

На правах рукописи



**МИШЕТЬЯН АННА РУБЕНОВНА**

**ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ  
И ДЕФОРМАЦИОННОГО СТАРЕНИЯ  
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ  
НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ**

**2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии  
«Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии  
имени И.П. Бардина» (ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»)

- Научный руководитель:** **ШАБАЛОВ Иван Павлович,**  
доктор технических наук,  
главный научный сотрудник  
Научного центра качественных сталей
- Научный консультант:** **ФИЛИППОВ Георгий Анатольевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
директор Научного центра качественных сталей
- Официальные оппоненты:** **ЧУВИЛЬДЕЕВ Владимир Николаевич,**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
директор Научно-исследовательского  
физико-технического института, ФГАОУ ВО  
«Национальный исследовательский  
Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского»
- СОКОЛОВСКАЯ Элина Александровна,**  
кандидат технических наук, доцент, доцент  
кафедры металловедения и физики прочности,  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»
- Ведущая организация:** Общество с ограниченной ответственностью  
«Научно-исследовательский институт  
трубопроводного транспорта»

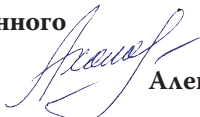
Защита диссертации состоится «23» марта 2022 г. в 14 часов на заседа-  
нии диссертационного совета 31.1.007.01 на базе ФГУП «ЦНИИчермет им.  
И.П. Бардина» по адресу: 105005, Москва, ул. Радио, д. 23/9, стр. 2.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с указанием даты составления,  
заверенные печатью, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертаци-  
онного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в технической библиотеке ФГУП  
«ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» и на сайте <http://www.chermet.net>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

**Ученый секретарь диссертационного  
совета 31.1.007.01,**  
кандидат технических наук



**Алексей Андреевич Холодный**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В современных условиях интенсивного развития топливно-энергетического комплекса требуется обеспечение высокой экономической эффективности трубопроводного транспорта, достигаемой увеличением пропускной способности труб путем расширения их диаметра. При этом для сохранения надежности трубопроводов с повышением рабочего давления требуется повышение прочности материала труб с целью снижения металлоемкости. В процессе производства (на металлургическом, трубном переделах), при строительстве готовых трубных конструкций металл подвергается различного рода термомеханическим воздействиям. Помимо этого при сооружении трубопроводных систем необходимо учитывать топографические, геологические данные о местности, определяющие характер эксплуатации труб. Так, транспортировка углеводородов может производиться по сейсмоактивным районам или территориям, находящимся в условиях вечной мерзлоты.

Пластическая деформация металла труб может приводить к развитию деформационного старения и, как следствие, снижению сопротивления разрушению, что нашло экспериментальное подтверждение. В связи с этим деформационное старение является одной из причин снижения эксплуатационной надежности трубопроводов.

Деформационное старение – процесс, происходящий в стали в результате протекания пластической деформации и последующей выдержки (или нагрева) металла в течение длительного времени. Как известно, явление деформационного старения связано с внесением свежих дислокаций при деформации, взаимодействующих со свободными атомами внедрения в структуре, что в итоге приводит к повышению сопротивления движению дислокаций и, следовательно, появлению в металле локальных микронапряжений, следствием которых являются эффекты упрочнения и охрупчивания.

Критерием протекания деформационного старения (исчерпания способности металла к деформационному упрочнению) является изменение механических свойств стали: увеличение соотношения  $\sigma_T/\sigma_B$ , снижение пластичности, ударной вязкости, трансформация кривой «напряжение – деформация».

Явление деформационного старения исследовалось в работах А.Х. Коттрелла, Ю.А. Скакова, В.И. Саррака, М.А. Криштала, С.А. Головина и др. Наиболее полно изучена физическая природа деформационного старения железа, склонность к которому зависит от содержания примесей внедрения – углерода и азота. Склонность к деформационному старению стали зависит еще и от структурного состояния, и поэтому вопрос менее изучен.

В связи с этим исследование механизма влияния деформационного старения на механические свойства и параметры сопротивления разрушению современных трубных сталей является важной практической задачей.

**Цель работы** – выявление природы изменения механических свойств и хладостойкости в результате деформационного старения трубных сталей в зависимости от их структурного состояния.

В работе поставлены следующие **задачи**:

1. Исследование механизмов, обеспечивающих сопротивление разрушению низколегированных трубных сталей с разным типом структуры (феррито-перлитная и бейнитная).

2. Оценка влияния структуры низколегированных сталей на склонность к деформационному старению и изменение механических свойств, параметров сопротивления хрупкому разрушению при деформационном старении.

3. Исследование природы деформационного старения стали с бейнитным типом структуры.

4. Изучение влияния деформационного старения на комплекс свойств металла труб с высокой деформационной способностью, прокладываемых в зонах активных тектонических разломов (АТР) и используемых для изготовления отводов.

**Научная новизна:**

1. Установлена связь между хладостойкостью низколегированных трубных сталей и склонностью к релаксации напряжений в локальном микрообъеме, возникающих в ходе нагружения 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.

2. Показано, что в отличие от стали с феррито-перлитной структурой, сталь со структурой бейнитного типа в процессе деформационного старения теряет способность к деформационному упрочнению (отношение  $\sigma_t/\sigma_b \rightarrow 1$ ) при степени деформации 2%, что приводит к снижению эксплуатационной надежности.

3. Установлено, что в ходе деформации низколегированной трубной стали со структурой бейнитного типа реализуется процесс превращения остаточного аустенита в мартенсит (локальный TRIP-эффект). С увеличением степени деформации происходит превращение участков остаточного аустенита, в том числе содержащегося в островках М/А-составляющей, до полного его исчезновения при степени деформации 3%. Дальнейший нагрев при темпера-

туре 200 °С приводит к распаду мартенситной составляющей с выделением карбидов.

