

НИИЦ «Курчатовский институт»- ЦНИИ КМ «Прометей»	
Вх. № 1934/17	в ДЕЛО
«11» 06 2024 г.	№
Осн. 8 л.	подп.
Прил. - л.	

УТВЕРЖДАЮ:

Заместитель ректора – первый проректор
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II»
доктор экономических наук, профессор



Н.В.Пашкевич

«11» 06 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» на диссертационную работу Сыч Ольги Васильевны на тему «НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ХЛАДОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ АРКТИКИ», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Актуальность работы. Развитие хладостойких судостроительных сталей определяется характером требований, связанных, в свою очередь, с повышением эксплуатационной надежности сложной морской техники под воздействием низких температур в Арктике.

Для строительства современных атомных ледоколов, модернизированных плавучих энергоблоков, ледокольных судов обеспечения, ледостойких платформ и другой техники, эксплуатирующейся в ледовых условиях морей арктического бассейна, потребовались хладостойкие стали с гарантированной работоспособностью при температурах минус 40 °С - минус 50 °С в толщинах до 50-60 мм. Данные материалы наиболее высокого качества – стали с индексом «Arc», кроме выполнения стандартного комплекса механических испытаний (на растяжение, ударный изгиб, излом при комнатной температуре, изгиб), как указывает автор, должны удовлетворять ряду специфичных требований, предусматривающих проведение испытаний на крупногабаритных образцах (на определение критических температур вязко-хрупкого перехода и склонности к трещинообразованию). Требования к таким сталям впервые были сформулированы в «Правилах...» Российского морского регистра судоходства, а после разработки технологий их производства под руководством автора внесены в основной стандарт на поставку судостроительных сталей – ГОСТ Р 52927.

Как показал проведенный автором анализ опыта производства разработанных ранее судостроительных сталей, названных в работе «базовыми» (композиций легирования, технологий производства, уровня хладостойкости по специальным видам испытаний), получения в листовом прокате необходимых характеристик работоспособности не достигалось. Кроме того, освоенный сортамент листового проката из «базовых» судостроительных сталей ограничивался толщиной 40-50 мм, а для ряда современных сварных конструкций необходим хладостойкий металлопрокат категорий D, E, F толщиной вплоть до 100 мм. Потребовались новые научно-технологические подходы при создании хладостойких судостроительных сталей нового поколения, чему и посвящена работа Сыч Ольги Васильевны. В связи с вышесказанным, диссертационная работа Сыч Ольги Васильевны, посвященная созданию хладостойких судостроительных сталей с пределом текучести 355...750 МПа с гарантированной работоспособностью при низких температурах (с индексом «Arc»), предназначенных для эксплуатации в Арктике, и технологий их производства, представляется весьма актуальной и востребованной для судостроительной отрасли и черной металлургии в целом.

Цель и задачи работы. Цель и задачи работы для достижения поставленной цели сформулированы автором четко и систематично. Для проведения исследований выбран широкий спектр сталей различного легирования и технологий производства.

Содержание работы. Работа имеет классическую структуру по разработке новых материалов, выстроена логично и грамотно. Диссертация хорошо структурирована и представляет собой фундаментальную научно-исследовательскую работу - от постановки задачи, аналитических исследований, экспериментального моделирования, научно-технологических разработок до внедрения полученных результатов. Отдельно следует отметить точность и доступность изложения научного материала, которые присущи представленной диссертации, ее автореферата и научных публикаций О.В.Сыч в ведущих научных журналах, 31 из которых входит в Перечень ВАК. Результаты работы многократно представлялись на российских и международных научно-практических конференциях, что также наглядно свидетельствует об их апробации. Автореферат отражает основные научные результаты, изложенные в тексте диссертации объемом 469 листов, несмотря на сложность обобщения такого внушительного объема изложенной и проанализированной информации. Содержание работы полностью соответствует паспорту заявленной специальности 2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Во главе работы стоит разработка требований к параметрам структуры и научно обоснованных способов повышения дисперсности и однородности структуры стали по сечению на различных масштабных уровнях в листовом прокате больших толщин. Автором показано, что это позволяет добиться не только повышения прочности и пластичности, но и гарантировать характеристики работоспособности при низких

температурах. Тематика, посвященная развитию научно обоснованных технологических способов формирования определенных структурных состояний, в последнее время получила большое развитие. В связи с этим работы, выполненные автором в данном направлении, несомненно, представляют научный интерес, а полученные результаты позволили сделать значительный шаг в развитии арктического материаловедения.

