

ЦНИИ КМ «Прометей»

Вх № 1984/17	в ДЕЛО
«14» 06 2024 г.	№
Осн. 10 л.	подп.

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Сыч Ольги Васильевны
**«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 представленной работы обусловлена необходимостью обеспечения новейшей специализированной морской техники высококачественными хладостойкими судостроительными материалами, способными выдерживать сложные климатические условия Арктического региона, и технологиями, которые позволяют полностью исключить импорт продукции.

Основным элементом арктической инфраструктуры, несомненно, являются мощные атомные ледоколы, обеспечивающие надежную круглогодичную эксплуатацию Северного морского пути, роль которого как средства коммуникации будет, несомненно, возрастать. Потребовалась разработка хладостойких свариваемых судостроительных сталей, в том числе с индексом «Агс» (арктического применения), способных обеспечить прочность корпуса при ледовой нагрузке и надежную эксплуатацию корпусных конструкций при низких температурах в Арктике, восточных районах России, включая внутренние воды заливов арктических морей и устья северных рек. Эта задача успешно решена в представленной работе.

В литературном обзоре, дающем достаточно подробное представление о металлургических основах создания хладостойких судостроительных сталей, развитии требований к ним, текущем состоянии разработок в области судостроения (в том числе обзор известных композиций легирования и технологий производства) к моменту начала выполнения диссертационной работы. Очевидно, что разработанные ранее «базовые» судостроительные стали категорий D, E и F ограничены в возможности их применения для арктических конструкций. В связи с этим работа Сыч О.В., целью которой стало создание хладостойких судостроительных сталей с пределом текучести 355...750 МПа с гарантированной работоспособностью при низких температурах (с индексом «Агс»), которые можно применять без ограничений для любых элементов конструкций, предназначенных для эксплуатации в Арктике, и технологий их производства, является

актуальной и своевременной. Данные стали не имеют аналогов в мире по совокупности получаемых характеристик прочности, пластичности, хладостойкости, трещиностойкости, свариваемости, коррозионной стойкости и коррозионно-механической прочности.

Отличительной особенностью данной диссертационной работы является системность и последовательность выполнения исследований, логика изложения материала. В работе предложен комплексный подход, включающий разработку требований структуре хладостойких судостроительных сталей для Арктики, обеспечивающих получение гарантированных характеристик прочности, хладостойкости (работы удара KV вплоть до температур минус 60...минус 80°C, температур вязко-хрупкого перехода $T_{кб}$ и нулевой пластичности NDT) и трещиностойкости по критерию критического раскрытия вершины трещины CTOD, и поиск научно-обоснованных технологических решений для достижения заданного структурного состояния.

Проведенные в главе 3 исследования значительно расширяют представления о взаимосвязи структуры с характеристиками работоспособности низкоуглеродистых низко- и экономнолегированных судостроительных сталей, полученных при различных термомеханических схемах обработки. Автором впервые предложен переход от качественной оценки структуры судостроительной стали, обеспечивающей высокий комплекс механических свойств, к ее количественной интерпретации. Показано, что при зрительной однородности формируемой структуры и ее морфологическом подобии, могут быть получены различные характеристики хладостойкости и трещиностойкости. В настоящей работе впервые предложена система комплексной последовательной оценки структуры листового проката из судостроительных сталей с гарантированной работоспособностью при низких температурах на различных масштабных уровнях.

В работе установлено, что для низколегированных сталей после термомеханической обработки в первую очередь должна быть нормирована допустимая степень анизотропии ферритно-бейнитной структуры по всему сечению листового проката, обусловленная неравномерностью распределения термомеханически-кинетических параметров при прокатке и последующем охлаждении. При формировании структуры заданной морфологии и допустимой степени анизотропии получение каждой конкретной характеристики работоспособности зависит

от определенных параметров структуры, характеризующих внутреннюю субзеренную структуру металла. На основании установленных взаимосвязей автором разработаны количественные требования к ключевым параметрам структуры с оценкой их допустимого изменения по всему сечению листового проката, которые позволяют обеспечить получение высокой хладостойкости и трещиностойкости. Ранее такие требования отсутствовали как в отечественной, так и зарубежной практике.

