

На правах рукописи

УДК 669.14.018.293:539.4

ГРНТИ 53.49



**ЯКОВЛЕВА ЕКАТЕРИНА АЛЕКСАНДРОВНА**

**«ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СКЛОННОСТИ К ДЕФОРМАЦИОННОМУ  
СТАРЕНИЮ ФЕРРИТНО-ПЕРЛИТНЫХ, ФЕРРИТНО-БЕЙНИТНЫХ И  
БЕЙНИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ»**

Специальность: 05.16.01 - «Металловедение и термическая обработка металлов и  
сплавов»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт – Петербург

2021

Работа выполнена в федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

**Научный руководитель:**

**Хлусова Елена Игоревна** доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Чувильдеев Владимир Николаевич** доктор физико-математических наук, профессор, директор «Научно-исследовательского физико-технического института» ФГАОУ ВО «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

**Настич Сергей Юрьевич** доктор технических наук, главный научный сотрудник корпоративного научно-технического центра развития трубной продукции ООО «Газпром ВНИИГАЗ».

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Защита диссертации состоится « **22** » июня **2021** г. в **11 ч. 00 мин.** на заседании диссертационного совета Д411.006.01, созданного на базе Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей», по адресу: 191015, г. Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» и на сайте: <http://dissovet.criism-prometey.ru/ThesisDetails.aspx?id=38>

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Е.И. Хлусова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Эксплуатация судостроительных сталей, в том числе арктических условиях<sup>1</sup>, определяет высокие требования к их качеству. Применяемые для таких конструкций материалы должны гарантировать высокую технологичность в судокорпусном производстве и длительную надежную эксплуатацию - высокую работоспособность при отрицательных температурах и стабильность механических свойств.

Склонность к хрупкому разрушению может проявляться вследствие деградации свойств металла из-за развития процесса деформационного старения как в основном металле, так и в сварных соединениях. Известно, что процессы старения, которые приводят к изменению структурного состояния металла, протекают с течением времени. Старение обусловлено термодинамической неравновесностью исходного состояния и постепенным приближением структуры к равновесному состоянию в условиях достаточной диффузионной подвижности атомов внедрения. Сущность механизма старения конструкционных сталей с ОЦК-решеткой состоит в том, что примеси внедрения, находящиеся в твердом растворе  $\alpha$ -фазы, осаждаются на дислокациях и препятствуют их свободному движению, что приводит к охрупчиванию металла. Эти вопросы были достаточно подробно рассмотрены в работах Коттрелла, Давиденкова, Саррака.

Важные закономерности влияния холодной деформации при выполнении корпусных работ на судостроительных и судоремонтных предприятиях на склонность к охрупчиванию низколегированной стали были получены Горыниным И.В. и Канфором С.С. еще в 1950-е годы. В работах С.Т. Кишкина в те же годы показано, что деформационное старение в зависимости от условий эксплуатации оказывает неоднозначное влияние на характеристики работоспособности легированной стали: сопротивление распространению трещины и коррозионное растрескивание. Дальнейшие исследования по этому вопросу в литературе не были отражены. В настоящее время вопрос старения металла изучается в основном применительно к низкоуглеродистым низколегированным трубным сталям для магистральных газопроводов, которые изготавливаются контролируемой прокаткой или термомеханической обработкой, для современных низкоуглеродистых легированных судосталей вопросы деформационного старения практически не изучены.

Учитывая, что в последние годы при изготовлении листового проката из высокопрочных легированных сталей все чаще используется термомеханическая обработка и закалка с прокатного нагрева с отпуском, то есть технологии термомеханического упрочнения, способствующие созданию метастабильных состояний стали, вопросы предотвращения деградации механических свойств

---

<sup>1</sup> Часть настоящей работы, касающаяся низколегированных сталей, выполнена в рамках проекта «Энергоэффективные системы на основе возобновляемых источников энергии для арктических условий (EFREA)», финансируемого в рамках Программы приграничного сотрудничества «Россия – Юго-Восточная Финляндия 2014-2020», ID: KS1054.

вследствие старения металла с неравновесной структурой при операциях гибки и правки металлопроката в судокорпусном производстве, а также при его длительном хранении и эксплуатации являются весьма актуальными.

В связи с вышеизложенным **целью настоящей работы** является определение возможности прогнозирования, снижения или предотвращения деградации механических свойств судостроительных сталей с различной структурой вследствие деформационного старения.

Для достижения цели работы были поставлены следующие **задачи**:

1. Для низколегированных сталей: 1.1) определение взаимосвязи структуры стали со склонностью к деформационному старению; 1.2) установление влияния естественного и деформационного старения на изменение структуры и свойств сталей, изготовленных с использованием термомеханической обработки; 1.3) исследование влияние дополнительных обработок (отпуска) на изменение механических свойств стали после старения.

2. Для высокопрочных сталей: 2.1) исследование склонности к деформационному старению; 2.2) исследование влияния технологии изготовления на склонность к деформационному старению; 2.3) исследование влияния режимов закалки и отпуска на склонность к деформационному старению.

3. Исследование работоспособности стали и ее сварных соединений после деформационного старения.

4. Разработка методических указаний по прогнозированию и оценке склонности судостроительной стали к деформационному старению.

5. Разработка рекомендаций для предотвращения или снижения деградации механических свойств низкоуглеродистых сталей в результате деформационного старения.

**Объектом исследования** являлся листовая прокат толщиной до 80 мм с гарантированным пределом текучести от 235 до 960 МПа низкоуглеродистой микролегированной низколегированной и легированной судостроительной стали с ферритно-перлитной, ферритно-бейнитной и бейнитно-мартенситной структурами.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Взаимосвязь склонности к деформационному старению со структурой низколегированных и легированных судостроительных сталей.

2. Механизм деформационного старения низколегированных и легированных судостроительных сталей, подтвержденный результатами структурных исследований и механических испытаний.

3. Способы снижения или предотвращения склонности низколегированных и легированных судостроительных сталей к деформационному старению.

4. Методические указания по прогнозированию и оценке склонности судостроительной стали к деформационному старению.

При выполнении работы автором были получены следующие **результаты, обладающие научной новизной**:

1. Установлены закономерности изменения механических свойств судостроительных низкоуглеродистых сталей с ферритно-перлитной, ферритно-бейнитной и бейнитно-мартенситной структурами после естественного и деформационного старения и определены возможности предотвращения или снижения склонности к деформационному старению. Показано, что:

1.1. Низкоуглеродистые марганцевые ферритно-перлитные стали с содержанием никеля не более 0,4 % с долей перлитной составляющей в структуре менее 20% и размером зерна 15-20 мкм не проявляют склонности к деформационному старению, в том числе естественному.

1.2. Низкоуглеродистые марганцево-никелевые ферритно-бейнитные судостроительные стали проявляют склонность к деформационному старению при содержании в структуре более 25 % речного бейнита.

1.3. Низкоуглеродистые легированные бейнитно-мартенситные судостроительные стали не проявляют склонности к естественному старению. Деформационное старение этих сталей выражается в изменении диаграммы деформирования при отсутствии заметного влияния на работу удара.

2. С учетом влияния легирования на коэффициент диффузии углерода показано, что старение низкоуглеродистых сталей при комнатной температуре возможно только за счет «трубчатой» диффузии по ядрам дислокаций. При этом, в отличие от ферритно-бейнитных сталей, старение бейнитно-мартенситных сталей существенно лишь после предварительной деформации.

3. Установлено, что для предотвращения деформационного старения на этапе изготовления листового проката низкоуглеродистой низколегированной ферритно-бейнитной стали, необходимо формировать структуру с бейнитом преимущественно гранулярной морфологии (не более 25 % речного бейнита).

4. Показано, что для предотвращения деформационного старения низкоуглеродистой легированной мартенситно-бейнитной стали Ni - Cr – Cu - Mo композиции, необходимо при высоком отпуске обеспечить завершение процессов выделения углерода из твердого раствора.

**Практическая значимость** работы подтверждается тем, что установлены закономерности изменения свойств низкоуглеродистых микролегированных низколегированных и легированных судостроительных сталей с пределом текучести от 235 до 960 МПа, предназначенных для длительной эксплуатации в сложных условиях, вследствие деформационного старения, даны рекомендации по прогнозированию склонности к деформационному старению и ее снижению или предотвращению посредством формирования заданной структуры на этапе производства листового проката; разработаны методические указания по прогнозированию и оценке склонности судостроительной стали к деформационному старению. Полученные результаты **внедрены** (акты внедрения представлены в Приложениях диссертации):

- в виде методических указаний в Центре сталей для труб и сварных конструкций (в составе Научного центра качественных сталей) ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им.

И.П. Бардина») с целью использования при оценке качества низкоуглеродистых низколегированных конструкционных сталей;

- в учебный процесс в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

**Достоверность результатов** обеспечена большим объемом выполненных экспериментов, использованием современного оборудования, результатами механических испытаний, проведенных на этом оборудовании в соответствии с требованиями ГОСТов и «Правил...» Российского морского регистра судоходства, применением взаимодополняющих методов исследования структуры, которые подтверждают полученные механические свойства и характеристики работоспособности исследуемых сталей.