4. Предложен структурный механизм, объясняющий трансформацию вида диаграммы растяжения бейнитной стали после деформационного старения, являющийся следствием двух процессов, одновременно протекающих в структуре на различных 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, упрочняющей металл в исходном состоянии, в результате локального TRIP-эффекта при предварительной деформации и распада мартенсита при последующем нагреве.

5. На основании исследования скоростной зависимости предела текучести сталей впервые установлено увеличение прироста предела текучести после деформационного старения, наблюдаемое при скачкообразном изменении скорости нагружения. Показано, что более высокий прирост предела текучести в результате деформационного старения стали с бейнитной структурой является следствием затруднения термоактивированного скольжения, связанного с увеличением полей искажения кристаллической решетки вокруг атомов внедрения, концентрация которых выше в менее равновесной бейнитной структуре.

### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Установлено, что основная доля в суммарной энергоемкости разрушения при пониженных температурах приходится на работу зарождения трещины, поэтому для объективной оценки риска образования протяженных разрушений магистральных трубопроводов важно учитывать интенсивность снижения работы распространения трещины при понижении температуры испытаний, а не суммарной работы разрушения (ударной вязкости).

2. На основании установленной предельно допустимой величины холодной деформации металла труб (не более 5%), гарантирующей величину равномерного удлинения, выданы рекомендации по изготовлению отводов холодного гнутья для труб магистральных газопроводов, предназначенных для эксплуатации в зонах активных тектонических разломов (АТР).

3. Оценка надежности и долговечности эксплуатации трубопроводов является важной задачей для производителей труб. Результаты данного исследования могут служить для диагностики текущего состояния материала, проведения экспертиз, анализа разрушения трубопроводов и других конструкций из малоуглеродистых низколегированных сталей, а также могут стать основой для дальнейших исследований, проводимых в данной области.

**Методология и методы исследования.** Основной методологии исследования являлся анализ литературных данных, посвященных проблеме разрушения и деформационного старения сталей. Решение задач в работе осуществлялось с помощью современных методов исследования стандартных и специальных свойств, а также прямых (световая и электронная микроскопия) и физических методов изучения структурного состояния стали.

**Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Взаимосвязь между типом структурного состояния, уровнем хладостойкости и склонностью к деформационному старению низколегированных трубных сталей.
2. Определение вклада работы зарождения и распространения трещины в общую энергию разрушения и изменение их соотношения после деформационного старения.
3. Структурный механизм аномальной склонности к деформационному старению низколегированных трубных сталей с бейнитной структурой.
4. Критическая степень пластической деформации, допустимая при изготовлении отводов холодного гнутья.

**Степень достоверности результатов исследований** подтверждается применением современных методов анализа структуры и свойств изученных материалов. Результаты работы апробированы на международных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах.

**Личный вклад** автора состоит в обзоре мировой научной литературы, постановке цели, определении задач работы, выборе методов исследований, получении экспериментальных результатов, их обработке, анализе, обобщении и формулировании заключительных положений.

**Апробация результатов работы.** Материалы диссертации доложены и обсуждены на следующих конференциях: II, III, IV, V, VI, XI научно-технических конференциях молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий» (Москва, 2010, 2011, 2012, 2014, 2015, 2018); VI, VIII, IX Евразийских научно-практических конференциях «Прочность неоднородных структур» (Москва, 2012, 2016, 2018); VII, IX, XI Международных конференциях «Фазовые превращения и прочность кристаллов» (Черноголовка, 2012, 2016, 2020); VI Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (Москва, 2015); XXII, XXIII Петербургских чтениях по проблемам прочности (Санкт-Петербург, 2016, 2018); Международном симпозиуме «Перспективные материалы и технологии» (Витебск, 2017); LI (Харьков, 2011), LII (Уфа, 2012), LIII (Витебск, 2012), LVII (Севастополь, 2016), LVIII (Пермь, 2017), LX (Витебск, 2018), LXII

(Минск, 2020) Международных научных конференциях «Актуальные проблемы прочности».

Работа отмечена званием лауреата конкурса «Молодые ученые-2018» 24-ой Международной промышленной выставки «Металл-Экспо», 13–16 ноября 2018 г., Москва.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 37 печатных работ, из них 9 – в журналах, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация содержит введение, 5 глав, общие выводы, список литературы. Работа изложена на 145 страницах машинописного текста и содержит 62 рисунка, 16 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** рассмотрена актуальность исследуемой научной проблемы, сформулированы цель, задачи и приведены основные положения, выносимые на защиту. Отмечена научная новизна, практическая значимость диссертационной работы.

**В главе 1** приведен аналитический обзор литературных источников, где обозначены факторы, влияющие на эксплуатационную надежность конструкционных материалов. Представлены общие сведения об особенностях структуры, свойствах низколегированных трубных сталей. Описано современное состояние проблемы сопротивления хрупкому разрушению стали, склонности к деформационному старению. Рассмотрены основные закономерности явления деформационного старения и факторы (технологические, структурные, эксплуатационные), оказывающие влияние на свойства сталей при деформационном старении. На основе анализа современного состояния вопроса по изучаемой проблеме сформулирована цель и определены задачи диссертационной работы.

**Глава 2** содержит описание материалов и методик исследования. Основной объем исследований выполнен на металле листового проката различных классов прочности из малоуглеродистой низколегированной трубной стали, таблица 1.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых сталей

Класс прочности	Массовая доля элементов, %				
	C	Si	Mn	Микролегирующие	Другие элементы
K52	0,08	0,25	0,93	Nb – Ti – V	–
K56	0,11	0,42	1,60	Nb – Ti – V	–
K60	0,09	0,35	1,68	Nb – Ti – V	Ni
K65	0,06	0,22	1,75	Nb – Ti	Cu – Ni – Mo

Стандартные механические характеристики, определены при испытаниях на растяжение на испытательной машине INSTRON. Параметры трещиностойкости, сопротивления разрушению оценивали по результатам испытаний при статическом изгибе. Испытания на ударный изгиб проводили на маятниковом копре ПСВ-30 по ГОСТ 9454 на образцах с острым надрезом (KCV) и с заранее нанесенной усталостной трещиной (KCT) в интервале температур от  $-20$  до  $-100$  °С.