В диссертационной работе Сыч Ольги Васильевны впервые получен ряд новых научных результатов. Все установленные зависимости, закономерности, выводы и рекомендации научно обоснованы и подтверждены экспериментальными исследованиями, в связи с чем их надежность и достоверность не вызывает сомнений. Описание наиболее интересных научных достижений автора представлено ниже.

Несмотря на большое количество опубликованных работ по поиску взаимосвязей между структурой и механическими свойствами, следует учесть, что ни в отечественной, ни в зарубежной практике до выполнения рецензируемой работы не были сформулированы количественные требования к параметрам структуры листового проката, гарантирующей получение высокой хладостойкости и трещиностойкости стали.

Автор владеет современными методами и методиками исследования сложных многокомпонентных структур на различных масштабных уровнях, в том числе экспресс-методом по выявлению размера бывших аустенитных зерен, методикой количественной оценки анизотропии микроструктуры, основанной на текстурном анализе изображений с помощью анализатора изображений Тиксомет, методами распознавания структурных составляющих на основании результатов просвечивающей электронной микроскопии и автоматизированного анализа дифракционных картин обратного рассеяния электронов (EBSD-анализа), определением морфологического подобия и отпускостойчивости стали по степени искаженности кристаллической решетки. Это и позволило автору сформулировать комплексные количественные требования к параметрам структуры по сечению листового проката (в зависимости от уровня легирования и технологии производства), которые обеспечивают получение гарантированной работоспособности при расчетных температурах эксплуатации.

В представленной работе показано, как характеристики работоспособности зависят от степени развития структурной неоднородности и анизотропии по сечению листового проката. С увеличением толщины листового проката неоднородность конечной структуры, обусловленная неоднородностью распределения термодеформационных условий в различных слоях крупномасштабных промежуточных заготовок при прокатке и последующем охлаждении, возрастает, что продемонстрировано автором при сравнительных исследованиях параметров структурной анизотропии для листов различной толщины вплоть до 100 мм.

В представленной работе последовательно выявляется влияние различных структурных факторов и их изменения по сечению листа на трещиностойкость и

хладостойкость. Построен ряд зависимостей критических температур хрупкости $T_{кб}$, NDT, а также трещиностойкости стали от различных параметров структуры и показано, что каждая характеристика работоспособности зависит от определенного набора структурных параметров, что установлено впервые и представляет значительный научный интерес.

Показано, что в зависимости от легирования и технологии производства для обеспечения гарантированной работоспособности:

- к низколегированным сталям после термомеханической обработки должны предъявляться требования к допустимой степени структурной анизотропии, минимальной суммарной доле структур гранулярного типа при ограничении доли крупных областей бейнита речной морфологии размером более 100 мкм, а также его общего количества, размеру структурных элементов, доле малоугловых границ;

- в экономнолегированных сталях после закалки с прокатного нагрева с отпуском, наоборот, нормируется минимальная доля речных структур с фрагментированным строением рек и количество большеугловых границ с разориентировками более 50° в сочетании с максимальным размером карбидных частиц и размером структурных элементов, что отражено в научной новизне.

В своей работе Сыч Ольга Васильевна проводит последовательное исследование закономерностей основных процессов формирования структуры при горячей пластической деформации, протекания фазовых и структурных превращений переохлажденного горячедеформированного аустенита.

С помощью современных методов имитационного моделирования технологических процессов на комплексе «GLEEBLE 3800» автором установлено влияние всех варьируемых в промышленности параметров - температуры нагрева, температуры и схем обжатый по проходам на первой высокотемпературной и завершающей стадиях прокатки, режима ускоренного охлаждения (температуры и скорости) на тип, соотношение, дисперсность и морфологию структурных составляющих в судостроительных сталях различного легирования.

Автором показано, как прецизионное термодереформационное воздействие на процессы рекристаллизации и создание развитой субзеренной структуры в аустените позволяет управлять размерами элементов структуры, разориентированными углами не менее 5° (именно они вносят вклад не только в упрочнение, но и сопротивление хрупкому разрушению) и количеством необходимых границ (малоугловых или большеугловых в зависимости от легирования стали) в конечной (превращенной) структуре. В результате данных исследований автором предложены режимы двухстадийной горячей пластической деформации с ускоренным охлаждением, обеспечивающие формирование мелкодисперсной ферритно-бейнитной, бейнитной и бейнитно-мартенситной структуры с заданными параметрами при промышленном производстве листового проката.