**Личное участие автора** в получении научных результатов, изложенных в работе, заключается в: 1) постановке задач исследования; 2) разработке плана и проведении экспериментов; 3) обработке полученных экспериментальных данных; 4) обработке диаграмм нагружения при испытаниях на растяжение; 5) анализе и интерпретации полученных результатов исследования процессов старения стали, фрактографических и металлографических исследований; 6) разработке методических указаний по прогнозированию и оценке склонности судостроительной стали к деформационному старению и практических рекомендаций; 7) публикации результатов научных исследований.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на XI, XVII, XVIII конференциях молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» (г. Санкт-Петербург, 2012 г., 2018 г., 2019 г.); Международной конференции PDM 2013 conference, (Финляндия, г. Лаппеенранта, 2013 г.); Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» - ПРОСТ-2018» (Москва, 2018 г.); XXIV Уральской школе металлургов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» (г. Магнитогорск, 2018 г.); Конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий» (г. Москва, 2019 г.); Международной конференции International Conference on Design and Manufacturing of Arctic Structures (DMAS – 2019) (г. Лаппеенранта, Финляндия, 2019 г.); Уральской школе-семинаре металлургов-молодых ученых (г. Екатеринбург, 2020 г.); Научных чтениях им. чл.-корр. РАН Ивана Августовича Одинга «Механические свойства современных конструкционных материалов» (г. Москва, 2020 г.); XIII Всероссийском молодежном научном форуме «Open Science 2020» (г. Гатчина, 2020 г.).

**Публикации.** Основное содержание работы опубликовано в 15 печатных работах, из них 4 статьи в журналах, рекомендованных перечнем ВАК, в том числе 1 публикация издана на английском языке и индексируется в базе данных SCOPUS, получен 1 патент.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация на 226 страницах состоит из введения, 5 глав, общих выводов по работе, списка литературы из 115 наименований, а также 3 Приложений, в которых представлены материалы, не вошедшие в основной объем работы, и 2 акта внедрения. Работа содержит 85 рисунков и 44 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и основные задачи исследований, описаны объект, методы и методология исследований, сформулирована научная новизна и практическая значимость, приведены сведения об апробации, публикациях по теме диссертации, также приводятся основные положения на защиту.

**В первой главе** приведен литературный обзор, в котором представлено обобщение имеющихся данных о механизмах деформационного старения стали и методах определения склонности к старению, рассмотрено влияние различных технологий производства на склонность стали к старению, представлены известные данные о влиянии структуры на склонность стали к деформационному старению, влиянии деформационного старения на изменение механических свойств стали, в том числе в процессе эксплуатации. Проведенный обзор литературных данных позволил определить цель и сформулировать задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** приведены материалы и методы исследований. В работе был исследован листовой прокат толщиной до 80 мм с гарантированным пределом текучести от 235 до 960 МПа судостроительной стали с ферритно-перлитной, ферритно-бейнитной и бейнитно-мартенситной структурами. Химический состав исследованных сталей, технология изготовления и структура представлены в таблице 1. Предложен комплекс исследований и испытаний низкоуглеродистой низколегированной и легированной судостроительной стали и ее сварных соединений для определения склонности к деформационному старению и ее работоспособности после старения, включающий всесторонние исследования структуры (в том числе рентгеноструктурный фазовый анализ и метод дифракции нейтронов, для всех состояний были исследованы структура и поверхность разрушения), испытание на растяжение, ударный изгиб, в том числе после деформационного старения, а также определение критического раскрытия в вершине трещины, определение склонности к коррозионному растрескиванию и определение склонности к деформационному старению в ЗТВ реальных сварных соединений.

**В третьей главе** приведены результаты исследования склонности к естественному и искусственному старению низкоуглеродистых низколегированных судостроительных сталей с различной структурой.

**Установлено, что склонность к естественному и искусственному старению проявляют стали, в структуре которых доля второй фазы превышает: перлита – 20 %, речного бейнита - 25 %.** Проведенные исследования марганцевой ферритно-перлитной стали с гарантированным пределом текучести 235 МПа (марки Е) показали, что после ТМО склонность к деформационному старению возрастает с увеличением доли перлита с 15-20 % до 30-40 %, а размера ферритного зерна - с 15-20 мкм до 30-40 мкм, рисунок 1, что проявляется в снижении значений работы удара (~ в 20 раз).

При этом в основном вязкий транскристаллитный механизм разрушения образцов меняется на хрупкий, рисунок 2.

Таблица 1 – Фактический химический состав исследованных сталей

Марка стали	Предел текучести, не менее, МПа	Химический состав, масс. %													Технология изготовления	Структура
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	N	Mo	Nb	Ti+V		
E	235	0,11	0,27	0,83	0,008	0,005	0,23	0,2	0,2	0,03	0,008		0,033	0,05	TMO	Ф-П
F32W		0,08	0,28	0,86	0,005	0,005	0,02	0,2	0,02	0,05	0,008		0,032	0,04	TMO	Ф-П
F36W	355	0,05	0,23	1,15	0,004	0,002	0,01	0,59	0,08	0,027	0,008	-	0,028	-	TMO	Ф-Б (>25% РБ)
E40		0,09	0,23	1,35	0,006	0,006	0,02	0,03	0,04	0,05	0,008	0,001	0,025	0,06	TMO	Ф-П-Б
F40W	390	0,06	0,26	1,21	0,006	0,003	0,07	0,69	0,16	0,041	0,008	0,016	0,026	0,05	TMO	Ф-Б
F40SW		0,06	0,26	1,21	0,006	0,003	0,07	0,69	0,16	0,041	0,008	0,016	0,026	0,05	TMO / ЗПН+О	Ф-Б
F460W <sup>Arc</sup>	460	0,07	0,35	1,5	0,01	0,005	0,2	0,75	0,2	0,05	0,007	0,08	0,04	0,03	TMO	Ф-Б
07Г2НДМФБТ прокат №1, 2	555	0,055	0,21	1,88	0,009	0,003	0,02	0,39	0,163	0,031	0,008	0,26	0,048	0,043	TMO	Ф-Б (~15% РБ)
E500W	500	0,057	0,21	1,93	0,006	0,0014	0,02	0,38	0,153	0,024	0,0063	0,26	0,043	0,035	TMO	Ф-Б (~15% РБ)
F620W <sup>Arc</sup>	620	0,09	0,31	0,68	0,01	0,005	1,13	1,52	0,42	0,045	0,008	0,14	0,027	-	3+O	Б-М
F690W <sup>Arc</sup>	690	0,10	0,28	0,66	0,007	0,003		2,96		0,03	0,007	0,24	0,027	0,01	ЗПН+О	Б-М
F750W <sup>Arc</sup>	750	0,09	0,25	0,65	0,005	0,002		3,54		0,026	0,008	0,26	0,029	-	ЗПН+О	Б-М
A890	890	0,08	0,27	0,69	0,005	0,005		3,69		0,012	0,008	0,27	0,036	-	ЗПН+О	М-Б
A960	960	0,09	0,22	1,3	0,005	0,005		3,22		0,03	0,008	0,3	0,031	0,014	3+O	М-Б
		0,1	0,31	1,2	0,012	0,005		5,1		-	0,008	0,45	-	0,04	ЗПН+О	М-Б

Наименование марки листового судостали включает: латинские буквы А, Е, F, обозначающие температуру испытания ударным изгибом образцов с острым надрезом (0, -40 и -60°C соответственно), и цифры: 32, 36, 40, 420, 460, 500, 620, 690, 750, 890 и 960, определяющие значения гарантируемого предела текучести (315, 355, 390, 420, 460, 500, 620, 690, 750, 890 и 960 МПа соответственно). В обозначении стали нормального проката (Е) с  $\sigma_{0,2} \geq 235$  МПа, цифры отсутствуют. W – сталь улучшенной свариваемости с нормируемым значением величины относительного сужения в направлении толшины  $Zz > 35\%$  по ГОСТ Р 52927-2015. Arc – символ, добавляемый в качестве верхнего индекса к обозначению стали категории F, удовлетворяющей требованиям, предъявляемым к сталям улучшенной свариваемости и требованиям по Z-свойствам.

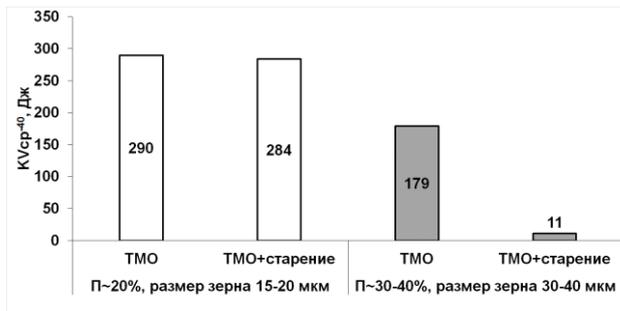


Рисунок 1 – Изменение значений работы удара ферритно-перлитной стали марки Е в зависимости от доли перлита и размера зерна.

В теле ферритных зерен увеличивается плотность дислокаций, которые закрепляются мелкими карбидными частицами, на границах бывших аустенитных зерен происходит коагуляция карбидных частиц, увеличение их размеров, рисунок 2 е, ж.