Для оценки уровня локальных напряжений, возникающих в металле при нагружении, определяли релаксационный эффект, оцениваемый по снижению напряжения с течением времени после нагружения до заданного уровня приложенной нагрузки  $\Delta\sigma_p = \sigma_0 - \sigma_t$ .

Испытания со скачкообразным изменением скорости деформации проводили при растяжении образцов диаметром 3 мм. Скорость деформации изменяли от  $1,1 \times 10^{-3}$  до  $1,1 \times 10^{-2}$  с $^{-1}$ . По результатам испытаний оценивали прирост сопротивления деформации в результате скачкообразного повышения скорости деформации в 10 раз.

Для определения склонности к деформационному старению образцы деформировали на 2%, разгружали, подвергали старению при 200 °С в течение 1 ч и повторно испытывали на растяжение. Склонность к деформационному старению оценивали по приросту предела текучести  $\Delta\sigma = \sigma_{0,2}^{ст} - \sigma_2$ , где  $\sigma_{0,2}^{ст}$  – предел текучести образца после старения;  $\sigma_2$  – напряжение, соответствующее деформации на 2% за площадкой текучести.

Металлографические исследования проведены на оптическом микроскопе Neophot 21 на шлифах, вырезанных вдоль направления прокатки, после травления в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты в соответствии с ГОСТами № 5639, 5640. Дополнительно применяли специальный метод цветного травления в реактиве Лерера. Для анализа изображений структуры использована программа ImageExpert Pro 3.

Тонкую структуру исследовали методом просвечивающей электронной микроскопии на приборе JEM200-CX.

На растровом электронном микроскопе JEOL JSM 6610LV выполнено фрактографическое исследование поверхности изломов образцов.

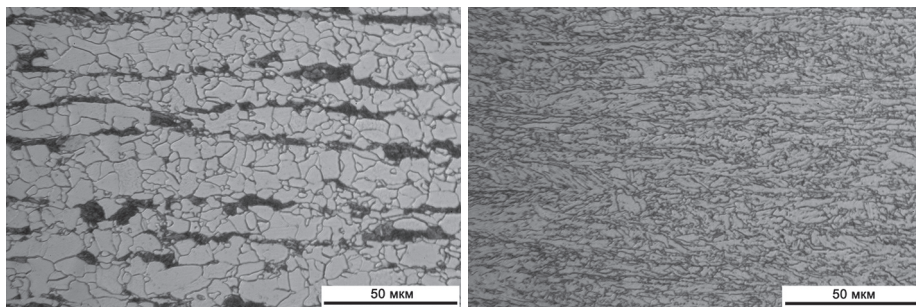
Плотность дислокаций и доля аустенита в структуре исследуемой стали определены с помощью рентгеноструктурного анализа на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3.

Определение температурной зависимости внутреннего трения проводили на релаксаторе «обратный крутильный маятник» при частоте колебаний 1 Гц.

**В главе 3** приведены результаты исследования влияния структуры на хладостойкость низколегированных трубных сталей.

Трубные стали, за исключением К65, имеют преимущественно феррито-перлитную структуру, отличающуюся соотношением структурных состав-





**Рисунок 1 – Типичная микроструктура исследуемых трубных сталей различных классов прочности: а – феррито-перлитная (K56); б – бейнитная (K65)**

ляющих, размером зерна, баллом полосчатости. Микроструктура образца стали K65 более мелкодисперсная, однородная, практически полностью бейнитная с присутствием небольшой доли мелкозернистого феррита (до 10%), рисунок 1.

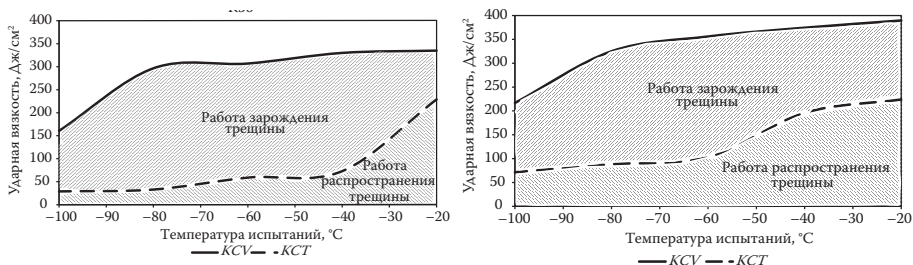
Исследованы механические свойства проката различных классов прочности, таблица 2.

**Таблица 2 – Механические свойства исследуемых сталей**

Класс прочности	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}/\sigma_B$	$\delta$
	Н/мм <sup>2</sup>		-	%
K52	378	510	0,74	23
K56	531	614	0,86	22
K60	552	637	0,87	24
K65	619	722	0,86	21

Анализ результатов испытаний образцов на растяжение показал, что механические свойства металла отвечают требованиям к листовому прокату соответствующих категорий прочности по уровню прочности и пластичности.

Сравнение температурной зависимости ударной вязкости на образцах KCV и KCT позволяет определить долю работы зарождения и долю работы распространения трещины в общей энергии разрушения в зависимости от температуры испытания (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Температурная зависимость ударной вязкости листового проката разных классов прочности на образцах с острым надрезом (KCV) и образцах с заранее нанесенной усталостной трещиной (KCT): а – K56; б – K65**

Основную долю в энергии разрушения составляет работа зарождения трещины, что наиболее ярко выражено в сталях К52, К56. Металл К65 в сравнении со сталями других классов прочности характеризуется значительно более высокими значениями работы распространения трещины, особенно это проявляется при понижении температуры испытаний. Так, при температуре испытания  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  величина работы распространения трещины для исследуемых сталей К65, К60, К56 и К52 составила соответственно 100, 50, 30 и 25 Дж/см<sup>2</sup>.

