоспособность при низких температурах. Определены задачи исследования, решение которых позволяет обеспечить создание технологии производства сталей в арктическом исполнении, а также способствовать технологическому суверенитету России в данном направлении.

Во второй главе подробно изложены материалы, способы их обработки и исследования. Приведены сведения о составе технологического оборудования на основных предприятиях-изготовителях проката повышенной и высокой прочности для судостроения. Дан подробный разбор технологических вариантов для получения проката различных уровней прочности и хладостойкости. Было использовано три варианта упрочнения:

- термомеханическая обработка с ускоренным охлаждением (ТМО+УО);
- закалка с прокатного нагрева, фактически являющаяся закалкой в линии прокатного стана, с последующим отпуском (ЗПН+О);
- закалка с отдельного нагрева, названная в работе печной закалкой, с последующим отпуском (З+О).

Для получения высокой прочности и трещиностойкости в условиях низких температур был использован комплексный подход с моделированием процессов формирования структуры на всех стадиях обработки, включая нагрев перед прокаткой, особенности термомеханического воздействия сталей разных типов и составов на установке GLEEBLE 3800, процессы при термической обработке на dilatометре и наблюдение за формированием в них структуры с изучением особенностей при помощи оптической и электронной микроскопии, включая анализ дифракции обратно рассеянных электронов. Особый интерес представляет анализ микроструктуры сталей с использованием предложенных специальных параметров. Это существенно дополняет возможности анализа микроструктур в исследуемых сталях, сформированных вышеупомянутыми способами. Предложены параметры анизотропии микроструктуры, определяемые с использованием возможностей автоматического микроанализатора и дающие представления об уровне анизотропии на различных масштабных уровнях. Эта методическая разработка имеет большое значение для исследования и создания новых современных сталей различного применения и в судостроении и в строительстве и в трубной промышленности.

Механические испытания проката с определением характеристик работоспособности проводили различными способами. Ценность работы состоит в применении оценки хладостойкости и пригодности к использованию в арктических условиях различными методами. Были использованы и испытания образцов Шарпи, и испытания технологических проб на излом при статическом изгибе нагрузкой, прилагаемой со стороны противоположной надрезу и испытания с определением температуры хрупко-вязкого перехода, а также трещиностойкость в соответствии с Правилами Российского морского судового регистра РМСР, собственным СТО и международными признанными стандартами.

Кроме того, проведены исследования коррозионной стойкости различными способами и свариваемости, в отношении методик проведения которых дана исчерпывающая информация.

В главе 3 проведена количественная оценка параметров микроструктуры, обеспечивающая в прокате толщиной до 100 мм оптимальные свойства и работоспособность. Ввиду широкого диапазона прочностных свойств, соответствующих минимальному значению предела текучести от 355 до 750 МПа, были использованы различные способы упрочнения и типы (составы) стали. В результате проведенной работы по детальному изучению микроструктуры и свойств в прокате разной толщины из сталей разного химического состава для трех рассмотренных схем упрочняющей обработки были сделаны важные выводы.

Показано, что поле ТМО+УО должна формироваться микроструктура, содержащая не менее 70% гранулярного бейнита и квазаполигонального феррита, а доля речного бейнита должна быть 20-25%. При этом микроструктура должна быть однородной по всей толщине, коэффициент анизотропии должен быть умеренным, а доля крупных участков негранулярного бейнита не более 10%. Определены доли малоугловых границ и размеры структурных элементов. Выработаны рекомендации по оптимальному химическому составу таких сталей, определены оптимальные добавки никеля, меди, марганца, молибдена, их влияние на процесс структурообразования в прокате данного типа.

Для сталей с мартенсито-бейнитной микроструктурой, получаемой при применении ЗПН+О в экономнолегированных судостроительных сталях с арктическим исполнением показано, что требуемый уровень свойств и характеристики работоспособности могут быть достигнуты при определенных параметрах микроструктуры. В частности, доля речных составляющих мартенсита и бейнита должна быть выше 55 %, в них должна быть развита субструктура, карбиды не должны быть в виде цепочек и сетки, а доля гранулярно бейнита может варьироваться в пределах 10 - 25 %. Определен средний и максимальный размер структурных составляющих при угле толерантности 5 градусов и доля малоугловых и большеугловых границ. Определены требования к химическому составу. Предложено легирование медью, никелем и молибденом в суммарном количестве 2-3 % для обеспечения устойчивости перехлажденного аустенита и формирования речных составляющих в микроструктуре. При этом оптимальной долей хрома является 0,5-0,8 %, за счет обнаруженного его влияния на структурообразование при отпуске. Роль 0,02 – 0,04 % ниобия и 0,2 - 0,3 % молибдена позволяет предотвращать собирательную рекристаллизацию на стадии черновой прокатки и через это получать оптимальные конечные свойства.