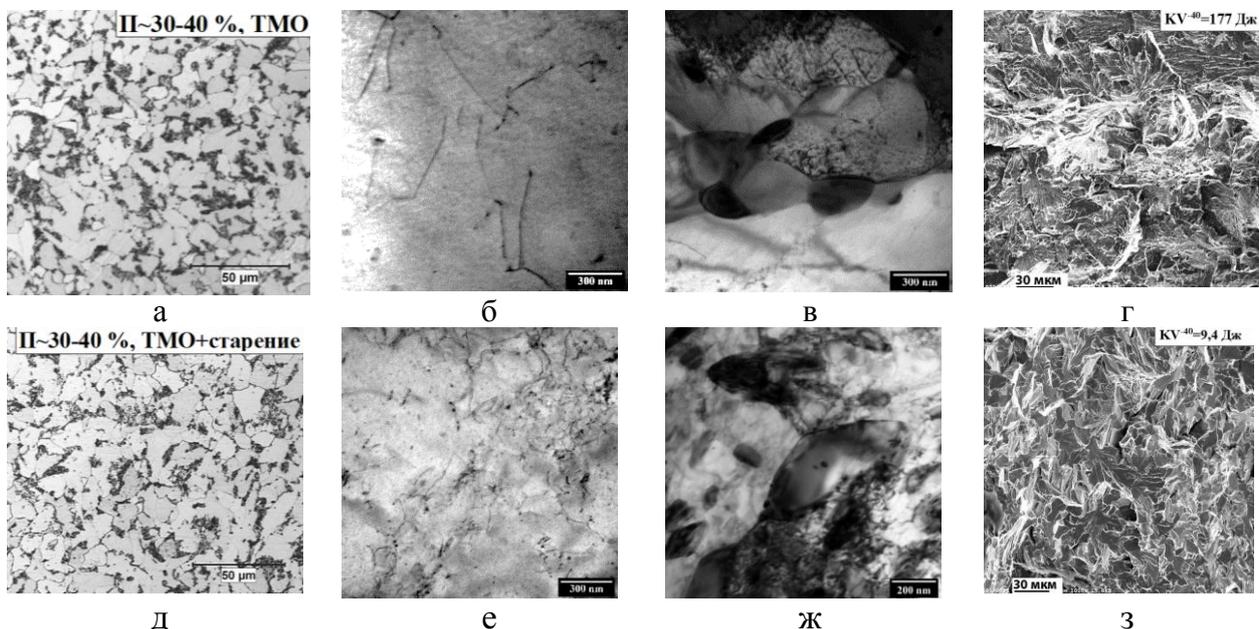


Рисунок 2 - Изображения микроструктуры (а, б, в, д, е, ж) и поверхности разрушения (г, з) стали марки Е после ТМО (а, б, в, г) и после старения по режиму 5 %, 250 °С (д, е, ж, з).

Работа удара марганцево-никелевой стали с анизотропной ферритно-бейнитной структурой и долей речного бейнита более 25 % рисунок 3 а, с гарантированным пределом текучести 355 МПа (марки F36W) после деформационного старения по режиму 5 %, 250 °С снизилась примерно в 2 раза. Разрушение образцов на ударный изгиб в состоянии поставки, рисунок 3 б, происходило вязко по телу зерен. После старения, рисунок 3 в, в изломах образцов наблюдается вырожденный чашечный рельеф, при этом в изломе были выявлены протяженные области менее энергоёмкого вязкого зернограницного разрушения. Для подтверждения протекания старения, заключающегося в том числе в выходе углерода из твердого раствора, был проведен рентгеноструктурный фазовый анализ. Эталонном для сравнения был взят образец армко-железа. Весовое содержание углерода вычислено по формуле (1):  $C=31 \cdot \Delta a$  (1), где  $\Delta a = a - a_0$ ,  $a$  – параметр решетки стали в исследуемом состоянии, Å;  $a_0$  – параметр решетки образца эталона (армко-железа), Å;  $C$  – содержание углерода в твердом растворе, % вес.

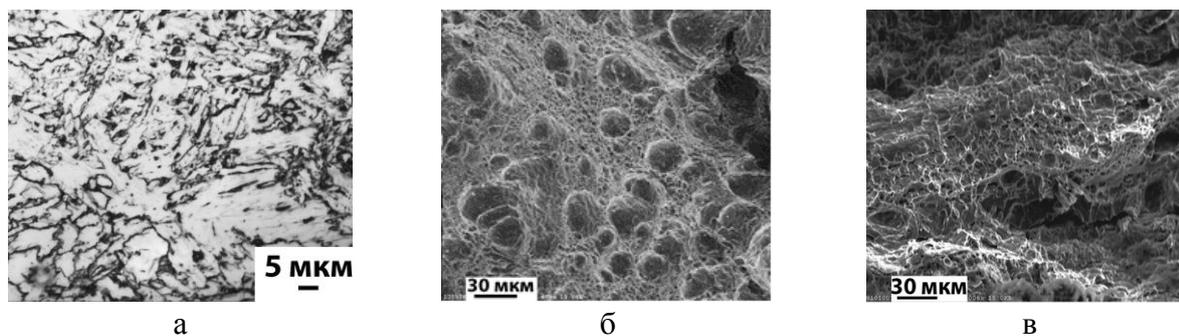


Рисунок 3 - Изображения микроструктуры (а) и поверхности разрушения низколегированной стали с гарантированным пределом текучести 355 МПа и долей речного бейнита в структуре более 25 %: б – после ТМО ( $KV^{-60}=236$  Дж), в – после старения ( $KV^{-60}=111$  Дж).

Выполненные исследования показывают, что после старения содержание углерода в твердом растворе уменьшается с 0,05 до 0,03 %, что может свидетельствовать о связывании углерода, находившегося в твердом растворе, с образованием кластеров или карбидных выделений, таблица 2.

Таблица 2 – Содержание углерода в твердом растворе в низкоуглеродистой низколегированной стали с гарантированным пределом текучести 355 МПа до и после старения.

№	Образец	$KV^{-60}$ , Дж	$a$ , Å	C, % вес
1	Армко-железо	-	2,8675	-
2	F36W, состояние поставки	236	2,8693	0,05
3	F36W, старение, 5%, 250°C	111	2,8685	0,03

Установлено, что увеличение продолжительности выдержки при старении марганцево-никелевой стали с гарантированным пределом текучести 460 МПа (марки F460W) с долей речного бейнита ~25 % с 1 часа до 3 часов привело к снижению значению работы удара на 30 %, при этом изменился также вид диаграммы растяжения: появился выраженный зуб текучести и исчезла стадия равномерного удлинения, рисунок 4.

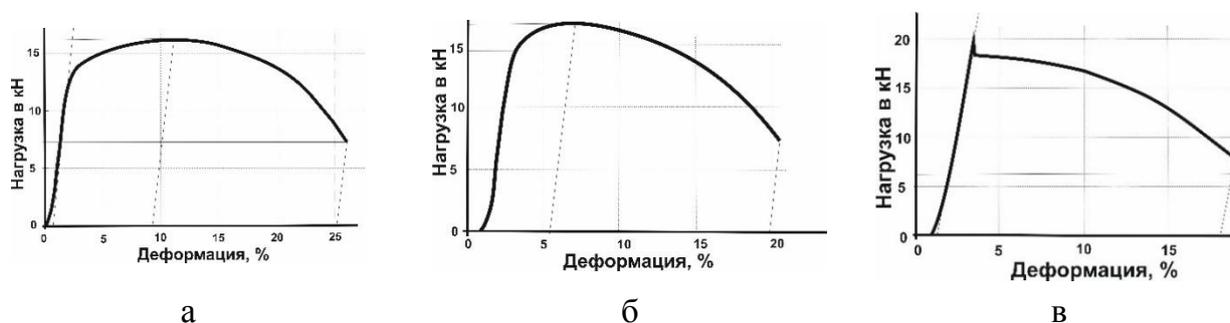


Рисунок 4 – Диаграммы растяжения образцов стали с гарантированным пределом текучести 460 МПа: а – в состоянии поставки, б – после старения по режиму 5%, 250°C, 1 час, в - после старения по режиму 5 %, 250 °С, 3 час.

Комплекснолегированная ферритно-бейнитная сталь с долей речного бейнита в структуре ~15% с гарантированным пределом текучести 550 МПа (марки

07Г2НДМФБТ) после ТМО не проявляет склонности к деформационному старению по изменению значений работы удара, снижение которой составило не более 20 %. Старение с деформацией 10 % и выдержкой при 250 °С привело к появлению в изломе образцов более протяженных участков вязкого зернограницного разрушения, рисунок 5.

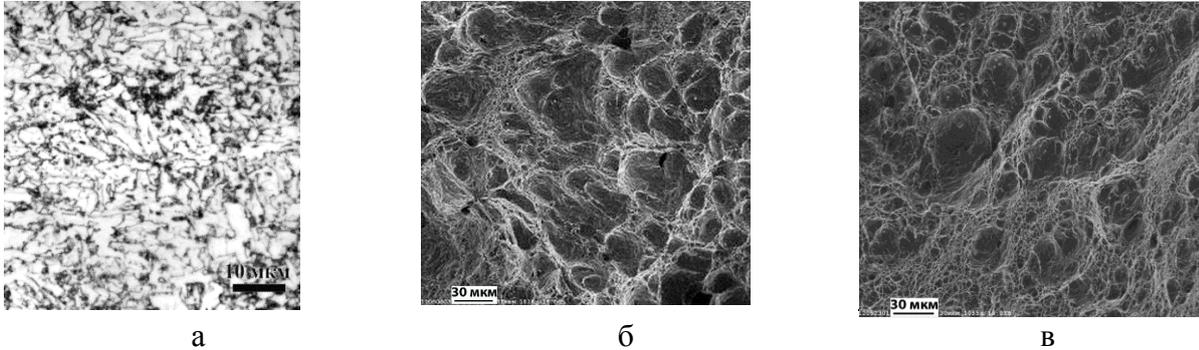


Рисунок 5 - Изображения микроструктуры (а) и поверхности разрушения комплекснолегированной стали с гарантированным пределом текучести 550 МПа и долей речного бейнита в структуре ~ 15 %: б – после ТМО ( $KV^{40}=294$  Дж), в – после старения (10 %, 250 °С,  $KV^{40}=234$  Дж).