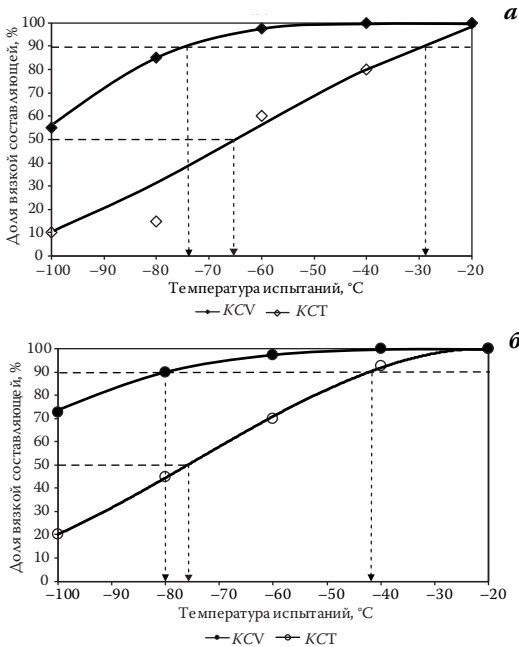
Исследование температурной зависимости доли вязкой составляющей в изломе образцов KCV не выявило значительной разницы в хладостойкости исследуемых сталей, что связано с вязким характером разрушения вплоть до температуры испытаний  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рисунок 3). Тем не менее, температура вязко-хрупкого перехода  $T_{90}$  для стали К65 при самой высокой прочности оказалась наиболее низкой и составила  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , для всех остальных сталей она несколько выше – на уровне  $-72\text{...}-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Видно, что при температуре  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и выше (в полностью вязкой области разрушения) соотношение долей работы зарождения и распространения трещины примерно одинаковое для всех исследованных сталей и составляет

порядка 50...70%, а при более низких температурах доля работы распространения трещины в общей энергоёмкости разрушения уменьшается.

В связи с этим при эксплуатации труб в условиях низких температур важно учитывать не столько общий уровень ударной вязкости стали, сколько величину работы распространения трещины, доля которой в суммарной энергии разрушения при низких температурах может составлять всего 10...20%.

Испытания на статический изгиб при комнатной температуре показали, что работа зарождения трещины для образцов с острым надрезом из сталей К60 и К65 приблизительно одинакова



**Рисунок 3 – Температурная зависимость доли вязкой составляющей в изломе образцов KCV и KCT: а – К56; б – К65**

и выше, чем менее прочных сталей К52 и К56. Значения работы распространения трещины в образцах сталей К60 и К65 также выше. Как и при испытаниях на ударную вязкость в области полностью вязкого разрушения доля работы распространения трещины в общей энергии разрушения составляет 60...70%.

Таким образом, при существенно более высоких прочностных показателях, чем у сталей К52 и К56, стали К60 и К65 характеризуются высокими значениями работы зарождения и распространения трещины.

***О физической природе влияния структурного состояния на хладостойкость трубных сталей разных классов прочности.***

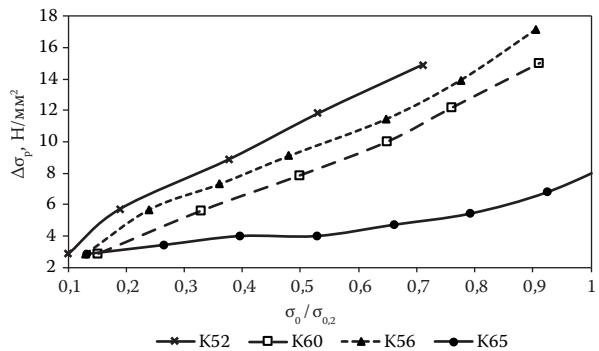
Известно, что структурное состояние металла определяет степень локализации пластической деформации и уровень локальных «пиков» напряжений под нагрузкой, что оказывает влияние на склонность материала к хрупкому разрушению. Для понимания причины разной хладостойкости трубных сталей важно оценить уровень локальных микронапряжений.

Методом, чувствительным к уровню локальных микронапряжений, является релаксационный эффект  $\Delta\sigma_p$ , величина которого характеризует уровень локальных микронапряжений, возникающих при нагружении металла.

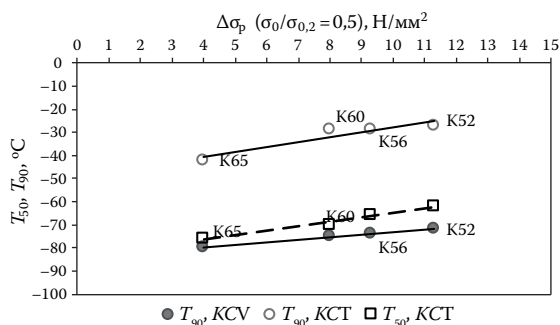
С повышением приложенной нагрузки величина релаксационного эффекта возрастает для всех исследованных сталей, что является следствием повышения уровня локальных внутренних напряжений при более высоких приложенных нагрузках (рисунок 4).

По-видимому, более высокие значения релаксационного эффекта в сталях К52, К56, К60 связаны с повышенным уровнем локальных микронапряжений, обусловленных неоднородным слоистым типом структуры.

Можно полагать, что несмотря на близкие значения ударной вязкости в вязкой области и более высокий уровень прочности по сравнению со сталями К52, К56 и К60, высокое сопротивление хрупкому разрушению (хладостойкость) стали К65 обусловлено пониженным уровнем локальных внутренних напряжений, возникающих в ходе нагружения, благодаря более однородной и мелкозернистой структуре.



**Рисунок 4 – Зависимость релаксационного эффекта  $\Delta\sigma_p$  от уровня приложенного напряжения для трубных сталей различных классов прочности**



**Рисунок 5 – Взаимосвязь между температурой, соответствующей 50 и 90% вязкой составляющей в изломе ( $T_{50}$  и  $T_{90}$ ), и величиной релаксационного эффекта  $\Delta\sigma_p$  при напряжении, равном  $0,5\sigma_{0,2}$ , при испытании образцов с надрезом (KCV), образцов с надрезом и заранее нанесенной трещиной (KCT)**

яние  $T_{50}$  и  $T_{90}$  при испытаниях образцов с острым надрезом и заранее созданной трещиной высоковязких трубных сталей и величиной релаксационного эффекта  $\Delta\sigma_p$ , измеренного при одинаковой доле напряжения от предела текучести: чем меньше величина  $\Delta\sigma_p$ , тем ниже  $T_{50}$  и  $T_{90}$ .

