

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 31.1.007.01, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИТАРНОГО
ПРЕДПРИЯТИЯ «ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ ИМ. И.П. БАРДИНА»,
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 23.03.2022 года № 1/22

О присуждении Мишетьян Анне Рубеновне, гражданке Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Особенности механизмов разрушения и деформационного старения в зависимости от структурного состояния низколегированных трубных сталей» по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов принята к защите 30.12.2021 года (протокол заседания № 2/21) диссертационным советом 31.1.007.01, созданным на базе федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина», Министерство промышленности и торговли Российской Федерации, по адресу: 105005, г. Москва, ул. Радио д. 23/9, стр. 2, приказ о создании диссертационного совета №673/нк от 18.11.2020 года.

Соискатель Мишетьян Анна Рубеновна, «06» января 1986 года рождения.

В 2008 году соискатель окончила государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный индустриальный университет» (РФ, г. Москва). В 2012 году окончила заочную аспирантуру федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина» по специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Работает научным сотрудником лаборатории свариваемых конструкционных сталей Научного центра качественных сталей в федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина», Министерство промышленности и торговли Российской Федерации.

Диссертация выполнена в Научном центре качественных сталей федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина», Министерство промышленности и торговли Российской Федерации.

Научный руководитель - доктор технических наук, Шабалов Иван Павлович, федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина», Научный центр качественных сталей, лаборатория коррозионностойких сталей и сплавов, главный научный сотрудник;

Научный консультант - доктор технических наук, профессор, Филиппов Георгий Анатольевич, федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина», Научный центр качественных сталей, директор.

Официальные оппоненты:

Чувильдеев Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Научно-исследовательский физико-технический институт, директор;

Соколовская Элина Александровна, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», кафедра металловедения и физики прочности, доцент кафедры, Ученый секретарь Федерального Учебно-методического объединения в системе высшего образования по УГСН 22.00.00 «Технологии материалов»

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта», г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном Студеновым Евгением Павловичем, Центр стали и сварки, прочностных расчетов, директор, председатель секции Ученого совета; Скородумовым Сергеем Валериевичем, кандидат технических наук, секция Ученого совета, секретарь, и утвержденном Негановым Дмитрием Александровичем, доктор технических наук, первый заместитель генерального директора, указала, что представленная диссертация выполнена на актуальную тему, имеет научную новизну и практическую значимость, совокупность полученных результатов и выводов представляют значительный интерес для разделов металловедения и термической обработки металлов и сплавов и может стать основой для исследований, проводимых в области эксплуатационной надежности трубопроводов.

Соискатель имеет 37 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 37 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 9 работ.

Научные публикации посвящены изучению особенностей микроструктуры малоуглеродистых низколегированных трубных сталей и выявлению закономерностей влияния параметров структурного состояния, полученного в зависимости от определенного химического состава и режимов деформационно-термической обработки, на механические свойства, хладостойкость и склонность к деформационному старению сталей. Установлено снижение механических свойств, ударной вязкости, ухудшение хладостойкости в процессе деформационного старения, в большей степени проявляющееся у стали с бейнитной структурой. Применение специальных методов исследования позволило изучить механизмы разрушения и деформационного старения трубных сталей с различной структурой. Показано, что неоднородность ферритно-перлитной структуры негативно влияет на сопротивление хрупкому разрушению вследствие образования локальных напряжений более высокого уровня по сравнению со структурой бейнитного типа. Основную долю энергии разрушения в низкоуглеродистых сталях с ферритно-перлитной структурой составляет работа

зарождения трещины, поэтому важно учитывать интенсивность снижения работы распространения трещины при понижении температуры испытаний, а не суммарной работы разрушения. Предложено описание механизма деформационного старения стали со структурой бейнитного типа, связанного с одновременным протеканием двух процессов на различных структурных уровнях, имеющих противоположное влияние на сопротивление деформации: повышение предела текучести в результате упрочнения происходит вследствие закрепления дислокаций атомами внедрения; разупрочнение вызвано исчезновением островков М/А-составляющей, упрочняющей металл в исходном состоянии, в результате TRIP-эффекта при предварительной деформации и распада мартенсита при последующем нагреве.

Определены критические степени деформации труб из стали с многофазной структурой, сохраняющей при деформационном старении высокую способность к упрочнению вплоть до деформации со степенью 5% (бейнитная сталь - 2%). Данные, полученные в работе, могут быть использованы при оценке остаточного ресурса и прогнозировании надежности трубопроводов, а также корректировки технологии на металлургическом и трубном переделах для улучшения качества продукции.

Недостовверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, отсутствуют.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Мишетьян, А.Р. Исследование влияния условий последеформационного охлаждения на склонность к деформационному старению низколегированных сталей / А.Р. Мишетьян, Г.А. Филиппов, Ю.Д. Морозов, О.Н. Чевская // Деформация и разрушение материалов. — 2011. — №8. — С. 40–43. (0,50 п.л. / 0,33 п.л.).

2. Мишетьян, А.Р. Влияние структурного состояния и температуры на сопротивление зарождению и распространению трещин в трубных сталях / А.Р. Мишетьян, И.П. Шабалов, О.Н. Чевская, Г.А. Филиппов // Металлург. — 2017. — № 12. — С. 43–50. (1,00 п.л. / 0,48 п.л.).

3. Мишетьян, А.Р. Исследование механизма изменения структурного состояния в процессе деформационного старения и его влияния на свойства трубной стали бейнитного типа /А.Р. Мишетьян, И.П. Шабалов, О.Н. Чевская, Г.А. Филиппов // Бюл. НТИЭИ «Черная металлургия». — 2018. — № 9. — С. 77–91. (1,88 п.л. / 0,52 п.л.).

4. Мишетьян, А.Р. Влияние деформационного старения на скоростную зависимость сопротивления деформации и хладноломкость низколегированной стали с ферритно-перлитной и бейнитной структурами / А.Р. Мишетьян, Г.А. Филиппов, О.Н. Чевская // Деформация и разрушение материалов. — 2021. — № 6. — С. 29–34. (0,75 п.л. / 0,38 п.л.).

На диссертацию и автореферат поступило 15 положительных отзывов. Во всех отзывах отмечено, что диссертационная работа посвящена актуальной теме деформационного старения низколегированных трубных сталей, поскольку металл труб подвергается деформации как при изготовлении труб, так и в процессе эксплуатации. Надежность труб магистральных газопроводов оценивается прежде всего по сопротивлению металла труб хрупкому разрушению при отрицательных температурах - хладостойкости. В результате деформационного старения снижается сопротивление разрушению, что приводит к риску возникновения аварийных ситуаций. Поэтому целью данной работы было выявление природы изменения механических свойств и хладостойкости в результате деформационного старения в зависимости от структурного состояния исследуемых сталей. Диссертационная работа выполнена с привлечением современных методов исследования структуры и свойств, что позволило получить результаты, характеризующиеся научной новизной: установлено существование линейной связи между критической температурой хрупкости и величиной релаксационного эффекта, отражающего степень локализации пластической деформации, что связано с уровнем неоднородности структуры; для стали с бейнитной структурой в отличие от ферритно-перлитной характерно вырождение стадии деформационного упрочнения ($\sigma_T/\sigma_n \rightarrow 1$) уже при степени деформации 2%; анализ результатов изучения внутреннего трения и скоростной зависимости предела текучести, выявление локального TRIP-эффекта в структуре сталей и

соотнесение с изменением комплекса свойств позволили сформулировать механизм деформационного старения для стали со структурой бейнитного типа.

Практическая значимость заключается в разработке рекомендаций для диагностики текущего состояния металла. Определены критические степени деформации сталей с разным типом структуры: на основании установленной предельно допустимой величины холодной деформации металла труб с многокомпонентной структурой (не более 5%, при этом в бейнитной стали - 2%), гарантирующей величину равномерного удлинения, выданы рекомендации по изготовлению отводов холодного гнутья для труб магистральных газопроводов, используемых для зон активных тектонических разломов (АТР). Определение вклада работы зарождения и распространения трещины в общей энергоемкости разрушения показало, что при всех температурах испытания основную долю в энергии разрушения занимает работа зарождения трещины, поэтому важно при снижении температуры испытаний оценивать не ударную вязкость, а интенсивность снижения работы распространения трещины, доля которой может составлять всего 10-20% при $-80^{\circ}\text{C} \div -100^{\circ}\text{C}$.

Результаты исследования могут быть использованы производителями труб при оценке надежности, долговечности эксплуатации и анализе разрушения конструкций из низкоуглеродистых низколегированных сталей.