Проводя сравнение полученных результатов для стали марки 07Г2НДМФБТ с данными для стали марки F36W, можно заметить, что легирование стали никелем оказывает заметное влияние на склонность стали к деформационному старению, выявляемое по величине работы удара, рисунок 6, поскольку формируется структура с разной долей речного бейнита (~15 или  $\geq 25$  % соответственно).

Таким образом, на склонность к деформационному старению оказывают влияние тип и морфология структуры стали. Склонность к старению проявляют как ферритно-перлитные, так и ферритно-бейнитные стали в том случае, если доля структур речного типа (перлита или речного бейнита) составляет более 25 %. Если  $\alpha$ -фаза характеризуется преимущественно гранулярной морфологией, то склонность к деформационному старению стали с такой структурой практически не проявляется как в состоянии поставки, так и после естественного старения.

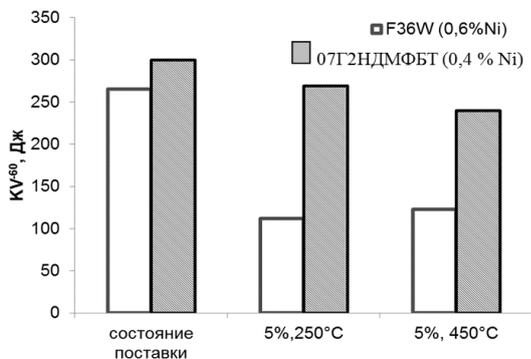


Рисунок 6 – Влияние содержания никеля на работу удара низколегированной стали после различных режимов старения.

***Исследовано влияние естественного старения (при длительном хранении в течение 12-15 лет) низкоуглеродистой стали с различной структурой на изменение механических свойств.*** Установлено, что марганцевая сталь марки F32W с ферритно-перлитной структурой с гарантированным пределом текучести 315 МПа

после ТМО не проявила склонности к изменению механических свойств в результате естественного старения, проявляющейся в снижении значений работы удара, рисунок 7 а.

Разрушение образцов до и после длительного хранения происходило по механизму вязкого транскристаллитного разрушения. Прочностные свойства при растяжении практически не изменялись, за исключением снижения относительного удлинения на 7 % по сравнению с состоянием поставки.

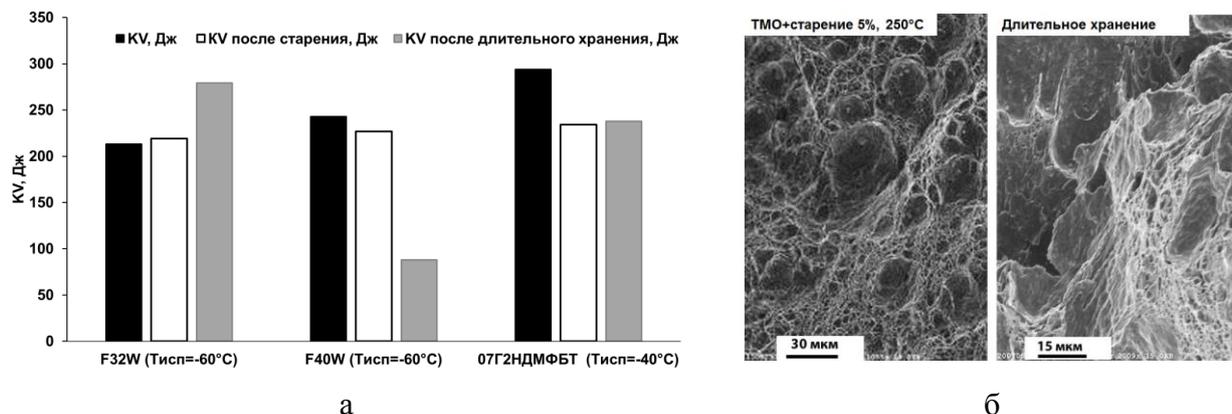


Рисунок 7 – Изменение работы удара (а) стали с гарантированным пределом текучести 315 МПа (марка F32W), 390 МПа (марка F40W), 550 МПа (марка 07Г2НДМФБТ), б – изображение поверхности разрушения после искусственного и естественного старения стали марки 07Г2НДМФБТ.

После естественного старения марганцево-никелевой стали с ферритно-бейнитной структурой (с долей реечного бейнита более 25 %) с гарантированным пределом текучести 390 МПа марки F40W наблюдалось изменение механических свойств: снизились значения работы удара в 2,5 раза, рисунок 7 а, и относительного удлинения на 15 % по сравнению с состоянием поставки (ТМО), повысились значения предела текучести и временного сопротивления на 25 %. После естественного старения 50 % общей площади излома занимало вязкое транскристаллитное разрушение. Ближе к долому половину поверхности разрушения занимали области микроскола, квазискола, скола и вязкого разрушения по границам кристаллитов реечного бейнита.

После естественного старения комплекснолегированной стали с ферритно-бейнитной структурой (с долей реечного бейнита ~15 %) с гарантированным пределом текучести 550 МПа критического изменения механических свойств не произошло. Полученные значения работы удара после длительного хранения сопоставимы со значениями, полученными при испытаниях на деформационное старение после ТМО, что позволяет говорить о возможности прогнозирования механических свойств низкоуглеродистой низколегированной стали при длительном хранении (~ 12 лет), если она обладает заданной структурой. Образцы после естественного и искусственного старения разрушались по механизму вязкого транскристаллитного разрушения, с формированием областей вязкого зернограничного разрушения и участков облегченного отрыва с заглаженным рельефом, характерных для образцов после старения, рисунок 7 б.

**Таким образом, для предотвращения склонности стали к деформационному старению, в том числе при длительном хранении, необходимо на этапе производства управлять ее фазовым составом.**

С помощью расчетной оценки диффузионной подвижности углерода показано, что при естественном старении величины пробегов углерода в результате его объемной диффузии<sup>2</sup> для всех исследованных сталей являются весьма малыми, что не позволяет объяснить наблюдаемые процессы старения, таблица 3.

Таблица 3 – Расчетные значения средних диффузионных пробегов углерода для разных режимов старения рассматриваемых сталей, полученные с учетом объемной диффузии.

Сталь	Режим старения	Средняя длина диффузионного пробега углерода ( $R_D$ ), мкм
F36W	20°C, 12 лет	0,0015
F40W	20°C, 12 лет	0,00026
07Г2НДМФБТ	20°C, 12 лет	$3,9 \times 10^{-5}$
E500W	20°C, 12 лет	$1,8 \times 10^{-8}$

Установлено, что протекание естественного старения возможно посредством «трубочной» диффузии углерода по ядрам дислокаций, что согласуется с имеющимися экспериментальными данными. За 12 лет старения в сталях с преимущественно ферритной структурой возможно протекание «трубочной» диффузии по дислокациям в приграничных областях (~8,9 мкм). В сталях с бейнитной структурой возможно распространение углерода через несколько пакетов реечного бейнита (~28,2 мкм), а в сталях с мартенситной структурой (за счет повышенной плотности дислокаций) на ~89 мкм – в пределах бывшего аустенитного зерна.

Для оценки возможности предотвращения или снижения склонности к деформационному старению, был проведен высокий отпуск стали после ТМО, после ТМО и старения и после длительного хранения. С его помощью предполагалось привести структуру в равновесное состояние, за счет выделения и коагуляции карбидной фазы.

Дополнительный отпуск при 580 °С после ТМО ферритно-перлитной сталей с долей перлита менее 20 % не приводит к изменению механических свойств стали после старения. Высокий отпуск после ТМО стали с ферритно-бейнитной структурой с долей реечного бейнита в структуре ~15 % не оказывает значительного влияния на изменение механических свойств стали. С увеличением доли реечного бейнита в структуре более 25 % усиливается преимущественно негативное влияние высокого отпуска на механические свойства стали как до, так и после старения. Так, после ТМО, старения и последующего отпуска при 580 °С ферритно-бейнитной стали марки F36W с долей реечного бейнита более 25 % прочностные характеристики возросли ~ на 35 %, рисунок 8.

<sup>2</sup> Васильев, А.А. Модели для расчета коэффициента диффузии углерода в сталях и примеры их практического использования / Васильев А.А., Голиков П.А. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. - 186 с.