Для высокопрочных сталей с пакетно-блочной бейнитно-мартенситной структурой показано, что характеристики работоспособности определяются в первую очередь не размером бывших аустенитных зерен и пакетов, а размером блоков и субблоков, особенностями внутреннего субзеренного строения в структурных составляющих, а также морфологией и распределением карбидных частиц. Автором установлено, что данные структурные особенности существенно отличаются при использовании различных способов закалки, что и обуславливает различный уровень хладостойкости. Получение более низких значений температуры вязко-хрупкого перехода $T_{кб}$ в листовом прокате после закалки с прокатного нагрева с отпуском по сравнению с традиционной печной закалки, несмотря на значительную разнотерность исходного зерна аустенита по сечению листового проката, обеспечивается благодаря формированию бейнитной или бейнитно-мартенситной структуры преимущественно реечного типа, характеризующейся наличием фрагментированного строения в реечных составляющих, высокой однородностью по размерам элементов структуры при заданном угле толерантности $\theta_t=5^\circ$ и более дисперсной карбидной фазой. Обеспечение высоких характеристик работоспособности после печной закалки, наоборот, требует формирования значительной доли бейнита гранулярной морфологии с субзеренным строением α -фазы, а размер бывших аустенитных зерен должен быть строго ограничен.

Для обеспечения требуемого структурного состояния по всей толщине листового проката больших толщин в промышленных условиях необходимо было существенно переработать технологические процессы термомеханической и термической обработки, что, как показано автором, позволяют возможности современного оборудования с автоматизированным управлением и высокой степенью воспроизводимости различных технологических приемов горячей пластической деформации.

Предложить прецизионные технологические подходы соискателю позволили исследования особенностей процессов структурообразования (кинетики роста зерна аустенита под прокатку, динамической и статической рекристаллизации) и результаты моделирования на пластометре «GLEEBLE 3800», что подробно отражено в главе 4 диссертационной работы. В своей работе Сыч О.В. проводит последовательное и систематическое исследование закономерностей протекания структурообразующих процессов, происходящих при горячей пластической деформации и последующем ускоренном охлаждении. Моделирование технологических процессов производилось с варьированием всех возможных параметров, управление которыми возможно при реализации заданных режимов в реальных промышленных условиях. Глубокое понимание особенностей структурообразующих процессов создало надежную основу для решения прикладных задач. В результате соискателем предложены режимы горячей пластической деформации, обеспечивающие измельчение зеренной и субзеренной структуры на каждом этапе технологической цепочки производства.

В главах 5 и 6 автором подробно исследовано влияние температурно-деформационных схем прокатки, условий охлаждения, параметров закалки и высокотемпературного отпуска на параметры структуры по сечению, механические свойства, характеристики работоспособности и характер разрушения образцов от листов больших толщин из низко- и экономнолегированных сталей, изготовленных в промышленных условиях. Определены возможные технологические причины получения неблагоприятной анизотропной ферритно-бейнитной, бейнитной и бейнитно-мартенситной структуры, а также граничные температурные условия отпуска, исключая развитие рекристаллизационных процессов по механизму «in-situ» в речных составляющих, в зависимости от способа закалки. Установлена возможность дополнительного измельчения элементов субструктуры при рациональном выборе режимов высокотемпературного отпуска, что продемонстрировано для сталей различного легирования.

На основании проведенных исследований разработаны промышленные технологические режимы, обеспечивающие при их полном воспроизведении выполнение разработанных требований к параметрам структуры, для производства широкого спектра судостроительных сталей арктического применения:

- термомеханической обработки с ускоренным охлаждением для

низколегированных сталей с гарантированным пределом текучести 355-460 МПа с индексом «Arc» толщиной до 50 мм и уровнем прочности 355-390 категории F вплоть до толщины 100 мм;

- закалки с прокатного и печного нагрева с высокотемпературным отпуском для экономнолегированных сталей с гарантированным пределом текучести 500-750 МПа с индексом «Arc» толщиной до 60 мм;

- закалки с прокатного нагрева с высокотемпературным отпуском для низколегированных сталей категории F с гарантированным пределом текучести 420-460 МПа толщиной до 100 мм,

которые прошли апробацию в промышленности и адаптированы к технологическим возможностям трех металлургических комбинатов.

Справедливость предложенных научно технологических подходов и выводов нашли свое подтверждение не только в экспериментальных результатах, но и в реальной практике при изготовлении представительного объема опытно-промышленных партий листового проката, подтверждением его высоких механических свойств и характеристик работоспособности, удовлетворяющих требованиям к материалам для конструкций, работающих при температуре минус 40...минус 50 °С, получением свидетельств о признании изготовителя, реальных поставках листового проката для заводов-строителей морской техники – АО «Балтийский завод», ООО «ССК «Звезда» и других предприятий судостроительной отрасли.

Существенный интерес представляют исследования, выполненные в главе 7 диссертационной работы, по влиянию уровня тепловложения при сварке, послесварочной термической обработки на структуру, хладостойкость и трещиностойкость на наиболее опасных участках зоны термического влияния, а также совместного воздействия температуры и деформации на их деформационную способность для сварных соединений из разработанных судостроительных сталей.