Замечания, приведенные в отзывах:

1. АО «Русский научно-исследовательский институт Трубной промышленности». Подписан д.т.н., генеральным директором, Пышминцевым И.Ю.

а) Требуется уточнения предложенный механизм изменения свойств бейнитной стали при деформационном старении «...после деформации 3% приводит к снижению сопротивления пластической деформации... в результате исчезновения М/А составляющей». Очевидно, что поскольку соотношение фаз в М/А составляющей строго не детерминировано, то при деформации она исчезнуть не может, поскольку речь идет только о превращении ее аустенитной составляющей в мартенсит. Распад мартенсита при 200°C за короткое время

старения не может быть глубоким и, соответственно, привести к радикальному разупрочнению.

б) Имеются некоторые нестыковки и неудачное описание явлений. Например, при описании отличий поведения сталей для АТР указано, что «...наблюдается исчерпание деформационной способности исследованного металла – отношение σ_T/σ_B стремится к 1...». Поскольку и на стадии локализации металл продолжает деформироваться, то его деформационная способность (пластичность) сохраняется. Аналогично в выводе 1 это интерпретировано, как «вырождение стадии деформационного упрочнения». Понятно, что имел в виду автор, но терминологически это явно не строго. Кроме того, указанный уровень соотношения 1 не соответствует, показанному на рис. 12 (справа), который составляет около 0,85 даже при деформации более 5%.

2. Государственное научное учреждение «Институт технической акустики» Национальной академии наук Беларуси». Подписан членом-корреспондентом НАН Беларуси, д.т.н., Рубаником В.В.

Представляло бы интерес выяснить, какова зависимость степени разупрочнения стали с бейнитной структурой от количества и размера участков с мартенсито-аустенитной структурой, претерпевающих превращение в ходе предварительной деформации.

3. ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет». Подписан профессором кафедры материаловедения и технологии материалов, д.т.н., доц., Крыловой С.Е. и доцентом той же кафедры, к.т.н., доц., Приймак Е.Ю.

К сожалению, из текста автореферата не ясно, по какой методике осуществлялось определение работы зарождения и распространения трещины при испытании образцов на ударный изгиб.

4. Институт Физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН. Подписан главным научным сотрудником лаборатории физики упрочнения поверхности, д.т.н., проф., Сизовой О.В.

На стр. 11 автореферата делается вывод, что более высокое сопротивление хрупкому разрушению стали К65 обусловлено более мелкозернистой структурой,

однако, количественного сравнения среднего размера зерна этой стали с другими исследованными сталями не приведено.

5. ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет». Подписан заведующей кафедрой «Физика металлов и материаловедение», д.т.н., проф., Марковой Г.В.

а) Недостаточно обоснованно заключение автора о значимом влиянии мартенситно-аустенитных областей на механические свойства сталей с учетом весьма малой доли этих областей – 3-5%.

б) Не указана погрешность измерения механических свойств (рис. 4, 6, 12, табл.3), доли вязкой составляющей (рис.3).

в) Из автореферата не ясно, анализировалось ли изменение фона внутреннего трения после деформации.

6. ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». Подписан профессором кафедры «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов», д.т.н., Шацовым А.А.

а) В автореферате не отражены изобретения автора, без сомнений материал патентоспособный;

б) В пункте 1 научной новизны: «установлена связь между ...». Возможно, лучше было бы найти какие-либо функциональные зависимости;

в) Пункт 2. Почему сталь с бейнитной структурой теряет способность к деформационному упрочнению (природа явления)?

г) Пункты 3 и 4. Возможно ли за счет ТРИП-эффекта значительно уменьшить негативное влияние деформационного старения?

д) На кривых отсутствуют доверительные интервалы;

е) К какой стали относится рис.11?

7. ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова». Подписан директором, д.т.н., Горицким В.М.

а) Рассматривая роль параметров тонкой структуры трубных сталей, в том числе влияние типа феррита (бейнита), М/А составляющей и др., не изучена роль неметаллических включений на формирование барьеров для дислокаций и

величину релаксационных эффектов. Известно, что количество неметаллических включений различного происхождения и морфологии существенно влияют на хладостойкость стали.