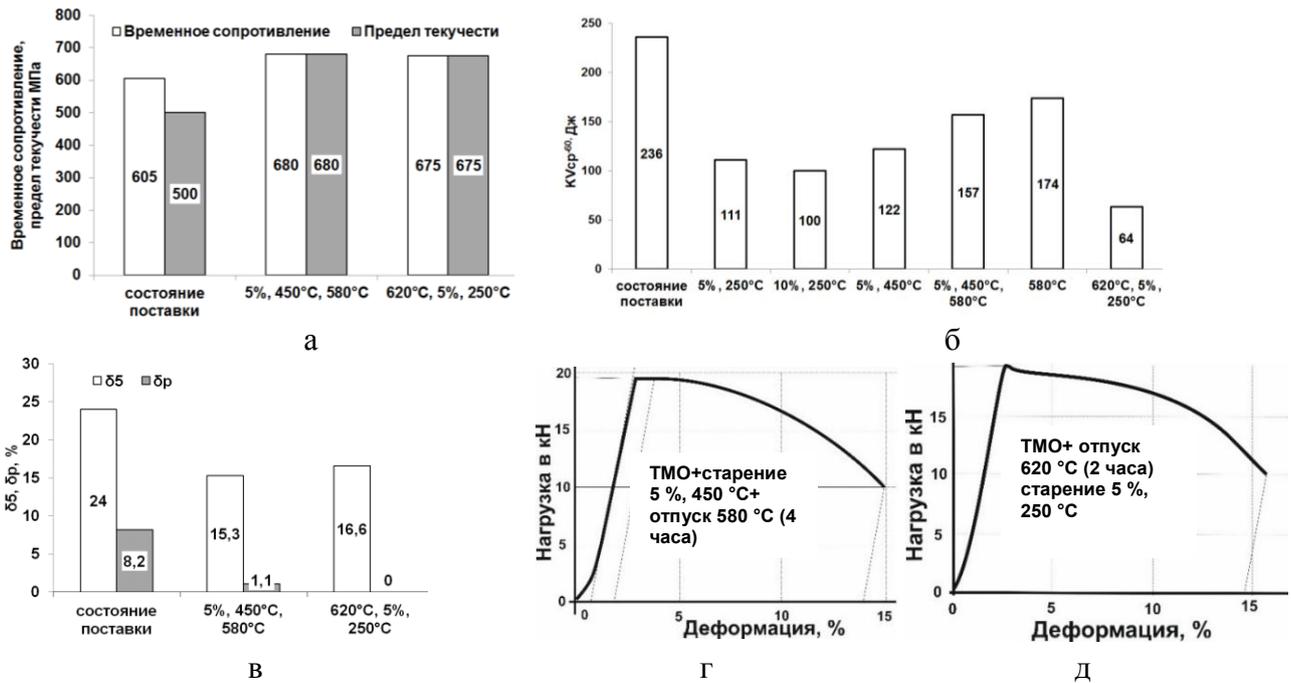


Рисунок 8 - Механические свойства низкоуглеродистой низколегированной стали с гарантированным пределом текучести 355 МПа марки F36W (а, б, в) и диаграммы растяжения (г, д).

Значения работы удара после ТМО и отпуска составляли 174 Дж (после ТМО – 236 Дж), старение с изотермической выдержкой при 450 °С с последующим отпуском при 580 °С, привело к снижению значений работы удара в среднем на 20 Дж. После ТМО, отпуска при 620 °С и последующего деформационного старения с изотермической выдержкой при 250 °С наблюдалось наиболее значительное снижение значений работы удара до 64 Дж, при этом относительное равномерное удлинение снизилось до 0.

На диаграмме растяжения образцов после старения и последующего отпуска присутствует площадка текучести, относительное равномерное удлинение составляет 1,1 %, а общее относительное удлинение – 15,3 %, рисунок 8. Деформационное старение после ТМО и отпуска при 620 °С привело к исчезновению стадии равномерной деформации на диаграмме растяжения, рисунок 8 д, и повышению соотношения  $\sigma_{0,2}/\sigma_b$  до 1. Такой вид диаграммы характерен для максимально состаренного состояния материала. Таким образом, высокий отпуск после ТМО ферритно-бейнитной стали с долей речного бейнита в структуре более 25 % приводит к перераспределению карбидной фазы на границы зерен и снижению работы удара, наиболее заметно после деформационного старения. Отпуск при 580 °С после старения с выдержкой при 450 °С повышает значения работы удара, а отпуск при 620 °С после ТМО и последующее деформационное старение приводят к рекристаллизации в  $\alpha$ -фазе, однако это не снижает прочностные характеристики, но уменьшает значения работы удара. ***Все вышеперечисленные факторы не позволяют рекомендовать отпуск после ТМО для предотвращения процессов старения или отпуск после деформационного старения для улучшения свойств ферритно-бейнитной стали.***

**В четвертой главе** приведены результаты исследования склонности к естественному и искусственному старению низкоуглеродистых легированных судостроительных сталей.

На основании статистической обработки данных установлено, что низкоуглеродистые легированные высокопрочные судостроительные хромникельмолибденовые стали (с содержанием никеля не более 2,5 %) с гарантированным пределом текучести 500, 620, 690 и 750 МПа и бейнитно-мартенситной структурой не проявляют склонности к старению в состоянии поставки, определяемой по изменению значений работы удара после деформации 3-5 % с изотермической выдержкой при 250°C.

Установлено, что низкоуглеродистая легированная стали с гарантированным пределом текучести 890 МПа с мартенситно-бейнитной структурой (в которой мартенсит хорошо отпущен), не проявила склонности к естественному старению после длительного хранения в течение 18 лет: значения временного сопротивления повысились на 4,7 %, предела текучести ~ на 7,8 %, относительное удлинение снизилось на 3,3 %, а работа удара ~ на 2,3 %. Дополнительное искусственное старение с деформацией 1,5 % и температурой изотермической выдержки 250 °С не привело к существенному снижению механических характеристик, что свидетельствует о возможности использования листового проката мартенситно-бейнитной стали в том числе после длительного хранения в судокорпусном производстве.

Деформационное старение с предварительной деформацией 3 % низкоуглеродистой легированной судостроительной стали хромникельмолибденовой композиции с гарантированным пределом текучести 500 МПа (марки E500W), после закалки и отпуска в промышленных условиях, имеющей преимущественно бейнитную структуру, приводит к повышению её предела текучести на ~5 %, но снижает способность к равномерной деформации ( $\delta_p$  снижается с 8 % до 4 %) при сохранении значительной локальной пластичности, на диаграмме растяжения появляется зуб текучести.

В состоянии поставки структура преимущественно бейнитно-мартенситная, рисунке 9 а. По границам реек реечного мартенсита наблюдаются пластинчатые карбиды. В областях гранулярного бейнита в стали до деформационного старения карбидные выделения на дислокациях отсутствуют, рисунок 9 б. Деформационное старение приводит к выделению карбидов по границам и в теле высокоотпущенной  $\alpha$ -фазы, рисунок 9 в. В гранулярном бейните после деформационного старения увеличивается плотность дислокаций в 2 раза, а также происходит закрепление дислокаций мелкими карбидами, рисунок 9 г, что приводит к снижению пластических характеристик и появлению зуба текучести на диаграмме растяжения.

Деформационное старение низкоуглеродистой легированной судостроительной стали хромникельмолибденовой композиции с гарантированным пределом текучести 500 МПа (марки E500W) с мартенситно-бейнитной структурой (с долей мартенсита более 50 %) после закалки и высокого отпуска при 650 °С в течение 2 часов в лабораторных условиях способствует повышению прочностных характеристик

(временного сопротивления на  $\sim 7\%$ , предела текучести  $\sim$ на  $10\%$ ), снижению относительного равномерного удлинения – до нуля и изменению вида диаграммы растяжения: появлению зуба текучести и отсутствию стадии равномерной деформации.

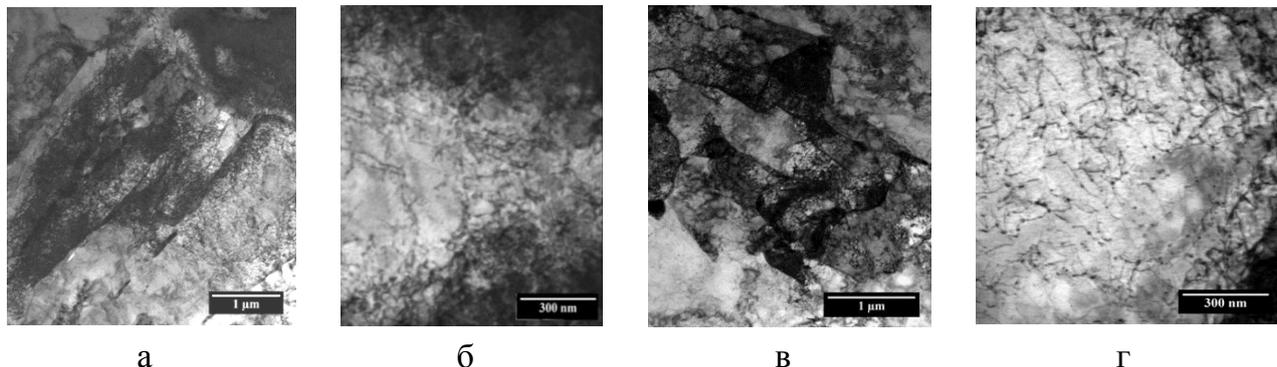


Рисунок 9 – Структура образцов стали марки E500W в состоянии поставки (а, б) и после старения по режиму  $3\%$ ,  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  (в, г): а, в – речный мартенсит, б, г – гранулярный бейнит.

С помощью параметра Холломона-Яффе была установлена необходимая степень отпуска. Установлено, что с увеличением доли мартенсита в структуре при недостаточной степени отпуска (при значениях параметра Холломона-Яффе для этой марки стали менее  $19,3$ ) склонность стали к деформационному старению, проявляющаяся в упрочнении и снижении пластичности, повышается.