Глубокое понимание закономерностей протекания фазовых и структурных превращений, происходящих при распаде горячедеформированного аустенита, кинетики роста зерна, статической и динамической рекристаллизации, установление взаимосвязи между легированием, технологическими режимами, параметрами структуры и характеристиками работоспособности, позволило автору разработать научно обоснованные концепции легирования сталей с гарантированной работоспособностью (с индексом «Агс») и технологические режимы, которые основаны на последовательном измельчении зеренной и субзеренной структуры стали на каждом этапе изготовления. Их новизна подтверждена 6 полученными патентами РФ на составы и способы производства новых хладостойких судостроительных сталей арктического применения.

Для сталей различного легирования установлено влияние режимов высокотемпературного отпуска на структуру и свойства листового проката, изготовленного с использованием различных способов закалки – прямой непосредственно после деформации или с отдельного печного нагрева. В результате автором определены граничные температурные условия отпуска, исключающего развитие процесса рекристаллизации в реечном мартенсите и реечном бейните (укрупнения областей α -фазы по механизму «in-situ»).

Интересным представляется установленный автором факт, что при высокотемпературном отпуске после закалки с прокатного нагрева отмечается измельчение размера структурных элементов, определенных при заданном угле толерантности 5° , что показано, как для низколегированных сталей уровней прочности 420-460, так и высокопрочных сталей с большим уровнем легирования.

Несомненно, профессионализм, высокий экспериментальный уровень исследований, систематичность и последовательность в решении широкого круга научно-практических задач позволили автору выявить и обобщить закономерности структурных превращений в исследованных сталях, а также дали возможность расширить и углубить понимание явлений, происходящих в них.

Научная новизна результатов диссертационной работы определяется комплексным подходом к созданию сталей с гарантированной работоспособностью, сочетающими разработку количественных требований к параметрам структуры и их допустимого изменения по сечению проката, научно обоснованных концепций легирования и технологических приемов термомеханической и термической обработки, обеспечивающих формирование заданной структуры с допустимой степенью неоднородности. Все сформулированные положения научной новизны и предлагаемые технологические решения подкреплены внушительным объемом проведенных исследований, в том числе промышленных экспериментов в условиях металлургических заводов, их достоверность не вызывает сомнений.

Итогом рецензируемой работы стала разработка промышленных технологий производства листового проката из низко- и экономнолегированных сталей арктического

назначения широкого диапазона прочностных характеристик от 355 до 750 МПа, адаптированных к прокатному и термическому оборудованию трех металлургических комбинатов (ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», ПАО «Северсталь», Филиал АО «АЭМ-технологии» «АЭМ-Спецсталь»), что подтверждено актами внедрения результатов диссертационной работы от данных предприятий. Разработана вся необходимая техническая и технологическая документация на производство листового проката из низко- и экономнолегированных судостроительных сталей.

Практическая значимость работы. Разработанный спектр судостроительных сталей и технологий производства подтверждает практическую значимость, масштабность и целостность выполненной работы. Осуществление поставок листового проката из разработанных хладостойких сталей объемом более 300 тыс. тонн позволило обеспечить строительство заказов ведущих судостроительных предприятий.

Из разработанных сталей построены крупнейшие в мире атомные ледоколы «Арктика», «Сибирь», «Урал» и другие суда, строятся ледоколы «Якутия», «Чукотка», «Ленинград» проекта 22220, мощнейший атомный ледокол «Лидер» проекта 10510, что отражено в акте внедрения АО «Балтийский завод».

Важной практической составляющей работы является внесение разработанных сталей в новую редакцию Национального стандарта ГОСТ Р 52927-2023 на поставку судостроительных сталей, что открывает возможности использования проектантами высоконадежных материалов в новые проекты морской техники для эксплуатации в Арктическом регионе. В частности, разработанные судостроительные стали с индексом «Arc» уже использованы АО «ЦКБ «Айсберг» при проектировании модернизированного плавучего энергоблока проекта 20871, а также судна атомно-технологического обслуживания проекта 22770.