Из полученных экспериментальных результатов можно сделать важный вывод о том, что несмотря на близкие и весьма высокие значения работы зарождения и распространения трещины в области температур полностью вязкого разрушения (выше  $-20^\circ\text{C}$ ), испытания при более низких температурах (ниже  $-20^\circ\text{C}$ ) нарушают этот баланс вследствие разных температурных зависимостей работы зарождения и распространения трещины в исследованных сталях.

Таким образом, высокие значения работы распространения трещины, выявляемые при комнатной температуре, не гарантируют столь же высокие значения при пониженных температурах испытаний, поскольку температурные зависимости работы зарождения и распространения трещины, хотя и контролируются одинаковым по своей физической природе процессом, в основе которого лежит температурная зависимость предела текучести, но развиваются в разных объемах металла. В первом случае это макропластическая деформация, а во втором – локальная деформация перед вершиной трещины. Об этом, в частности, свидетельствует разная величина стрелы пластического прогиба и связанная с ней величина зоны пластической деформации перед концентратором напряжений, ее величина при испытании образцов с надрезом почти в 1,5 раза больше, чем при испытании образцов с трещиной. В последнем случае роль локализации микропластической деформации и возникновения «пиков» внутренних напряжений может быть существенно больше.

На рисунке 5 представлена взаимосвязь между температурой вязко-хрупкого перехода, соответствующей 50 и 90% вязкой составляющей в изломе ( $T_{50}$  и  $T_{90}$ ) при испытании образцов с надрезом (KCV), с надрезом и заранее наведенной трещиной (KCT), и величиной релаксационного эффекта  $\Delta\sigma_p$ .

Таким образом, установлена связь между критической температурой перехода в хрупкое состо-

**Таблица 3 – Изменение механических свойств сталей после деформационного старения**

Класс прочности	$\sigma_B$		$\sigma_{0,2}$		$\sigma_{0,2}/\sigma_B$		$\delta$	
	И.с.	Д.с.	И.с.	Д.с.	И.с.	Д.с.	И.с.	Д.с.
	Н/мм <sup>2</sup>				–		%	
<b>K56</b>	614	624	531	534	0,86	0,86	22	19
<b>K65</b>	722	732	619	703	0,86	0,96	21	16

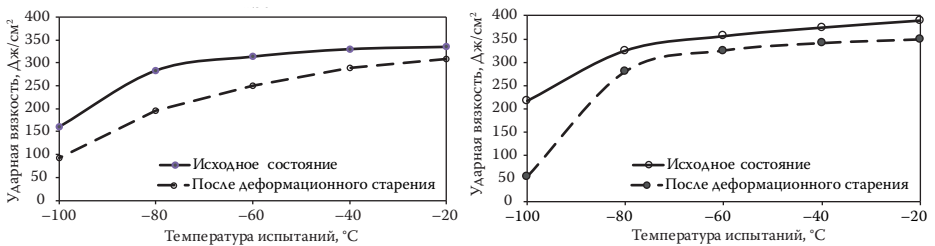
В главе 4 приведены результаты исследования влияния деформационного старения на механические свойства, параметры сопротивления разрушению (температурную зависимость ударной вязкости, хладостойкость (температуру вязко-хрупкого перехода) и трещиностойкость). Для исследования выбраны две стали с феррито-перлитным (K56) и бейнитным (K65) типами структуры.

Определен комплекс свойств трубных сталей в состоянии поставки (исходное состояние) и после деформационного старения, таблица 3.

Из полученных данных следует, что деформационное старение приводит к повышению предела текучести. Особенно это выражено в стали K65 с бейнитной структурой, где отмечается резкий рост значения отношения  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ , характеризующего способность материала к деформационному упрочнению. При этом в стали K56 величина данного параметра остается на прежнем уровне.

Относительное удлинение также изменяется неодинаково: резкое снижение этого параметра наблюдается в стали K65 – на 24%, что подтверждает более высокую склонность сталей бейнитного типа к деформационному старению; в сталях с феррито-перлитной структурой разница между значениями относительного удлинения в состаренном и исходном состояниях существенно ниже, и в листовом прокате класса прочности K56 составляет 14%.

На рисунке 6 приведены температурные зависимости ударной вязкости образцов KCV и KCT в двух состояниях.



**а**

**б**

**Рисунок 6 – Влияние деформационного старения на температурную зависимость ударной вязкости трубных сталей: а – K56; б – K65**

Деформационное старение приводит к снижению общего уровня ударной вязкости в обеих сталях. В стали К65 склонность к деформационному старению в большей степени проявляется в области перехода в хрупкое состояние.

Сравнительная оценка температурной зависимости ударной вязкости на образцах КСV и КСТ сталей показала, что в стали феррито-перлитного класса в результате деформационного старения при всех температурах испытаний происходит уменьшение работы зарождения трещины. Деформационное старение практически не оказывает влияния на работу распространения трещины феррито-перлитной стали. Для стали со структурой бейнита деформационное старение снижает работу распространения трещины, а работу ее зарождения существенно снижает только в области температур перехода в хрупкое состояние ( $-80\text{ }^{\circ}\text{C} \div -100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Таким образом, деформационное старение приводит к снижению общей работы, затраченной на разрушение, повышению температуры вязко-хрупкого перехода в обеих сталях. Высокая склонность стали К65 к деформационному старению проявляется в резком охрупчивании в области низких температур, где разница между значениями ударной вязкости в исходном и состаренном состояниях составляет 75% (в стали К56 – 33%) при температуре испытаний  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При этом работа зарождения трещины стремится к нулю.