б) Для исследуемых трубных сталей не приведены направления вырезки образцов, в том числе и для ударных. Для магистральных трубопроводов до последнего времени в России использовали поперечные ударные образцы, но после введения в действие Приложения №2 к СП 16.13330-2017 применяются продольные образцы. Согласно исследованиям последних 10 лет, коэффициент анизотропии ударной вязкости, K_a , определяемый отношением значения KCV вдоль направления проката к значению KCV поперек прокатки, зависит от содержания углерода (перлита) и серы (сульфидов). Для сталей К52, К56 значение K_a варьируется от 1,1 до 4,6. Для стали типа К65, производимых по технологии контролируемой прокатки и /или термомеханической обработки, в формирование высоких значений K_a (1,1-8) участвуют сложнообразуемые включения на основе Al_2O_3 , Cr_2O_3 и карбонитридов $Ti(C,N)$. В случае высоких значений K_a (более 2,0) существенно возрастает склонность стали к хрупкому разрушению при использовании поперечных ударных образцов. Естественно ожидать, что в этом случае изменяются величины релаксационного эффекта и других исследуемых характеристик.

8. Пятигорский институт (филиал) ФГАОУ ВО «Северо-кавказский Федеральный Университет». Подписан профессором кафедры «Строительство», д.т.н., Мишиным В.М.

На рис. 2 представлены зависимости ударной вязкости листового проката разных классов прочности на образцах с острым надрезом (KCV) и образцах с заранее нанесенной усталостной трещиной (KCT) от температуры испытаний в виде непрерывных кривых и не показаны точки, соответствующие результатам испытаний, а также погрешности испытания. В связи с этим, не ясна точность проведенного анализа.

9. НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей». Подписан старшим научным сотрудником лаборатории 32, к.т.н., Яковлевой Е.А.

а) В тексте автореферата аномальный эффект деформационного старения, обусловленный вырождением стадии деформационного упрочнения ($\sigma_{0,2}/\sigma_B \rightarrow 1$) выявлен для низкоуглеродистых ферритно-бейнитных сталей. Известно, что для ферритно-перлитной стали этот эффект будет зависеть от размера зерна, доли и морфологии перлитной составляющей. Было бы полезно провести подобные исследования для сталей с другим типом структуры и различными морфологией и соотношением структурных составляющих.

б) В автореферате имеется раздел по исследованию влияния деформационного старения на параметры трещиностойкости: работу зарождения и распространения трещины. Автор проводит оценку на основе сопоставлений результатов испытаний на ударный изгиб на образцах с концентраторами вида V и T. Такая оценка трещиностойкости была бы более корректной при сопоставлении ее с результатами специальных испытаний (CTOD).

10. НИЦ «Курчатовский институт». Подписан главным научным сотрудником Отдела аналитических методов исследования материалов и перспективных технологий Отделения реакторных материалов и технологий, д.т.н., проф., Кулешовой Е.А.

В работе не исследовано влияние элементов химического состава стали с бейнитным типом структуры (легирующих и микролегирующих) на склонность к деформационному старению.

11. ООО «Газпром ВНИИГАЗ». Подписан главным научным сотрудником лаборатории исследований материалов Корпоративного научно-технического центра развития трубной продукции, д.т.н., Настичем С.Ю.

а) Среди ученых в области старения конструкционных сталей следовало бы также отметить И.В. Горынина (легированные судостали) и В.Н. Чувильдеева (трубные стали).

б) В автореферате не рассмотрено влияние образования карбидной фазы, включая цементит и карбонитриды микролегирующих элементов (Nb, Ti, V), на процесс старения с точки зрения связывания углерода и охрупчивания межфазных поверхностей.

в) При рассмотрении деформационной способности сталей при старении следовало бы также оценить величину равномерного удлинения (δ_p) и показатель упрочнения (n).

г) На рисунке 6 отсутствуют данные по ударной вязкости образцов КСТ, что указано в тексте (представлены только зависимости для КСV судя по сравнению с рис.2).

12. ПАО «Трубная Металлургическая Компания». Подписан первым заместителем генерального директора по операционной деятельности и развитию, д.т.н., Чикаловым С.Г.

а) Явно неудачными представляются неоднократно использованные выражения, например, «...сталь... теряет способность к деформационному упрочнению...». Деформационное упрочнение при холодной деформации металлов и сплавов имеет абсолютный характер и не может исчезать, сохраняясь вплоть до разрушения. Можно догадаться, что автор имел ввиду снижение интенсивности деформационного упрочнения, приводящее к немедленной локализации деформации в шейке и снижению напряжения только в условных координатах.

б) Недостаточно раскрыты состав стали и особенности микроструктуры сталей для применения в условиях АТР, приводящие к их особенному поведению даже при старении после деформации в 5%.