Внедрение результатов диссертационной работы не только при освоении технологий на крупнейших заводах-изготовителях судостроительной продукции, но и при проектировании и строительстве современного арктического флота и специализированной морской техники гражданского назначения несомненно подтверждают ее высокую практическую значимость для металлургической отрасли и экономики страны в целом.

Вместе с тем по диссертационной работе имеются замечания, которые не затрагивают основных выводов и выносимых на защиту положений:

1. В работе не уделено достаточного внимания исследованию металлургического качества разработанных судостроительных сталей, которое во многом определяет показатели потребительских и эксплуатационных свойств листового проката. Не приведены параметры технологии выплавки.

2. Известно, что судостроительные стали при длительной эксплуатации подвергаются механическому старению, что подтверждается многочисленными исследованиями, выполненными в том числе в ЦНИИ КМ «Прометей». В данной работе

не проводилась оценка изменения механических свойств стали, обусловленное данным явлением.

3. Предложенные технологические приемы при производстве листового проката имеют прецизионный характер. Как в условиях массового производства реализуется их контроль и выполнение?

4. В работе уделено достаточное внимание исследованию влияния температуры отпуска на изменение структуры и карбидообразование, при этом не уделено достаточного внимания изменению времени выдержки при отпуске на развитие процесса рекристаллизации в α -фазе речных составляющих.

5. По тексту имеется ряд опечаток:

- на стр. 5 в пункте 7.3.2.3 опечатка (должно быть 7.2.2.3),
- на стр. 9 в задачах вместо п.1 должен быть п.7,
- на стр. 47 – АО «Выксунский металлургический комбинат», нужно завод.
- на рис. 6.8 (стр. 314) вместо листа № 6/25-2 – лист № 6/25-3, как изложено в тексте.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации, которая представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, выполнена автором на высоком научном уровне и характеризуется практической значимостью. В целом диссертация написана хорошим техническим языком и оформлена в соответствии с установленными действующими требованиями ВАК. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Результаты данной работы могут быть использованы при исследованиях и разработках в области металловедения низкоуглеродистых свариваемых толстолистовых сталей, необходимость в применении которых обусловлена потребностями различных отраслей металлургического сектора (строительной, трубной промышленности, ветроэнергетики, тяжелого машиностроения). Результаты диссертации также целесообразно использовать при разработке учебных курсов по металловедению и термической обработке металлов для студентов старших курсов вузов и аспирантов по специальности 2.6.1 и 2.6.17.

Таким образом, представленная диссертационная работа Сыч Ольги Васильевны «Научно-технологические основы формирования структуры и свойств хладостойких сталей для Арктики» является законченным научно-техническим исследованием, которое показало хорошие результаты при практической реализации и внедрении предложенных автором решений. В работе успешно решена важная для страны задача по обеспечению высоконадежными материалами проектирования и строительства современной морской техники для освоения арктического шельфа и круглогодичной проводки судов по Северному морскому пути, что способствует развитию экономических интересов, а также сохранению технологического суверенитета и геополитической безопасности Российской Федерации в Арктике.

Считаем, что диссертационная работа Сыч О.В. по своему теоретическому, методическому и экспериментальному уровню, объему выполненных исследований и разработок, актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости полученных результатов полностью соответствует действующим требованиям пункта 9 Положения ВАК «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (в редакции Постановления Правительства РФ от 25.01.2024 г. № 62), 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.

Работа была заслушана, обсуждена и получила положительную оценку на заседании кафедры материаловедения и технологии художественных изделий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» 23.05.2024 г., Протокол заседания № 14.

Декан механико-
машиностроительного
факультета,
доктор технических наук,
профессор



Максаров
Вячеслав Викторович

Профессор кафедры
материаловедения и
технологии
художественных изделий,
доктор технических наук,
доцент



Вологжанина
Светлана Антоновна

Секретарь заседания

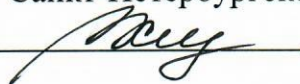


Кузнецова
Ирина Николаевна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»
21-я линия, д.2, Санкт-Петербург, 199106,
тел.: +7 (812) 328-8200, e-mail: rektorat@spmi.ru

Подпись Максарова В.В., Вологжаниной С.А., Кузнецовой И.Н. заверяю:

Главный ученый секретарь Санкт-Петербургского горного университета императрицы
Екатерины II



Хлопонина Вера Сергеевна



В.И. Коломенская
11.06.2024