На основании имеющихся литературных данных для того, чтобы уменьшить содержание углерода в твердом растворе и таким образом снизить или предотвратить деградацию свойств легированной стали в результате старения, был опробован дополнительный среднетемпературный отпуск при  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Деформационное старение после дополнительного среднетемпературного отпуска при  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  (выполненного после высокого отпуска при  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) для стали с гарантированным пределом текучести  $500\text{ МПа}$  (марки E500W) привело к повышению равномерного относительного удлинения по сравнению с состоянием после лабораторной закалки и высокого отпуска при  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  (до  $3,5\%$ ), характер изменения механических свойств стали после дополнительных термических обработок и после старения представлен на рисунке 10.

Для проведения исследований по влиянию технологии производства стали на ее склонность к деформационному старению был выбран листовой прокат из низкоуглеродистой легированной судостроительной стали с гарантированным пределом текучести  $960\text{ МПа}$  после закалки с прокатного нагрева с отпуском при  $620\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 3 часов и закалки с отпуском при  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  (для получения сравнимой прочности) в течение 3 часов.

После закалки с прокатного нагрева и отпуска для легированной стали с мартенситно-бейнитной структурой (с долей мартенсита  $\sim 75\%$ , в которой мартенсит хорошо отпущен - значение параметра Холломона-Яффе не менее  $18,3$ ) эффект старения, проявляющийся главным образом в резком уменьшении относительного равномерного удлинения, становится менее заметен, чем после закалки и отпуска (с

долей мартенсита ~ 25 %), выполненного при значении параметра Холломона-Яффе не более 17,9.

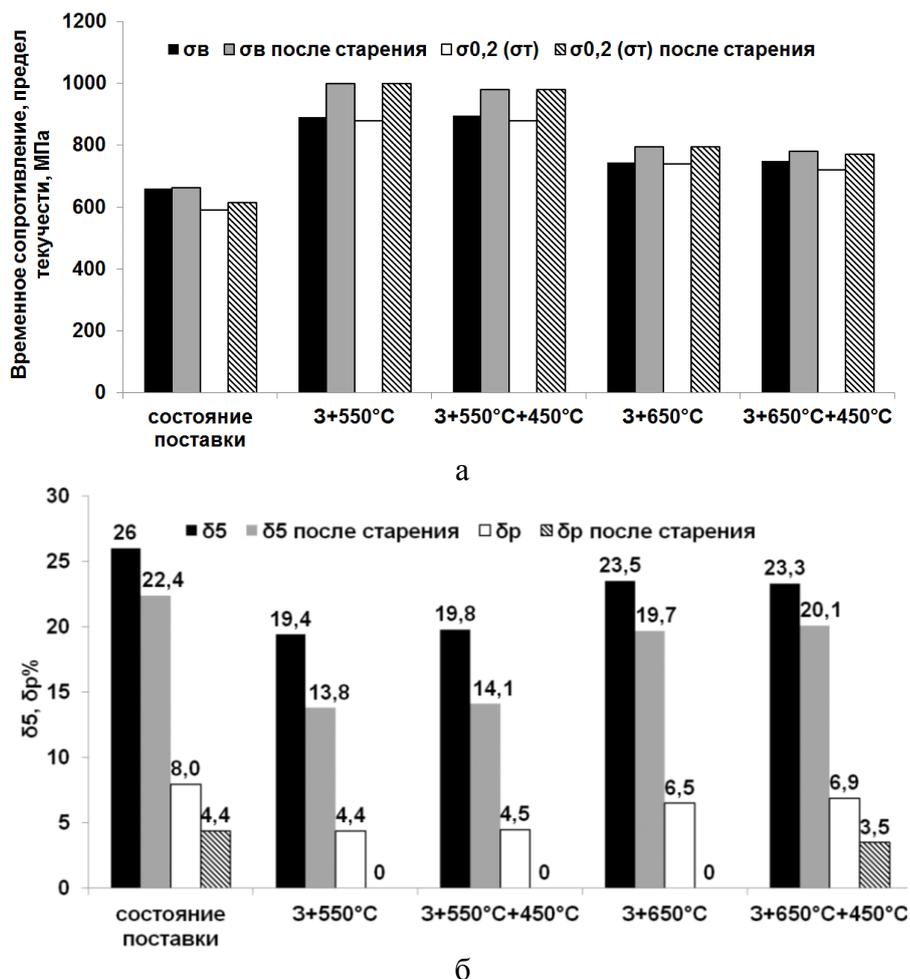


Рисунок 10 - Зависимость механических свойств низкоуглеродистой легированной стали марки E500W с гарантированным пределом текучести 500 МПа от режимов дополнительной термической обработки и последующего старения: а – предел текучести и временное сопротивление, б – относительное общее и равномерное удлинение.

Диаграмма растяжения после закалки и отпуска при 600 °С имеет классический вид, рисунок 11 а, деформационное старение приводит к появлению на диаграмме выраженного зуба текучести и исчезновению стадии равномерного удлинения, рисунок 11 б. После закалки с прокатного нагрева с отпуском при 620 °С, рисунок 11 в, на диаграмме растяжения присутствует площадка текучести, деформационное старение привело к сокращению стадии равномерного удлинения, рисунок 11 г, однако, общий вид диаграммы не изменился.

Известно, что бейнит более устойчив к протеканию процессов отпуска вследствие того, что основное выделение углерода из твердого раствора происходит уже в процессе фазового превращения при закалке. В структуре мартенсита процессы отпуска протекают более интенсивно. Кроме того, и температура отпуска для стали, закаленной с прокатного нагрева, была выше, чем после печной закалки, что, по-видимому, и привело к более значительному обеднению  $\alpha$ -фазы углеродом и повышению относительного равномерного удлинения после деформационного старения.

Предположение о выходе углерода из раствора в процессе деформационного старения было подтверждено данными, полученными с помощью метода дифракции нейтронов (выполнены в ОИЯИ, г. Дубна).

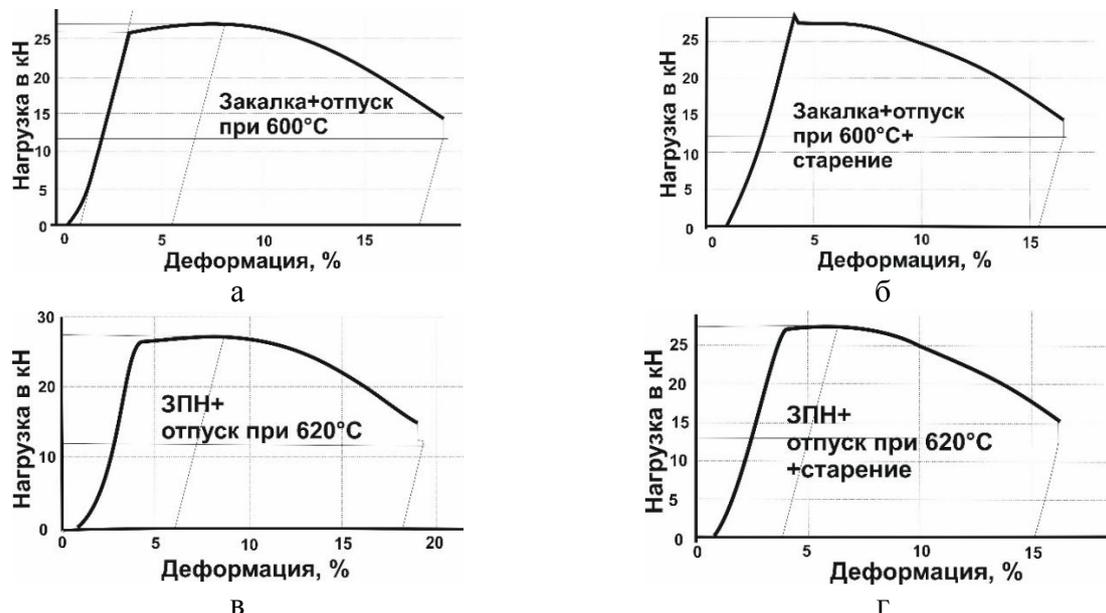


Рисунок 11 – Диаграммы растяжения стали с гарантированным пределом текучести 960 МПа, изготовленной по различным технологиям до (а, в) и после деформационного старения (б, г): а, б –закалка с отпуском, в, г - закалка с прокатного нагрева с отпуском.

Были проведены исследования, определяющие изменение положения дифракционных пиков, характеризующих межплоскостные расстояния в решетке, в зависимости от режима термообработки. По изменению межплоскостного расстояния определяли параметр решетки ( $a$ ) и изменение содержания углерода в твердом растворе после деформационного старения в соответствии с формулой 1. Результаты исследований приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты исследований методом дифракции нейтронов для стали с гарантированным пределом текучести 960 МПа.

№	Режим	$d(110), \text{Å}$	$a, \text{Å}$	C, %	$\Delta C$
1	Закалка с прокатного нагрева + отпуск 620 °C (3 часа)	2,02799	2,86801	0,016	0,001
2	Закалка с прокатного нагрева + отпуск 620 °C (3 часа) + старение (1,5 %, 250°C)	2,02797	2,86798	0,015	
3	Закалка 900 °C + отпуск 600 °C (3 часа)	2,02849	2,86872	0,038	0,021
4	Закалка 900 °C + отпуск 600 °C (3 часа) + старение (1,5 %, 250°C)	2,02801	2,86804	0,017	

После закалки и отпуска в растворе находилось 0,038 % углерода, в то время как после закалки с прокатного нагрева и отпуска в два раза меньше – 0,016 %. Старение после закалки и отпуска привело к снижению содержания углерода в растворе до 0,017 %, а старение после закалки с прокатного нагрева с отпуском – до 0,015 %. Разница  $\Delta C$  после закалки с прокатного нагрева и отпуска и после деформационного старения равнялась 0,001, а после закалки, отпуска и последующего старения – 0,021,

что свидетельствует о более существенном выходе углерода из твердого раствора в процессе старения после закалки и отпуска. Несмотря на то, что значения работы удара после старения практически не снижаются, происходит упрочнение стали, изменение вида диаграмм растяжения и снижение равномерного относительного удлинения. Деформационное старение после закалки с отпуском привело к снижению равномерного относительного удлинения до нуля, и появлению на диаграмме растяжения зуба текучести, содержание углерода в растворе снизилось на 0,021 %.