13. ПАО «ММК». Подписан главным специалистом группы по развитию научно-технического центра, д.т.н., Денисовым С.В.

При сравнительном исследовании хладостойкости сталей с разным структурным состоянием не показана их чистота по неметаллическим включениям и примесям.

14. АО «Выксунский металлургический завод». Подписан начальником отдела по исследованиям и разработкам Центральной исследовательской лаборатории Инженерно-технологического центра, к.т.н., Червонным А.В.

а) В автореферате не указано и не оценено влияния содержания азота в сравниваемых сталях на процесс деформационного старения.

б) Исходным материалом для проведения исследований является листовой прокат низколегированных трубных сталей, однако в автореферате не указано, каким именно образом учитывается влияние трубного предела на снижение доли остаточного аустенита в структуре.

15. ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет». Подписан заведующим кафедрой естественно-научных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, заслуженным деятелем науки РФ, Лауреатом премии правительства РФ в области науки техники, Лауреатом премии РАН им. И.П. Бардина, д.ф-м.н., профессором, Громовым В.Е. и к.т.н., доцентом той же кафедры, Невским С.А. – без замечаний.

Заключение по отзывам:

1. Раскрыты металлургические особенности механизма разрушения и деформационного старения низколегированных трубных сталей классов прочности К52-К65 с разным структурным состоянием. Проведенные в лабораторных условиях эксперименты по изучению влияния структурного состояния на уровень свойств позволили установить ряд значимых структурных закономерностей и выявить критические степени деформации, обеспечивающие комплекс свойств, характеризующих низкую склонность к деформационному старению и высокую эксплуатационную надежность трубопровода.

2. Успешно решены научные и прикладные задачи. Результаты имеют важное значение для теоретического и прикладного металлургии и могут быть использованы на практике, поскольку позволяют перейти к научно-обоснованным подходам при разработке новых технологий изготовления сталей для трубопроводов, эксплуатируемых в сложных условиях.

3. Достоинством работы является комплексный и методически обоснованный подход к решению поставленных задач; значительный объем результатов металлографических исследований, в том числе с применением специальных методов травления (LePera); изучение структурного состояния проводилось методами рентгеноструктурного анализа, просвечивающей и растровой электронной микроскопии; определение температурной зависимости

внутреннего трения; проведение испытаний на релаксацию напряжений и на трещиностойкость.

4. Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных физических методов изучения структурного состояния стали, стандартных механических и специальных свойств.

5. Основные положения и результаты работы достаточно полно освещены в публикациях и обсуждены на профильных конференциях, в том числе на международных. Автореферат хорошо оформлен, написан грамотным техническим языком, основные положения исследований подкреплены иллюстративным материалом.

6. Во всех отзывах отмечается, что диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.6.1 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов и критериям, предъявляемым ВАК, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

Чувильдеев Владимир Николаевич - ведущий специалист в области физики металлов и металловедения, а также проблем прочности и разрушения металлических материалов, изучения фазовых и структурных превращений, физико-механических свойств, процессов старения и механики разрушения сталей;

Соколовская Элина Александровна - ведущий специалист в области металловедения и термической обработки металлов и сплавов, физики прочности, пластичности и разрушения сталей;

Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта» - профильная научно-исследовательская организация, специализирующаяся на исследованиях транспортировки нефтепродуктов по магистральным трубопроводам и вопросам диагностики старения и деградиационных процессов материала труб.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны металловедческие представления о влиянии различных типов структурного состояния металла проката и труб из низколегированных трубных сталей на склонность к деформационному старению и разрушению;

предложен структурный механизм, объясняющий изменение свойств в результате деформационного старения низколегированной трубной стали с бейнитным типом структуры, являющийся следствием двух процессов, одновременно протекающих на различных структурно-масштабных уровнях и имеющих противоположное влияние на сопротивление деформации: повышение предела текучести в результате упрочнения вследствие закрепления дислокаций атомами внедрения и разупрочнение, вызванное исчезновением участков М/А, упрочняющих металл в исходном состоянии, в результате локального TRIP-эффекта при предварительной деформации и распада мартенсита при последующем нагреве;

доказана перспективность использования разработанных научных положений и выявленных закономерностей при оценке деградиационных процессов, протекающих в ходе эксплуатации труб, анализе разрушений конструкций из низкоуглеродистых низколегированных сталей;