Показана целесообразность применения обработки типа З+О в экономнолегированных сталях ограниченной прочности от 500 до 620 МПа с обеспечением определенного набора, размера структурных составляющих, их разориентировки, а также ограничением размера карбидных частиц на границах зерен и фрагментов. Проведен анализ влияния состава и параметров обработки на характеристики работоспособности судостроительных сталей при низких температурах, что легло в основу концепции легирования низкоуглеродистых низко- и экономнолегированных сталей в арктическом исполнении для выпуска проката в соответствии с новой редакцией ГОСТ Р 52927-2023 и нормативно-технической документацией,

одобренной РМСР. Разработанная концепция химических составов была защищена 6-ю патентами РФ.

Четвертая глава содержит результаты обширного эксперимента по определению особенностей формирования структуры при горячей прокатке с использованием комплекса GLEEBLE 3800. Изучены условия развития динамической и статической рекристаллизации. Выявлено, что для протекания динамической рекристаллизации необходимы высокие однократные обжаты на уровне 0,3-0,4 при температуре 1150 и 1100 °С вне зависимости от легирования и микролегирования в пределах исследованных составов. Поскольку это недостижимо в промышленных условиях, исследование направлено на изучение статической рекристаллизации в междеформационных паузах и определению закономерностей формирования микроструктуры на стадии черновой и чистовой прокаток. Было показано, что благоприятные условия достигаются при использовании убывающего температурного режима с постепенным приближением к температуре остановки рекристаллизации. В низколегированных сталях рекомендовано занижение температуры последнего прохода на 50 °С, что позволяет избежать формирования нежелательных крупных зерен аустенита в центральных зонах проката с образованием протяженных зон реечного бейнита и разнотерности. В экономнолегированных сталях предложенный режим определяет образование однородной бейнито-мартенситной микроструктуры с размером исходного зерна аустенита 18-20 мкм. В то же время окончание деформации выше может приводить к собирательной рекристаллизации в центральных слоях.

Для всех сталей определено оптимальное распределение обжатий между черновой и завершающей стадией в 70/30 %, что позволяет сформировать однородную зеренную структуру аустенита и обеспечить развитую субструктуру в нем. Путем физического моделирования исследовано влияние температуры и схемы распределения деформаций по проходам на стадии чистовой прокатки. Показано, что для низколегированных сталей оптимален либо убывающий температурный график с окончанием на 20 °С выше  $A_{r3}$ , либо прокатка при постоянной температуре на 30 °С выше  $A_{r3}$ . При этом повышение температуры окончания прокатки до  $A_{r3} + 50$  °С приводит к разнотерности и увеличению протяженности и доли реечного бейнита. Определен и желательный режим обжатий для сталей этой группы, определенный как убывающий 15-10 %, что способствует созданию развитой субзеренной структуры в аустените. Для экономнолегированных сталей рекомендован диапазон температур деформации на 50-80 °С ниже остановки рекристаллизации при убывающей схеме обжатий 15-10%. Завершение прокатки при более низких температурах влечет образование вытянутых областей реечного бейнита и других нежелательных составляющих в микроструктуре. Показано, что после формирования оптимальных зеренных и субзеренных структур аустенита на стадии черновой и чистовой прокатки ускоренное охлаждение с характерной для производственных линий обеспечивает формирование целевых структур в сталях низколегированной и экономнолегированной групп.

В пятой главе разработаны режимы деформации и ускоренного охлаждения судостроительных сталей различных уровней легирования и прочности в промышленных условиях с учетом естественной неоднородности температурного поля. Отличительной особенностью

работы стал анализ влияния работы гидросбива окалины на занижение температуры поверхностных слоев. Это приводит к увеличению коэффициента анизотропии, отклонению от рекомендованных размеров структурных элементов, их распределения по толщине листа. Это приводит к снижению вязкости в полнотолщинных пробах и повышает температуру хрупко-вязкого перехода. На практике получено подтверждение определяющей роли черновой прокатки и скорости охлаждения на трещиностойкость стали. Показано влияние режима чистой прокатки на комплекс служебных свойств. В результате разработаны режимы термомеханической обработки и ускоренного охлаждения, позволяющих гарантированно достичь показателей для сталей в арктическом исполнении. Это достигается за счет формирования изотропной и однородной феррито-бейнитной микроструктуры во всем сечении проката толщиной до 100 мм. Технологии внедрены для производства продукции прочности 355-390 категории F в толщинах до 100 мм и прочности 355-460 с индексом «Arc» в толщинах до 50 мм на основных предприятиях-изготовителях.