Таким образом, о проявлении склонности к деформационному старению низкоуглеродистой легированной хромникельмолибденовой судостроительной стали следует судить не столько по изменению значений работы удара, сколько по изменению прочностных и пластических характеристики и виду диаграмм растяжения после провоцирующей обработки (искусственное старение).

**В пятой главе** представлена оценка влияния деформационного старения на изменение характеристик работоспособности исследуемых сталей с преимущественно благоприятной структурой и их сварных соединений.

Анализ зависимостей изменения работы удара от температуры испытания  $KV = f(T)$  до и после деформационного старения для низколегированной стали с ферритно-бейнитной структурой и долей речного бейнита более 25 % с гарантированным пределом текучести 460 МПа показал, что деформационное старение приводит к снижению их хладостойкости: температура перехода в хрупкое состояние повышается до минус 20 °С, рисунок 12 а.

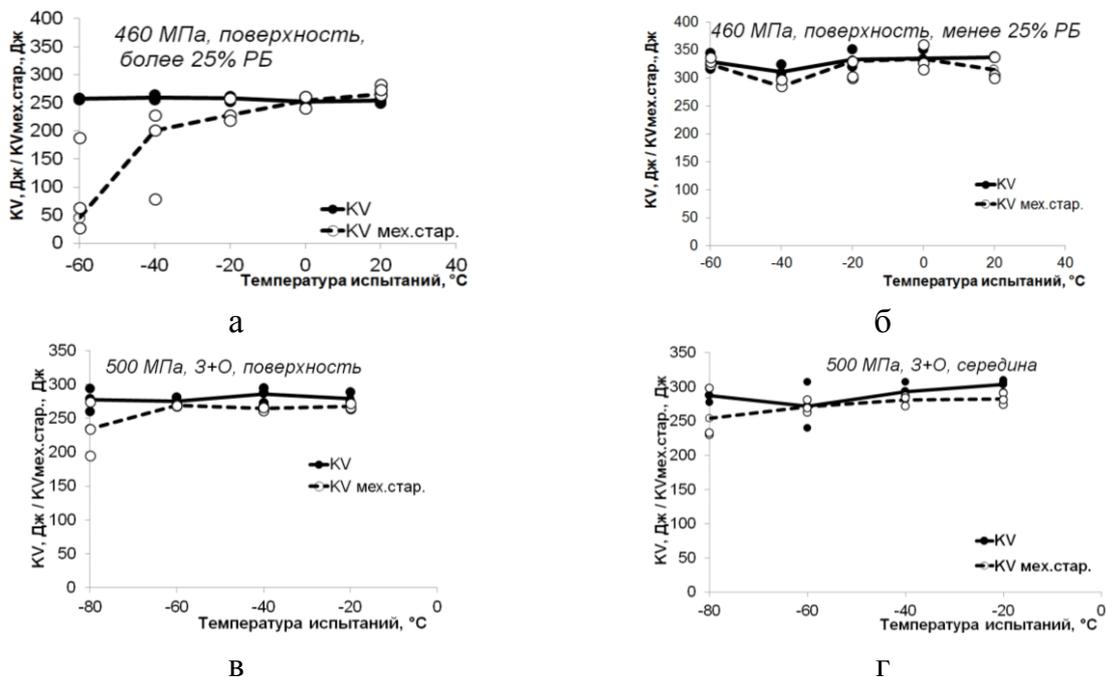


Рисунок 12 – Зависимость работы удара от температуры испытания до и после деформационного старения на графиках указан нормируемый предел текучести и место отбора образцов.

При формировании благоприятной структуры с бейнитом преимущественно гранулярной морфологии снижения хладостойкости после деформационного старения не наблюдается, рисунок 12 б. Для исследованных легированных сталей однозначного

вывода по влиянию деформационного старения на охрупчивание при низких температурах сделать не представляется возможным, однако существенного изменения хладостойкости после деформационного старения в большинстве случаев не наблюдается, рисунок 12 в, г. Для ферритно-бейнитной стали с гарантированным пределом текучести 460 МПа и бейнитно-мартенситной стали с нормируемым пределом текучести 500 МПа на маломасштабных образцах сечением 10x11 мм с предварительно выращенной усталостной трещиной был определен параметр CTOD до и после деформационного старения. Установлено, что деформационное старение не приводит к изменению параметра CTOD, значения которого остаются на высоком уровне, изменяясь не более, чем на 20 %, вплоть до отрицательных температур (минус 50°C). Способность стали сопротивляться страгиванию трещины после деформационного старения сохраняется. Оценка склонности к коррозионному растрескиванию, проведенная методом консольного изгиба со ступенчато возрастающей нагрузкой образцов сечением 10x11 мм с предварительно выращенной усталостной трещиной показала, что ферритно-бейнитная сталь с гарантированным пределом текучести 460 МПа и бейнитно-мартенситная сталь с пределом текучести 500 МПа не проявили склонности к коррозионному растрескиванию под напряжением в среде 3,5% раствора NaCl по сравнению с испытаниями на воздухе, в том числе после деформационного старения, таблица 5. Сталь считается не склонной к коррозионному растрескиванию, если отношение разрушающего напряжения в среде и на воздухе:

$$\beta_{\sigma} = \sigma_{sc} / \sigma_c > 0,85.$$

Таблица 5 — Результаты испытаний образцов из листового проката низкоуглеродистой судостроительной стали методом консольного изгиба со ступенчато возрастающей нагрузкой (средние значения).

Марка стали	F460W				E500W			
	ТМО		ТМО+старение		З+О		З+О+старение	
Условия испытаний	воздух	3,5% NaCl	воздух	3,5% NaCl	воздух	3,5% NaCl	воздух	3,5% NaCl
$\beta_{\sigma}$	0,87		0,88		0,99		0,99	

Для оценки склонности к деформационному старению металла зоны термического влияния сварных соединений до и после старения был выбран листовой прокат низкоуглеродистой судостроительной стали с гарантированным пределом текучести 460 МПа с ферритно-бейнитной структурой и с гарантированным пределом текучести 890 МПа с бейнитно-мартенситной структурой. Надрез на образцах на ударный изгиб наносили по линии сплавления и на расстоянии 2 мм от линии сплавления.

Существенного снижения значений работы удара после деформационного старения на образцах, вырезанных из сварных соединений низколегированной стали с гарантированным пределом текучести 460 МПа, не наблюдалось, средние значения работы удара при температуре испытаний минус 40 °С составили ~155-175 Дж. Для сварных соединений легированной стали с гарантированным пределом текучести 890 МПа снижение значений работы удара после старения незначительно и составляет

~20-25 Дж (~13-15 %), что свидетельствует о высокой устойчивости стали с благоприятной структурой к влиянию термического цикла сварки.

На основе выполненных исследований склонности к деформационному старению низкоуглеродистых низколегированных и легированных судостроительных сталей разработаны «Методические указания по прогнозированию и оценке склонности судостроительной стали к деформационному старению». В разработанных методических указаниях предложены критерии оценки склонности стали деформационному старению и показана возможность прогнозирования изменения свойств в результате естественного и искусственного старения.

В качестве критериев оценки склонности стали к деформационному старению предложены: изменение по сравнению с исходным состоянием значений работы удара, изменение вида диаграммы растяжения (появление зуба текучести и снижение равномерного относительного удлинения). В сложных случаях рекомендовано проведение фрактографических исследований поверхности разрушения ударных образцов до и после старения.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Выполненные экспериментальные исследования позволили сформулировать основные закономерности изменения структуры и свойств низкоуглеродистых низколегированных и легированных судостроительных сталей после деформационного старения, оценить возможность прогнозирования изменения свойств в результате деформационного старения. Показано следующее:

1. Степень снижения работы удара после испытаний на деформационное старение в состоянии поставки зависит от технологии изготовления листового проката и композиции легирования. Одним из факторов, определяющих склонность стали к старению судостроительных сталей, является исходная структура, сформированная в процессе изготовления листового проката:

1.1. Низкоуглеродистая сталь с ферритно-перлитной структурой не проявляет склонности к деформационному старению в случае, если доля перлита не превышает 20 %. С увеличением размера зерна до 30-40 мкм и доли перлита до 30-40 % значения работы удара после старения снижаются до недопустимых за счет роста карбидных частиц цементитного типа по границам и в тройных стыках зерен.

1.2. Стали с ферритно-бейнитной структурой не проявляют склонности к деформационному старению в том случае, если их  $\alpha$ -фаза характеризуется преимущественно глобулярной морфологией (квазиполигональный феррит, гранулярный бейнит), а доля реечного бейнита не превышает 25 %. Повышение содержания никеля более 0,4-0,6 % способствует формированию большего количества областей реечного бейнита, тем самым усиливая склонность стали к деформационному старению.

