

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу **Яковлевой Екатерины Александровны**
«Прогнозирование склонности к деформационному старению ферритно-перлитных, ферритно-бейнитных и бейнитно-мартенситных судостроительных сталей»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.16.01 - «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Актуальность избранной темы диссертационной работы

Надежность сварных конструкций в судостроении во многом определяется сопротивляемостью стали и сварных соединений хрупким разрушениям и деформационной способностью металла. Снижение этих характеристик происходит вследствие деградации структуры стали при старении. Современные судокорпусные стали имеют пониженное содержание углерода (0,07 – 0,12%), низкое содержание азота (до 0,008%) и производятся по технологиям закалки с прокатного нагрева с отпуском (ЗПН+О) и термомеханической обработки (ТМО). В результате стали имеют метастабильную структуру с продуктами бейнитного превращения, поэтому они потенциально склонны к старению, что может усиливаться при технологических операциях (гибки, отпуска). Изучение этих вопросов далеко от завершения. Поэтому тема рассматриваемой диссертации является несомненно актуальной, поскольку конечным результатом изучения и прогнозирования процессов деформационного старения низкоуглеродистых судокорпусных сталей является обеспечение технологичности материала и надежности сварных конструкций ответственного назначения.

Общая характеристика диссертационной работы

Рассмотренная диссертационная работа изложена на 226 страницах, состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы (115 наименований) и Приложений. Представлены два акта внедрения. Текст работы содержит 85 рисунков и 44 таблицы.

Объектом исследования послужили низкоуглеродистые низколегированные и легированные судокорпусные стали с разным типом структуры: ферритно-перлитные, ферритно-бейнитные и бейнитно-мартенситные в зависимости от класса прочности.

Предметом исследования являлась взаимосвязь параметров структуры низкоуглеродистых сталей и их склонности к деформационному старению, что проявляется в изменении структурного состояния и механических свойств металла.

Достоверность и обоснованность основных научных положений, результатов, выводов и рекомендаций работы обусловлена воспроизводимостью и согласованностью полученных данных, применением современных средств исследования микроструктуры стали и обработки информации, большим набором материалов для исследований и значительным объемом исследовательских работ. Научные положения, развиваемые в работе, основываются на базовых положениях материаловедения

НИИ «Курчатовский институт» ЦНИИ КМ «Прометей»	
Вх. № 1412	в ДЕЛО
02.06.2021 г.	№
Осн. 6 л.	

легированных сталей и не противоречат имеющимся современным представлениям. Выводы по работе соответствуют поставленным задачам исследования.

Оценка содержания автореферата, оформления и апробации диссертационной работы.

Работа написана грамотным техническим языком. Текст диссертации и автореферата аккуратно оформлен. Содержание автореферата полно и точно отражает содержание и результаты диссертации. Основные положения диссертации отражены в 15 статьях, в том числе в 4 статьях в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК. Работа прошла апробацию на 11 отечественных и международных научно-технических конференциях.

Научная новизна работы и практическая значимость

Научная новизна работы является несомненной и состоит в нижеследующем. Для широкой гаммы низкоуглеродистых низколегированных судокорпусных сталей выявлены составляющие структуры, которые являются ответственными за склонность к деформационному старению сталей с разным типом структуры, и установлены пороговые значения параметров этих структурных составляющих (доля речного бейнита и перлита в структуре, размер зерна феррита).

Выявлена взаимосвязь полноты прохождения отпуска после закалки или ЗПН для низкоуглеродистых легированных Cr-Ni-Mo сталей с их склонностью к деформационному старению, в результате показана необходимость полного выделения углерода из твердого раствора и связывания углерода в карбиды для обеспечения стойкости металла к старению.

Предложено объяснение механизма перераспределения углерода в структуре низкоуглеродистой стали при ее деформационном старении на основе учета «трубочной диффузии» углерода по ядрам дислокаций, что обеспечивает приемлемые значения среднего диффузионного пробега (R_D) с учетом характеристик структуры рассматриваемых сталей, что недостижимо на основе лишь объемной диффузии.

Установлено, что для низколегированной стали, структура которой содержит более 25% речного бейнита, проведение высокого отпуска после ТМО или после деформационного старения не уменьшает склонности к деформационному старению вследствие перераспределения карбидной фазы на границы зерен.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные результаты могут быть эффективно использованы в металлургической и судостроительной отраслях для предотвращения склонности к деформационному старению вновь выпускаемой продукции и оценки склонности к старению для металлопродукции после длительного хранения. Важным практическим результатом является установление пределов значений параметра Холломоны-Яффе для легированных сталей разных классов прочности. Практическая значимость результатов работы подтверждается внедрением (подкреплено актами) результатов работы в учебный процесс по профильным специальностям в ФГАОУ ВО СПбПУ, и внедрением разработанных «Методических указаний ...» в ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина».