В шестой главе приведены результаты исследования и практического внедрения разработки для производства проката высокой прочности с обработкой путем закалки непосредственно в линии стана, а также при использовании отдельного нагрева под закалку. Проанализированы возможности достижения заданных параметров микроструктуры в состоянии после завершающего отпуска. Определена металлургическая цель технологических воздействий на микроструктуру по всей толщине листа, состоящая в получении заданного соотношения структурных составляющих, их морфологии, с большой долей большеугловых границ и малым размером структурных элементов, равномерного распределения карбидных частиц, достижения определенных параметров субструктуры и исключение протяженных областей реечного бейнита. Определен оптимальный интервал температур нагрева под прокатку, превышение которого ведет к комплексу последствий, приводящих к снижению комплекса свойств, прежде всего, сопротивления хрупкому разрушению. На практике подтверждена эффективность убывающего режима температур проведения черновой прокатки с минимальным превышением температуры ее конца над температурой остановки рекристаллизации. Рекомендованы режимы отпуска сталей, подвергнутых закалке как непосредственно в линии стана, так и после отдельного нагрева. По результатам исследования разработаны технологические режимы, гарантирующие достижение заданных параметров микроструктуры во всем сечении проката в арктическом исполнении. Разработанные режимы освоены на крупных металлургических предприятиях, специализирующихся на выпуске судовых сталей.

В седьмой главе приведены результаты изготовления опытно-промышленных партий проката на ПАО «ММК», ПАО «Северсталь», ООО «ОМЗ-Спецсталь». Убедительно подтверждена работоспособность проката, произведенного по разработанным технологиям, подтверждена его свариваемость при применении сварки с высоким и низким уровнем погонной энергии, что подтверждает пригодность материала для всех современных видов сварки.

В восьмой главе приведены результаты внедрения разработанных технологий для производства судостроительных сталей в арктическом исполнении. Подтверждено достижение

заданных характеристик проката с использованием всех трех технологических схем упрочнения: закалки в линии прокатного стана и отпуска, закалки с отдельного нагрева и отпуска, а также сталей умеренной прочности путем термомеханической обработки с ускоренным охлаждением. Прокат, произведенный по разработанным технологическим режимам, использован при строительстве крупнейших в мире атомных ледоколов проекта 22220 «Арктика», «Сибирь», «Урал», «Якутия», «Чукотка», «Ленинград», «Сталинград», сверхмощного ледокола проекта 10510 «Лидер» и для ряда других масштабных проектов. Результаты внедрения работы подтверждены актами, утвержденными руководителями ПАО «ММК», ПАО «Северсталь», ООО «ОМЗ-Спецсталь», АО «Балтийский завод» и АО «ЦКБ «Айсберг», приведенными в приложении.

Диссертация изложена на 427 страницах и содержит 165 рисунков и 70 таблиц. Список литературы состоит из 294 источников, в котором преобладают современные публикации в профильных периодических изданиях и монографии. К диссертации имеется приложение на 42 страницах, содержащее 25 рисунков, 19 таблиц и 5 актов внедрения результатов диссертационной работы. Основные результаты диссертации представлены на профильных научно-технических конференциях и семинарах международного уровня. Диссертация изложена последовательно, логично, написана грамотным научным языком с использованием признанной терминологии, обозначений и сокращений. Название, содержание и текст диссертации соответствуют паспорту специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов. Основное научное содержание диссертации изложено в научных трудах соискателя. Содержание автореферата полностью соответствует тесту диссертации.

К работе имеется ряд замечаний и вопросов:

1. Практическое использование полученных знаний о закономерностях влияния химического состава, режимов нагрева под прокатку, распределения температур и обжатий на стадиях черновой и чистовой прокатки на комплекс механических свойств и работоспособность проката в арктическом исполнении и соответствующих рекомендаций зависит от многих факторов, включая правильность определения ключевых «опорных» температур. К ним можно отнести температуру интенсивного роста аустенитных зерен при нагреве заготовок под прокатку, минимальную температуру завершения статической рекристаллизации, температуру начала выделения феррита при охлаждении  $Ag_3$ . Известно большое число эмпирических формул для расчета этих температур на основе данных о химическом составе стали, созданных, а впоследствии и уточненных в разное время многими исследователями для определенных классов и типов стали. Поскольку результат представленной работы состоит в разработке составов и режимов обработки нового класса стали, представляется несомненно важным дать рекомендации по применению известных соотношений или выработке специальных для данного случая.
2. В работе продемонстрированы преимущества микроструктуры, комплекса свойств и характеристик работоспособности проката в состоянии после закалки с прокатного нагрева по сравнению состоянием после закалки с отдельного нагрева, что связано с

получением более дисперсных элементов микроструктуры, отделенных малоугловыми границами, что является результатом закономерностей формирования микроструктуры как непосредственно при закалке, так и при последующем отпуске. Можно предположить, что отличия конечной микроструктуры определяются в первую очередь различиям микроструктуры в исходном закаленном состоянии, причины которых, на мой взгляд, могли быть раскрыты в работе более подробно. Возможно, они связаны и с разными характеристиками охлаждающей способности использованных закалочных устройств. Тем не менее сам факт получения заметно лучшего комплекса свойств в отпущенном состоянии при применении закалки с прокатного нагрева, чем после закалки с отдельного нагрева, формирующего более дисперсную и однородную структуру аустенита, имеет огромное практическое значение. Можно ли в связи с полученными результатами технологический вариант упрочнения с закалкой с отдельного нагрева считать устаревшим?