*Исследование влияния деформационного старения на параметры трещиностойкости* показало, что в обеих сталях после деформационного старения происходит уменьшение общей работы разрушения и ее составляющих. При этом уменьшение работы зарождения и распространения трещины в результате деформационного старения в стали с бейнитной структурой существенно больше, чем в стали с феррито-перлитной структурой.

Таким образом, и при статических испытаниях деформационное старение стали со структурой бейнита в значительно большей степени снижает сопротивление зарождению и распространению трещины, чем стали с феррито-перлитной структурой.

Отличие влияния деформационного старения на свойства сталей с разным структурным состоянием проиллюстрировано на рисунке 7.

В стали К56 с феррито-перлитной структурой после деформационного старения происходит увеличение как разрушающего напряжения, так и предела общей текучести, в результате этого отношение  $\sigma_{\text{ор}}/\sigma_{\text{р}}$  изменяется незначительно. В стали К65 со структурой бейнита после деформационного старения происходит снижение разрушающего напряжения при одновременном возрастании предела текучести. При этом стадия деформационного упрочнения стали К65 вырождается (отношение  $\sigma_{\text{ор}}/\sigma_{\text{р}}$  стремится к 1), что фактически приводит к снижению надежности материала.

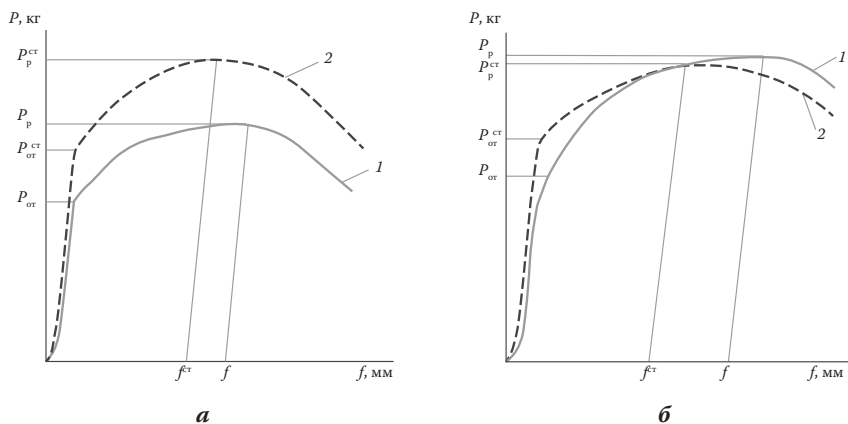


Рисунок 7 – Вид диаграммы «нагрузка – прогиб» до (1) и после (2) деформационного старения при испытаниях на статический изгиб в стали К56 (а) и К65 (б)

**Исследование влияния деформационного старения на структурное состояние сталей с феррито-перлитной и бейнитной структурой.**

Изучение температурной зависимости внутреннего трения показало, что для обеих сталей наблюдается два пика: пик Снука, отражающий концентрацию свободных атомов внедрения (40 °С), и деформационный пик Кестера (200–250 °С). После деформации максимумы Снука и Кестера в сталях возрастают с разной интенсивностью. Возрастание пика Снука связано с увеличением количества свободных атомов внедрения в результате отрыва дислокаций от «атмосфер». Рост пика Кестера свидетельствует об увеличении количества свежих дислокаций в результате деформационного воздействия. В стали с бейнитной структурой с более высокой плотностью дислокаций высота деформационного максимума увеличивается более, чем в два раза.

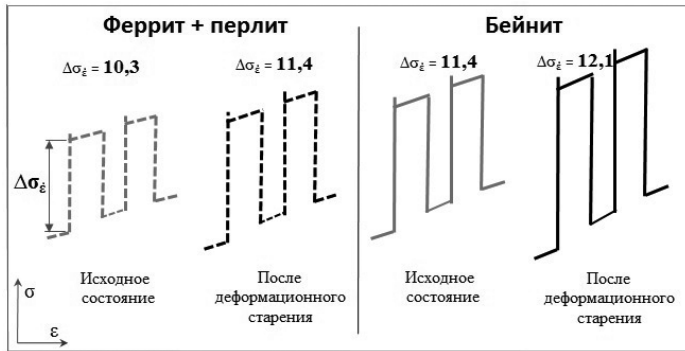
После нагрева на кривой температурной зависимости внутреннего трения оба пика исчезают, что является следствием взаимодействия атомов внедрения с дислокациями, возникающими при деформации, что приводит к снижению их подвижности.

Как отмечалось выше, одним из наиболее чувствительных методов оценки уровня локальных микронапряжений, возникающих при нагружении, является величина релаксационного эффекта  $\Delta\sigma_p$ . Установлено, что величина релаксационного эффекта увеличивается в результате деформационного старения в наибольшей степени для стали К65, имеющей структуру бейнита.

Более высокие значения релаксационного эффекта в стали, подвергнутой деформационному старению, свидетельствуют о возникновении в металле высших локальных микронапряжений при нагружении.



Испытания с переменной скоростью деформации показали, что увеличение скорости в 10 раз приводит к резкому повышению сопротивления деформации обоих типов стали (рисунок 8).



**Рисунок 8 – Схема изменения прироста сопротивления деформации при повышении скорости нагружения стали с различной структурой в исходном состоянии и после деформационного старения**

При этом величина скачка напряжения  $\Delta\sigma_{\varepsilon}$  практически не зависит от степени пластической деформации, средняя его величина для бейнитной стали в исходном состоянии больше, чем для ферритно-перлитной стали примерно на 10%. После скачкообразного увеличения скорости деформации на графике зависимости напряжение–деформация для обоих типов сталей после деформационного старения наблюдается увеличение  $\Delta\sigma_{\varepsilon}$ , и появляется зуб текучести.