Анализ работы по разделам

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертации, выбранную цель и поставленные задачи исследований, описание объекта и методов исследований, научную новизну, сведения о публикациях и апробации, положения для защиты.

В первой главе представлен анализ истории и современного состояния исследований склонности судокорпусных сталей разного типа к естественному и деформационному старению с использованием многочисленных литературных источников (115). Диссертантом установлено, что предложенные в литературе механизмы старения имеют различия. Автор закономерно заключил, что в целом процесс старения подразделяется на три этапа: образование атмосфер Коттрелла, образование сегрегаций на дислокациях, образование стабильных выделений карбидной фазы. Выявлено, что основной объем данных по склонности низколегированных сталей к старению представлен на материале трубных сталей (17Г1С, 10Г2ФБ и 06Г2НДФБ), однако по судокорпусным сталям информации гораздо меньше, а по высокопрочным Cr-Ni-Mo сталям она, фактически, отсутствует. Совершенно справедливо автор диссертации выявил, что стали, имеющие в структуре бейнитную составляющую, более склонны к старению по сравнению со сталями с ферритно-перлитной структурой. Здесь было бы полезно рассмотреть роль карбидов и карбонитридов Nb, V и Ti, а также МА-составляющей как элементов структуры, связывающих углерод. Определены механические свойства, в наибольшей мере изменяющиеся из-за старения и выполнен анализ методов испытаний на деформационное старение. Обоснована важность выявления структурных факторов, ответственных за склонность стали к старению. Литературный обзор является весьма качественным. В конце главы сформулированы цель и задачи работы.

Вторая глава содержит материалы и методы исследований. Исследования проводились на материале очень широкого ассортимента судокорпусных низкоуглеродистых низколегированных и легированных сталей (с микролегированием) с гарантированным пределом текучести от 235 до 960 МПа. Всего использовано 14 марок сталей, некоторые – после хранения в течение 12 и 15 лет. Широкий набор сталей по составу, структуре и технологии производства позволил провести комплексное исследование.

В результате анализа выбраны оптимальные методы испытаний и исследований, которые позволяют оценить склонность судокорпусных сталей разного типа и сварных соединений к деформационному старению, а также работоспособность металла после старения. Углубленные исследования структуры проведены с использованием СЭМ, ПЭМ, рентгеноструктурного фазового анализа и метода дифракции нейтронов, что подтверждает высокое качество исследований.

Третья глава работы является самой объемной и содержит комплексное исследование склонности к естественному и деформационному старению судокорпусных сталей низкой и средней прочности, а также трубной стали X90 (07Г2НДМФБТ).

Автор работы выявил характер и закономерности прохождения процесса деформационного старения для судокорпусных сталей (классов прочности от Е и F32W до E500W), имеющих разную структуру (ферритно-перлитную, ферритно-бейнитную при разной доле гранулярного и реечного бейнита) и изготовленных по разным технологиям производства (термоулучшение, ЗПН+О, ТМО). Исследовалось изменение структуры сталей, включая эволюцию карбидной фазы, и механических свойств при естественном старении после длительного хранения (12, 15 лет), а также после деформационного старения, проводимого с варьированием параметров деформации и температуры. Кроме того, оценивалось влияние дополнительного отпуска металла после ТМО или после старения.

Выявлено, что интенсификация старения приводит к усилению выделения углерода из твердого раствора, это подтверждено результатами рентгеноструктурного фазового анализа. В научном плане главным результатом является выявление структурных составляющих, которые заметно влияют на характер деформационного старения. Установлены граничные значения доли реечного бейнита ($\geq 25\%$), перлита ($> 20\%$), а также размера зерна феррита (> 20 мкм), определяющие появление склонности к деформационному старению. Автором сделан справедливый вывод, что влияние реечного бейнита в структуре низколегированной стали на ее склонность к старению связано с характерными особенностями такой структуры: повышенной плотностью дислокаций, повышенным количеством углерода в твердом растворе, наличием островков МА-составляющей по границам реек и блоков бейнита. Образование карбидов при старении таких сталей происходит также в результате распада МА-составляющей. Эволюция МА-составляющей в структуре стали на разных стадиях обработки обсуждается применительно к трубным сталям, однако в данном исследовании не показана. Выявлены характерные проявления старения судосталей: уменьшение деформационной способности стали и изменение типа разрушения с вязкого транскристаллитного на вязкое зернограничное и в пределе – на квазискол. Большой научный интерес представляет оценка подвижности углерода в структуре, выполненная расчетным методом на основе результатов рентгеноструктурного анализа и ПЭМ. Практически важным является обоснование бесполезности отпуска после ТМО или отпуска после старения, что объяснено перераспределением карбидной фазы на границы зерен.