Научная новизна исследований и разработок не вызывает сомнений. Она связана с тремя основными направлениями, которые, как показано автором, лежат в основе создания хладостойких судостроительных сталей с индексом «Arc»:

- разработкой комплексных количественных требований к параметрам структуры различного типа (ферритно-бейнитной, бейнитной и бейнитно-мартенситной) и их допустимому изменению по сечению листового проката в зависимости от легирования

(для низко- и экономнолегированных судостроительных сталей) и технологии производства (термомеханическая обработка с ускоренным охлаждением, закалка с прокатного или печного нагрева с высокотемпературным отпуском), обеспечивающим получение гарантированных характеристик работоспособности при низких температурах (1, 4 и 9 положения научной новизны);

- разработкой научно обоснованных концепций легирования для формирования структуры с заданной морфологией, соотношением структурных составляющих и допустимой степенью ее анизотропии (2, 6 и 7 положения научной новизны);

- разработкой технологических приемов, направленных на повышение дисперсности и однородности превращенной структуры по всему сечению листового проката толщиной до 100 мм, предложенных на основании результатов исследования процессов структурообразования с учетом градиента температур и деформации по сечению крупномасштабных заготовок при двухстадийной горячей прокатке, снижения интенсивности охлаждения в центральных слоях при последующем ускоренном охлаждении и других особенностей изготовления листов больших толщин (3 и 8 положения научной новизны).

Степень обоснованности научных положений и выводов. Все сформулированные автором научные положения и выводы основываются на представительном объеме теоретических и экспериментальных данных. В частности, следует отметить, что для разработки прецизионных технологических процессов эффективно использованы возможности имитационного моделирования - дилатометра DIL 805 для исследования структурообразующих процессов и комплекса «GLEEBLE 3800» для моделирования технологических процессов (более 100 режимов) с их опробованием в промышленных условиях. В сочетании с традиционными методиками исследования структуры с помощью оптической металлографии, автором использовались современные количественные методики распознавания и оценки структурных составляющих с помощью EBSD-анализа и просвечивающей электронной микроскопии, что позволило автору последовательно объяснить все предлагаемые технологические решения с точки зрения структурообразующих процессов на каждом этапе производства листового проката.

Практическая значимость результатов работы не вызывает сомнений, о чем свидетельствует ее полномасштабное внедрение, подтвержденное 5 актами внедрения

(заводами-производителями листового проката, основным КБ-проектантом сложной морской техники арктического назначения – АО «ЦКБ «Айсберг»). Разработана нормативно-техническая и технологическая документация. Разработанные технологии внедрены на трех металлургических комбинатах - ПАО «ММК», ПАО «Северсталь», Филиал АО «Инжиниринговая компания «АЭМ-технологии» «АЭМ-Спецсталь» (ранее ООО «ОМЗ-Спецсталь»). Разработанные стали с индексом «Arc» внесены в новую редакцию ГОСТ Р 52927-2023, разработанные химические составы и способы производства защищены 6 патентами РФ. Разработанные стали использованы при проектировании и строительстве крупнейших в мире атомных ледоколов проекта 22220 «Арктика», «Сибирь», «Урал», «Якутия», «Чукотка», «Ленинград», сверхмощного ледокола «Лидер» проекта 10510 и других судов, проектировании модернизированного атомного плавучего энергоблока проекта 20871, судна атомно-технологического обслуживания проекта 22770 и других объектов сложной морской техники для Арктики.

Автореферат диссертации и публикации автора (из них 31 по перечню ВАК) соответствуют содержанию и достаточно полно ее отражают. Результаты работы прошли широкое обсуждение на международных научно-технических конференциях, форумах и семинарах.

По работе имеются следующие замечания и вопросы:

1. Желание соискателя как можно точнее оконтурить поле новых знаний, полученных в работе (и составляющее её научную новизну) вполне понятно, с учетом многих близких работ, ведущихся, например, в рамках разработки научных основ технологии получения высокопрочных листовых сталей для крупных газотранспортных систем. Однако в итоге блок работы, синтезирующий её научную новизну, оказался несколько громоздким и, безусловно, мог быть представлен в более компактной форме.

2. В работе достаточно большое количество терминов, параметров, приведенных в сокращенной форме (в виде аббревиатуры), например, РСЭ (размер структурного элемента), БАЗ (бывшее аустенитное зерно) и др., но не все из них получили такое широкое распространение, как, например, ПЭМ (просвечивающая электронная микроскопия). Их расшифровка дается в тексте, по мере упоминания, что неизбежно приводит к дополнительным временным затратам при работе с текстом. В этой связи, как вариант, имело смысл дать их расшифровку, например, в автореферате в виде сносок, по аналогии с расшифровкой терминов $T_{кб}$ и NDT (с. 4 автореферата).