введены рекомендации по предельно допустимым деформациям при изготовлении отводов холодного гнущего для труб магистральных газопроводов, предназначенных для эксплуатации в зонах активных тектонических разломов (АТР), гарантирующих стабильность механических свойств.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано по результатам экспериментальных исследований существование связи между хладостойкостью и склонностью к релаксации локальных микронапряжений, возникающих при нагружении в упругой области. Повышение неоднородности и снижение дисперсности структуры, а также уменьшение подвижности дислокаций в результате деформационного старения увеличивают склонность низколегированной стали к хрупкому разрушению, что является следствием затруднения протекания релаксационных процессов. Применительно к проблематике диссертации эффективно использованы современные методы исследования стандартных и специальных свойств; прямых (световая и

электронная микроскопия) и физических методов изучения структурного состояния стали;

изложены научные положения о том, что для малоуглеродистой низколегированной стали с бейнитной структурой, в отличие от стали с ферритно-перлитной структурой, в результате деформационного старения резко снижается способность к деформационному упрочнению (отношение $\sigma_T/\sigma_B \rightarrow 1$) при степени деформации 2%, что приводит к снижению эксплуатационной надежности;

раскрыты закономерности эволюции микроструктуры и свойств в процессе деформационного старения трубной стали с бейнитным типом структуры на основе обнаруженного локального TRIP-эффекта;

изучена природа увеличения прироста предела текучести в результате деформационного старения, наблюдаемого при скачкообразном изменении скорости нагружения. Показано, что более высокий прирост предела текучести в результате деформационного старения бейнитной стали является следствием затруднения термоактивированного скольжения, связанного с увеличением полей искажений кристаллической решетки вокруг атомов внедрения, концентрация которых выше в менее равновесной бейнитной структуре.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны практические рекомендации по применению труб с высокой деформационной способностью, предназначенных для эксплуатации в зонах активных тектонических разломов и используемых при изготовлении гнутых отводов, вплоть до степени деформации 5%, при которой сохраняется высокая деформационная способность стали ($\sigma_T/\sigma_B \leq 0,85$);

представлены рекомендации объективной оценки риска образования протяженных разрушений магистральных трубопроводов, заключающейся в необходимости дополнительного контроля интенсивности снижения работы распространения трещины при понижении температуры испытаний, а не только суммарной работы разрушения (ударной вязкости).

Оценка достоверности результатов исследования выявила: экспериментальные результаты исследований получены в лабораторных условиях

с применением современных методов изучения микроструктуры, испытаний механических свойств, сопротивления разрушению, склонности к деформационному старению стали на сертифицированном аттестованном оборудовании; для сбора и обработки полученных экспериментальных данных использованы современные цифровые методы анализа структуры; предлагаемые научные выводы и заключения базируются на анализе и обобщении мирового опыта в области низколегированных трубных сталей, их эксплуатационной надежности, склонности к деформационному старению и согласуются с опубликованными данными.

Личный вклад соискателя состоит в постановке цели и задач исследований, выработке направлений и методов решения научно-практических проблем, разработке программы исследований, непосредственном участии в получении экспериментальных данных, обработке, анализе и интерпретации полученных результатов, формулировке выводов и заключений по работе, разработке практических рекомендаций, апробации материалов исследования и подготовке их к публикации.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания: в работе не учитывались процессы, развивающиеся в нано-масштабе и касающиеся стадийности механизма деформационного старения, а также не приведены данные по оценке погрешности результатов испытаний.

Соискатель Мишетьян А.Р. ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы и привела собственную аргументацию выбора методов изучения механизма деформационного старения, а также подходы к обработке, анализу и представлению результатов исследования.

На заседании 23.03.2022 года диссертационный совет принял решение за успешное решение научной задачи, направленной на выявление природы изменения механических свойств и хладостойкости в результате деформационного старения трубных сталей в зависимости от их структурного состояния, имеющей значение для развития металловедческой науки, присудить Мишетьян А.Р. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 16 докторов наук по научной специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за - 15, против - 0, недействительных бюллетеней - 2.

Председатель
диссертационного совета,
д.т.н., с.н.с.

Родионова Ирина Гавриловна

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н.

Холодный Алексей Андреевич

23 марта 2022 года

Подпись руки Родионовой И.Г. и Холодного А.А. заверяю:
Ученый секретарь ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»
Москвина Татьяна Павловна