В четвертой главе работы представлены результаты исследования склонности к деформационному старению низкоуглеродистых легированных судостроительных Cr-Ni-Mo сталей с гарантированным пределом текучести от 500 до 960 МПа с бейнитно-мартенситной структурой. Выявлены закономерности изменения структуры и свойств этих сталей в зависимости от величины деформации, после длительного вылеживания, в зависимости от режимов закалки и отпуска, наличия повторного отпуска, а также типа технологии производства (термоулучшение и ЗПН+О). Вызывает интерес раздел об оценке выхода углерода из твердого раствора методом дифракции нейтронов для сталей с разным

соотношением мартенсита и бейнита в структуре. В результате исследований получены закономерности для склонности Cr-Ni-Mo сталей к деформационному старению от доли мартенсита в структуре и от полноты прохождения процесса отпуска. Обоснована необходимость связывания излишков углерода при отпуске для предотвращения неконтролируемого выделения карбидов при старении. Выявлен специфический характер изменения механических свойств легированных сталей в результате деформационного старения: снижение работы удара невелико, но происходит существенное изменение характера деформирования стали, в пределе – с исчерпанием деформационной способности.

Полноту прохождения отпуска легированных сталей автор предлагает оценивать с помощью параметра Холломона-Яффе, в котором учитывается температура и время отпуска. Установлены пределы параметра Холломона-Яффе для легированных сталей разных классов. Выводы по граве 4 следовало бы дополнить указанием особенностей строения бейнитной и мартенситной составляющей структуры, важных применительно к старению стали.

Пятая глава посвящена оценке влияния деформационного старения на характеристики работоспособности толстолистового проката и сварных конструкций из судокорпусных сталей разных классов прочности и с разным типом структуры. В результате оценки трещиностойкости, стойкости к коррозионным разрушениям, сопротивляемости хрупкому разрушению получено, что основной металл и сварные соединения судокорпусных сталей при благоприятном характере структуры имеют устойчивость к деформационному старению. Предложенные диссертантом рекомендации по структурному состоянию сталей и критерии оценки склонности сталей к деформационному старению являются научно обоснованными, подтверждены многочисленными экспериментами и не вызывают вопросов и возражений. В главе также представлены результаты внедрения работы.

В заключении представлены основные выводы по работе.

Замечания по рассмотренной диссертационной работе

1. Было бы полезно количественно оценить содержание МА-составляющей в ферритно-бейнитной структуре с реечным бейнитом (травлением в реактиве ЛеПера) для исходного состояния стали и на разных стадиях ее старения в зависимости от параметров обработки, после дополнительных отпусков.

2. Не проведена оценка связывания углерода в наноразмерных карбонитридах микролегирующих элементов Nb, V и Ti, которые формируются при высоком отпуске стали после закалки или ЗПН, хотя исследованные стали содержат до 0,05% Nb и 0,03-0,06% (Ti+V).

3. Следовало бы объяснять формирование повышенного количества реечного бейнита в стали F36W (с 0,6 % Ni) по сравнению с трубной сталью 07Г2НДМФБТ (Х90, с 0,4 % Ni) не только повышенным содержанием никеля, но также менее интенсивными деформациями стали F36W при прокатке в процессе ТМО, поскольку для судокорпусных сталей не требуется обеспечивать хладостойкость при испытаниях падающим грузом (ИПГ).

4. Требуется пояснения, почему металл зоны крупного зерна ЗТВ сварных соединений имеет хорошую устойчивость к деформационному старению, хотя в этой зоне структура стали состоит преимущественно из речного бейнита, который признан неблагоприятным для сопротивляемости старению, а также наблюдается выделение карбидов.

Сделанные замечания не снижают положительной оценки работы, так как не затрагивают ее основные положения и выводы.

Заключение

Диссертационная работа Яковлевой Екатерины Александровны является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена научная задача оценки и прогнозирования деградации механических свойств судостроительных сталей с различной структурой вследствие деформационного старения, а также разработаны рекомендации для снижения и предотвращения склонности к деформационному старению для судокорпусных низколегированных и легированных сталей разных классов прочности. Результаты научных изысканий можно классифицировать как новые и обоснованные, они имеют существенное научное и практическое значение.

Представленная работа соответствует требованиям, сформулированным в п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, а автор диссертации Яковлева Екатерина Александровна заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Официальный оппонент,

доктор технических наук,
главный научный сотрудник лаборатории исследований материалов
Корпоративного научно-технического центра развития
трубной продукции ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

 С.Ю. Настич

21.05.2021

Настич Сергей Юрьевич, доктор технических наук, специальность 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Адрес: 142717, область Московская, г. Видное, п. Развилка, проезд Проектируемый № 5537, владение 15, строение 1

e-mail: S_Nastich@vniigaz.gazprom.ru; раб. тел.: (498) 657-40-48, 657-46-88, доб. 31-81

Подпись С.Ю. Настича заверяется
ведущий специалист по кадрам



Е.В. Мелещенко

Ознакомлена
02.06.2021