3. Не всегда удачно представлены экспериментальные результаты, например, рис. 5 автореферата («Взаимосвязь критической температуры $T_{к6}$ и СТOD со средними и максимальными РСЭ»), даже в предположении, что ставилась задача оценить только корреляционные зависимости. С учетом роли структуры в формировании уровня данных параметров, характеризующих сопротивление металла разрушению, как минимум, необходимо изменить их расположение по осям координат (тем более из нанесенных на графике кривых следует, что в действительности, шел поиск зависимостей). Полученные модельные кривые отражают зависимости, которые визуально можно оценить, как нелинейные. Однако из визуального анализа характера расположения экспериментальных точек на графическом поле нельзя исключить возможность вывода о том, что ряд совокупностей точек можно было описать и линейной зависимостью. В связи с этим следовало привести дополнительные аргументы, подтверждающие точку зрения соискателя в данном вопросе.

4. При сравнении экспериментальных результатов наблюдения различных выборок результатов измерения нередко используются их средние значения и соответствующие ошибки. Это гарантирует объективность при сопоставлении результатов, оценке их воспроизводимости. Однако данный подход предполагает нормальность распределения полученных результатов. В этой связи не вполне понятно, в какой мере обосновано применение такого подхода, например, при оценке размеров структурных элементов (рис. 15 а,б автореферата). По крайней мере, из приведенных гистограмм, наличие нормального распределения явно не вытекает. Не вполне ясно также и то, в какой мере приведенные распределения можно принять в качестве гистограмм – отсутствуют данные о количестве измерений (приведены только их доли, в процентах), отсюда не ясны основания в выборе количества разрядов (и их ширины). И не могли ли поэтому соседние разряды (в случае недостаточного количества измерений) оказаться взаимно коррелированными?

5. По исследуемым сталям накоплена значительная статистика данных изображений структур, полученных по различным технологиям, результатов измерения их строения, однако описание геометрии её строения имеет еще далеко не полный характер, в частности, в связи с необходимостью оценки закономерностей расположения однотипных структурных составляющих в объеме металла, различных составляющих относительно друг друга (с учетом статистической природы

распределения размеров элементов структур). Это позволило бы, в частности, более объективно оценить их совместное влияние на сопротивление металла разрушению.

6. В работе анализировалось строение изломов исследуемых сталей. Это закономерно, поскольку различие в строении среды с неоднородной структурой неизбежно должно получить свое отражение в механизмах разрушения, и, соответственно, фрактографический анализ должен был в определенной мере дать представление о критических параметрах морфологии структур, определяющих различия в закономерностях разрушения. Однако выводы по результатам фрактографического анализа оказались ограничены преимущественно упоминанием о доле вязкой составляющей в изломе. Это, безусловно, важно, в частности, с учетом требований соответствующих нормативных документов, но недостаточно для получения необходимой глубины понимания о роли морфологии структур исследуемых сталей в разрушении.

Заключение.

Диссертационная работа Сыч Ольги Васильевны является законченной научно-исследовательской работой, в которой изложены научно обоснованные технологические разработки, имеющие существенное значение для экономической и геополитической безопасности нашей страны. Это позволило решить важнейшую народнохозяйственную задачу по обеспечению высоконадежными судостроительными сталями строительства мощного ледокольного флота, морских ледостойких платформ и другой конкурентоспособной специализированной морской техники, обеспечивающей эффективное и экологически безопасное освоение углеводородных ресурсов шельфовых месторождений, интенсивную круглогодичную эксплуатацию СМП и технологический суверенитет РФ.

Результаты работы целесообразно использовать для повышения качества отечественных судостроительных материалов, эксплуатирующихся при низких температурах, что позволяет увеличить срок службы сложных сварных конструкций, а также рекомендовано адаптировать и для других отраслей промышленности.

Диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне, логично построена, написана доступным языком и аккуратно оформлена. Структура и содержание диссертационной работы полностью соответствуют цели и поставленным задачам исследования.

В целом, диссертационная работа Сыч Ольги Васильевны по своему теоретическому, методическому и экспериментальному уровню, объему выполненных исследований, актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости полученных результатов соответствует действующим требованиям ВАК, установленным п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013г. N 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а ее автор, Сыч Ольга Васильевна заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Официальный оппонент,
профессор кафедры металловедения и
физики прочности
Федерального государственного
автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский
технологический университет «МИСИС»,
доктор технических наук по специальности
05.16.01 – Металловедение и
термическая обработка металлов,
профессор

Кудря Александр Викторович


11.06.2024

119049, Москва, Ленинский проспект,
д. 4, стр. 1,
Электронная почта: avkudrya@misis.ru
Тел.: 8-495-638-46-86

ПОДПИСЬ 
Проректор по безопасности
и общим вопросам
НИТУ МИСИС 



Дзнакошлена 14.06.2024