Для анализа результатов испытаний с переменной скоростью деформирования привлекают известные эмпирические выражения, преобразование которых позволяет получить связь между активационным объемом, характеризующим подвижность дислокаций в условиях термоактивации  $V^*$  и  $\Delta\sigma_{\varepsilon}$ , полагая при этом, что деформация осуществляется дислокациями одного типа, и в процессе изменения скорости нагружения ( $\dot{\varepsilon}_2$  и  $\dot{\varepsilon}_1$ ) плотность подвижных дислокаций остается постоянной:

$$V^* \approx \ln(\dot{\varepsilon}_2/\dot{\varepsilon}_1) / \Delta\sigma_{\varepsilon}. \quad (1)$$

Из (1) следует, что величина  $V^*$  обратно пропорциональна  $\Delta\sigma_{\varepsilon}$  и, следовательно, по его изменению можно судить о механизме термически активированного скольжения дислокаций.

Известно, что примеси внедрения способствуют росту  $\Delta\sigma_{\varepsilon}$ , что является следствием увеличения полей тетрагональных искажений кристаллической решетки вокруг атомов примесей. Можно полагать, что повышенное значение  $\Delta\sigma_{\varepsilon}$  для бейнитной стали связано с меньшим активационным объемом  $V^*$  и пониженной скоростью движения дислокаций вследствие большей концентрации примесных атомов в твердом растворе. Деформационное старение



уменьшает концентрацию свободных атомов внедрения в решетке, но блокирует дислокации благодаря образованию на них «атмосфер».

Можно предположить, что рост  $\Delta\sigma_s$  и уменьшение активационного объема после деформационного старения бейнитной и феррито-перлитной стали являются следствием конкуренции, как минимум, двух процессов. Снижение подвижности дислокаций в результате увеличения потенциальных барьеров для их движения в результате большей плотности препятствий бывших точек закрепления, освободившихся в результате отрыва от них движущихся в процессе деформации дислокаций и уменьшения концентрации примесных атомов внедрения в твердом растворе, первый из которых превалирует над вторым. Нельзя исключить также роль динамического деформационного старения.

Таким образом, деформационное старение не только повышает предел текучести в результате закрепления дислокаций атмосферами примесных атомов, но и затрудняет процесс скольжения вследствие уменьшения активационного объема и снижения скорости дислокаций, негативно влияя на сопротивление вязкому и хрупкому разрушению.

*Исследование тонкой структуры* выявило, что основной структурной составляющей металла К65 является бейнитный феррит или верхний безуглеродистый бейнит – структура с выраженной блочностью и умеренной плотностью дислокаций, рисунок 9, а. Объемная доля зерен равноосного феррита невысока (~ 5–10%), рисунок 9, б. Небольшую долю (3–5%) занимают «островки» М/А-составляющей, содержащие высокоуглеродистый высокодислокационный, частично двойникованный мартенсит (рисунок 9, в).

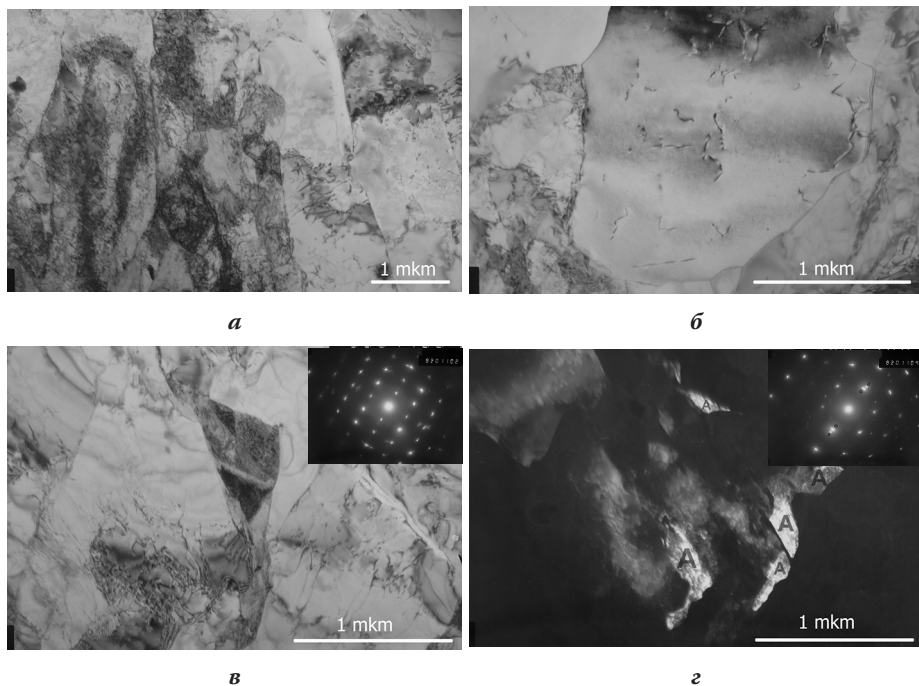
В структуре безуглеродистого бейнита наблюдаются фрагменты аустенита (рисунок 9, г).

При исследовании тонкой структуры после деформационного старения каких-либо видимых значимых отличий в изменении плотности дислокаций и выделения наночастиц не обнаружено, за исключением полного отсутствия М/А «островков» и уменьшения количества остаточного аустенита.

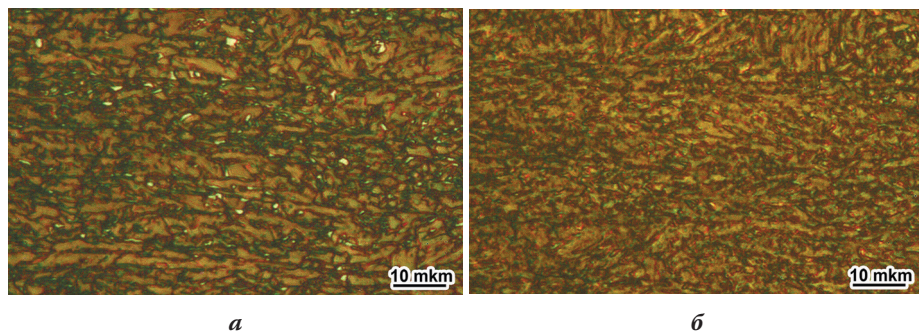
Для подтверждения факта исчезновения М/А-составляющей после деформационного старения стали с бейнитной структурой дополнительно провели оценку микроструктуры *методом оптической микроскопии*. На изображениях микроструктуры М/А-составляющая окрашивается белым цветом (рисунок 10).