1.3 Низкоуглеродистые низколегированные стали с неблагоприятной ферритно-бейнитной структурой (с долей реечного бейнита более 25 %) проявляют склонность к

естественному старению (при длительном хранении в течение ~15 лет), которая проявляется в снижении значений работы удара ~ в 2,5 раза, повышении временного сопротивления и предела текучести и их отношения с 0,82 до 0,93. Ферритно-бейнитные стали с благоприятной структурой не проявляют склонности к естественному старению при длительном хранении.

2. Механизм деформационного старения судостроительных сталей заключается в закреплении дислокаций предвыделениями и мелкими карбидными частицами цементитного типа и в выделении карбидных частиц по границам зерен, субзерен и реек бейнита и мартенсита. Деформация способствует увеличению плотности дислокаций в бейните и мартенсите, которые являются магистралями для перераспределения углерода. Проведено уточнение модели для оценки диффузионных пробегов углерода при старении в результате диффузии по ядрам дислокаций с учетом структурного состояния стали, позволяющее объяснить наблюдаемые явления процессов естественного и искусственного старения.

3. Высокий отпуск (580-620°C) сталей с благоприятной структурой, как после ТМО, так и после искусственного старения не оказывает влияния на работу удара, которая остается на достаточно высоком уровне. В то же время высокий отпуск сталей с более чем 25 % реечного бейнита приводит к снижению значений работы удара, особенно заметному, если за ТМО следует деформационное старение.

4. Высокий отпуск после длительного хранения стали с неблагоприятной структурой существенно в ~10 раз снижает значения работы удара по сравнению с состоянием поставки (после ТМО) и, таким образом, не может быть рекомендован улучшения механических свойств стали после длительного хранения.

5. Для предотвращения склонности к деформационному старению низкоуглеродистых легированных судостроительных сталей с мартенситно-бейнитной структурой необходимо, чтобы отпуск таких сталей был выполнен в полной мере:

5.1. Низкоуглеродистая легированная хромникельмолибденовая сталь (марки E500W), изготовленная по технологии закалки с отпуском с содержанием никеля 2,5 – 3 % с мартенситно-бейнитной структурой (в которой мартенсит хорошо отпущен – значения параметра Холломона-Яффе составляют от 19,3 до 19,7), не проявляет склонности к естественному старению и последующему деформационному старению.

5.2. С увеличением доли мартенсита более 50% в структуре низкоуглеродистых легированных судостроительных сталей хромникельмолибденовой композиции (марки E500W) при недостаточной степени отпуска, определяемой по параметру Холломона менее 19,3, увеличивается склонность стали к деформационному старению. Дополнительный, в том числе среднетемпературный отпуск, позволяет снизить склонность к деформационному старению за счет выделения углерода из  $\alpha$ -фазы.

5.3. Для стали с гарантированным пределом текучести 960 МПа отпуск должен выполняться при значении параметра Холломона-Яффе не менее 18,3 с целью снижения склонности к деформационному старению.

6. О проявлении склонности к деформационному старению низкоуглеродистых низколегированных и легированных судостроительных сталей следует судить по

результатам комплексных испытаний на ударный изгиб и растяжение после провоцирующей обработки (искусственного старения).

7. Даны рекомендации по предотвращению или снижению склонности к деформационному старению низкоуглеродистых низколегированных и легированных судостроительных сталей: для стали с ферритно-перлитной структурой необходимо на этапе изготовления листового проката обеспечить формирование структуры с долей перлита не более 20 % и размером зерна не более 20 мкм, для ферритно-бейнитной стали – структуру с бейнитом преимущественно гранулярного типа и долей крупных областей речного бейнита не более 25 %; для низкоуглеродистой легированной судостроительной мартенситно-бейнитной стали необходимо обеспечить полноту протекания процессов высокого отпуска на этапе изготовления листового проката, включая повторный, в том числе среднетемпературный отпуск. Отпуск после ТМО или после длительного хранения низколегированной судостали не позволяет снизить или предотвратить склонность к деформационному старению.

8. Разработаны методические указания по прогнозированию и оценке склонности судостроительной стали к деформационному старению, включающие проведение испытаний на растяжение и ударный изгиб с оценкой вида поверхности разрушения образцов. Разработанные методические указания внедрены в Центре сталей для труб и сварных конструкций (в составе Научного центра качественных сталей) ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина».

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Е.А. Яковлева, Г.Д. Мотовилина, Е.И. Хлусова, В.В. Орлов. Исследование особенностей механического старения высокопрочных штрипсовых сталей // **Сталь**. - 2013. - № 5. - С.72-77.

Yakovleva E.A., Motovilina G.D., Khlusova E.I., Orlov V.V. Mechanical aging of high-strength strip steel // **Steel in Translation**. – 2013 - 43 (5). - pp. 325-330.

2. Е.А. Яковлева, Г.Д. Мотовилина, Е.В. Святышева, Е.И. Хлусова. Особенности естественного и искусственного старения судостроительных ферритно-бейнитных сталей // **Тяжелое машиностроение**. - 2018. - № 6. - С 17-35.

3. Е.А. Яковлева, Г.Д. Мотовилина, Е.И. Хлусова. Влияние режимов старения на механизм разрушения низколегированных сталей с различной структурой // **Вопросы материаловедения**. – 2019. - № 2 (98). - С.11-20.

4. Е.А. Яковлева, Г.Д. Мотовилина, Е.И. Хлусова. Исследование склонности к деформационному старению низкоуглеродистых легированных судостроительных сталей // **Тяжелое машиностроение**. – 2020. - №7-8. – С. 12-17.

5. Яковлева Е.А., Г.Д. Мотовилина, Е.И. Хлусова. Влияние деформационного старения на структуру и свойства низколегированной стали с ферритно-бейнитной структурой // Труды конференции молодых ученых и специалистов ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей». - СПб.: ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» - 22-22 июня 2013. - С. 21-27.

6. E.A.Yakovleva, E.I. Khlusova, V.Y. Mikhailova. Database of materials and technologies of Arctic application // Proceedings of the PDM2013 conference. - LUT 24.-25.4.2013. - p. 29-33.

7. Яковлева Е.А., Мотовилина Г.Д., Святышева Е.В., Хлусова Е.И. Исследование особенностей деформационного старения низколегированных сталей // В книге: Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов материалы XXIV Уральской школы

металловедов-термистов. ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». -2018. - С. 231-233.

8. Яковлева Е.А., Мотовилина Г.Д., Святышева Е.В., Хлусова Е.И. Влияние термомеханических воздействий на структуру и свойства судостроительной стали F40W после длительного хранения // Тезисы докладов. XVII конференция молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии». – С-Пб. - 20-21 июня 2018 г. - с 60-61.

9. Яковлева Е.А., Мотовилина Г.Д., Хлусова Е.И. Исследование характера разрушения низколегированных сталей после старения и отпуска по различным режимам // Сборник тезисов X Конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий», – Москва - 27 февраля 2019 г. - с. 97-100.

10. Яковлева Е.А., Мотовилина Г.Д., Хлусова Е.И. Исследование склонности к деформационному старению высокопрочных судостроительных сталей // Сборник материалов XX Международной научно-технической школы-семинара металлургов – молодых ученых. – Екатеринбург. – 3-7 февраля 2020 г. – С.39-42.

11. Яковлева Е.А., Мотовилина Г.Д., Хлусова Е.И. Исследование процессов старения высокопрочной стали с бейнитно-мартенситной структурой // Научные чтения им. чл.-корр. РАН Ивана Августовича Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов». Сборник материалов – М.: ИМЕТ РАН, 2020. - с. 36-37.

12. Яковлева Е.А., Г.Д. Мотовилина, Е.И. Хлусова. Исследование особенностей механического старения высокопрочных штрипсовых сталей // XI конференция молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии». –С-Пб. - 20-21 июня 2012 г. – С. 60.

13. Яковлева Е.А., Мотовилина Г.Д., Святышева Е.В., Хлусова Е.И. Особенности естественного и искусственного старения судостроительных ферритно-бейнитных сталей // Сборник трудов IX-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» ПРОСТ-2018». - Москва, НИТУ «МИСиС». - 24-26 апреля 2018 года. - С. 26.

14. Яковлева Е.А., Мотовилина Г.Д., Хлусова Е.И. Влияние режимов обработки на склонность низколегированных сталей к старению // Тезисы докладов. XVIII конференция молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии». Санкт-Петербург - 19-20 июня 2019 г. 2019 г. - с 47-48.

15. Яковлева Е.А., Мотовилина Г.Д., Хлусова Е.И. Влияние дополнительных термических обработок и технологии изготовления на склонность к деформационному старению высокопрочной стали с бейнитно-мартенситной структурой // Сборник научных трудов XIII Всероссийского молодежного научного форума «Open Science 2020», 18-20.11.2020, с. 87.

16. Патент RU 2653748 С1. Хладостойкая свариваемая сталь и изделие, выполненное из нее (варианты) // Голубева М.В., Орлов В.В., Сыч О.В., Хлусова Е.И., Яковлева Е.А. и др. Бюллетень изобретений №14 от 14.05.2018.

Подписано в печать « 13 » апреля 2021. Формат 60x84 1/16.

Печать – офсетная. Усл. п. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,15

Тираж 90 экз. Заказ № 2/27

Отпечатано в типографии НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей»

191015, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, дом 49

Лицензия на полиграфическую деятельность

Лр №020644 от 13 октября 1997