3. Оценке свариваемости листового проката из разработанных судостроительных сталей уделена значительная часть завершающей главы исследования. При этом как для проката, полученного путем термомеханической обработки с ускоренным охлаждением (ТМО+УО), так и для проката, упрочненного путем закалки и отпуска, показан высокий запас вязкости во всех зонах сварных соединений, полученных с высоким и низким уровнем тепловложения (погонной энергии) по сравнению с нормативными требованиями. В связи с этим какая-либо проблема со свариваемостью не была выявлена, соответственно какие-либо особенности в свете общего контекста диссертации не были найдены. При этом исследовано деформационное поведение сварных соединений при температуре отпуска для относительно низкопрочных сталей в состоянии после ТМО+УО. В то же время для состояний как после закалки с прокатного нагрева (ЗПН), так и закалки с отдельного нагрева (З) и отпуска, для которых в силу высокой прочности и повышенных значений углеродного эквивалента вопрос свариваемости более критичен, такое исследование проведено не было. Насколько это обоснованно?
4. По тексту диссертации имеются опечатки и некоторые неточности. Некоторые примеры приведены ниже. На стр. 21 при описании зарубежных аналогов материалов для проката высокой и повышенной прочности в качестве американских марок приведены HSLA и A537. Первая является не маркой, а обширным классом сталей широкого применения (high strength low alloyed). Вторая, по-видимому, относится к спецификации на прокат ASTM A537 / A537M (ASME SA 537 / SA 537M) «Стандартные спецификации для сосудов под давлением, из термообработанных углерод-марганец-кремниевых сталей». Известный параметр  $P_{cm}$  (critical metal parameter), предложенный Ито и Бессио в 1968 г., характеризующий влияние содержания основных элементов на склонность к образованию холодных трещин в сварном соединении, назван в работе коэффициентом трещиностойкости, которым в строгом смысле он им не является. На стр. 114 имеется ссылка на рисунки 3.25 ж,з, которые не существуют, а имеются только а-г. Аналогично на стр. 119 подрисуночная подпись к рис.3.30 подразумевает наличие четырех частей, а фактически представлены две гистограммы.



5. Межгосударственный стандарт ГОСТ 33439-2015 «Металлопродукция из черных металлов и сплавов на железо-никелевой основе. Термины и определения по термической обработке» не предполагает повсеместно используемого в работе термина «печная закалка», который по существу работы является закалкой с отдельного нагрева как альтернативой «закалки с прокатного нагрева». В общем понимании операция закалки состоит в нагреве до определенной температуры, выдержке, необходимой для протекания определенных процессов и охлаждении со скоростью выше критической. С этой точки зрения в печи можно осуществить только нагрев и выдержку. Закалка с прокатного нагрева также не является стандартизированным термином. Более правильно такую обработку называть «прямая» закалка в линии прокатного стана.

Указанные замечания не влияют на общую оценку работы, которая является законченным целостным исследованием на актуальную тему, в котором изложены новые научно обоснованные технические, технологические или иные решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны. Работа выполнена на высоком научном уровне, а ее результаты внедрены в широком масштабе на крупных специализированных предприятиях при освоении новых технологий производства проката высокой и повышенной прочности для судов нового поколения в арктическом исполнении.

В связи с вышеизложенным считаю, что представленная работа полностью соответствует действующим требованиям, изложенным в п. 9 Положения о присуждении ученых степеней (утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а ее автор, Сыч Ольга Васильевна, заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Генеральный директор  
акционерного общества «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности», докт. техн. наук



04.06.24

Пышминцев Игорь Юрьевич

Даю согласие на обработку моих персональных данных и на размещение их в свободном доступе в сети информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» и в единой информационной системе.

Подпись Пышминцева И.Ю. заверяю:  
Менеджер по персоналу

454139, Челябинск, Новороссийская, 30  
Тел/факс 8(351)7347050, [secretariat@rosniti.ru](mailto:secretariat@rosniti.ru)



Ляпина Марина Эдуардовна

*Ознакомлена*  
11.06.2024  
*[Signature]*