Как видно из рисунка, в структуре стали К65 присутствуют участки М/А. Объемная доля этих «островков» в структуре невысока и составляет приблизительно 2–5%. Деформационное старение приводит к их исчезновению.

*Рентгеноструктурный анализ* показал наличие некоторого количества остаточного аустенита, определенного прямыми методами световой и электронной микроскопии. В исходном состоянии выявлен аустенит в количестве 6%, доля ко-



**Рисунок 9 – Структура стали K65: а – бейнитный феррит (верхний бейнит), светлое поле; б – полигональный феррит, светлое поле; в – М/А-составляющая, светлое поле; з – аустенитные фрагменты, темное поле в рефлексе аустенита**



**Рисунок 10 – Микроструктура металла листового проката K65 в исходном состоянии (а) и после деформационного старения (б)**

того с увеличением степени деформации уменьшается до 2% (деформация 2%), и при степени деформации 3% аустенит в структуре не обнаруживается.

Таким образом, рентгеноструктурный анализ подтвердил данные металлографического исследования изменения микроструктуры стали после деформа-

ционного старения. Увеличение степени деформации до 3% с последующим нагревом приводит к уменьшению доли аустенитной составляющей вследствие фазового превращения.

Предложен механизм трансформации структуры низкоуглеродистого бейнита в процессе деформационного старения, объясняющий аномальное изменение свойств стали К65. В исходном состоянии в структуре имеется аустенит, количество которого при деформации уменьшается.

С помощью методов просвечивающей электронной и оптической микроскопии обнаружено, что в результате деформационного старения в стали К65 островки М/А (мартенсит/аустенит), отчетливо наблюдаемые в исходном состоянии, исчезают.

Известно, что вкрапления островков М/А в структуре стали определенного размера и в небольших количествах (2–5%) способствуют сохранению деформационной способности за счет разницы в прочности мелкодисперсных участков М/А и основной структуры и являются фактором упрочнения матрицы.

Таким образом, опираясь на данные рентгеноструктурного и электронно-микроскопического анализов, можно заключить, что в ходе деформации стали К65 реализуется процесс превращения остаточного аустенита в мартенсит деформации (локальный TRIP-эффект). С увеличением степени деформации происходит превращение оставшихся участков остаточного аустенита, в том числе содержащегося в островках М/А-составляющей, до полного его исчезновения при степени деформации 3%. Дальнейший нагрев приводит к распаду мартенситной составляющей с выделением карбидов, что снижает сопротивление металла пластической деформации. Отсутствие участков остаточного аустенита в структуре бейнитной стали, наблюдаемое после деформации 3%, приводит к снижению сопротивления пластической деформации с одновременным снижением прочности материала в результате исчезновения М/А-составляющей, рисунок 11.



**Рисунок 11 – Схема изменения структурного состояния трубной стали в процессе деформационного старения**

Изменение вида диаграммы растяжения после деформационного старения бейнитной стали является следствием двух процессов, одновременно протекающих в структуре на различных масштабных уровнях и имеющих противоположное влияние на сопротивление деформации. Упрочнение – повышение предела текучести происходит вследствие закрепления дислокаций атомами внедрения, а разупрочнение вызвано исчезновением островков М/А-составляющей, упрочняющей металл в исходном состоянии, в результате локального TRIP-эффекта при предварительной деформации и распада мартенсита при последующем нагреве.

В главе 5 представлены результаты исследования низколегированной стали, обеспечивающей высокую деформационную способность и предназначенной для труб класса прочности К60, которые используются в районах активных тектонических разломов (АТР) и применяются при изготовлении гнутых отводов.

В формировании комплекса свойств, в том числе высокой деформационной способности, определяющим фактором является структурное состояние, формирующееся на основе подбора определенного химического состава и технологических параметров при производстве труб.

В работе проведено исследование влияния степени пластической деформации при изготовлении гнутых отводов и последующего их старения на структуру и свойства предварительно нагретых труб (имитация нанесения покрытия при температуре 200 °С).

Материал исследования имел типичный для современной стали состав с низким содержанием углерода ( $\approx 0,06\%$ ), добавками Ni-Cu, микролегированием Ti, Nb и феррито-бейнито-мартенситную структуру с включениями остаточного аустенита и островков М/А.

На рисунке 12 представлены механические свойства труб АТР и их изменение в результате пластической деформации с разной степенью и последующего старения.

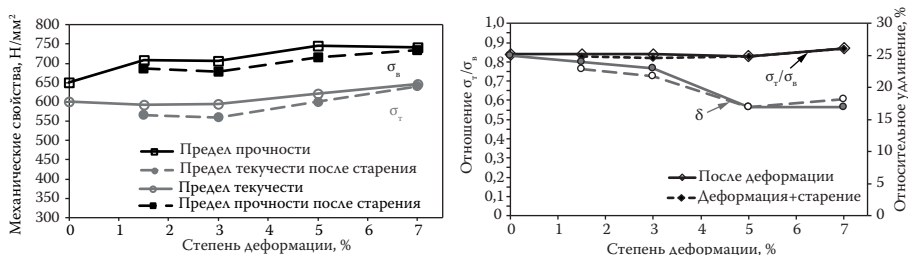


Рисунок 12 – Изменение показателей механических свойств труб АТР после деформации с различной степенью и последующего старения

На основе проведенного исследования определена критическая степень деформации, при которой наблюдается исчерпание деформационной способности исследованного металла – отношение  $\sigma_T/\sigma_B$  стремится к 1. Исследование деформационного старения сталей для труб АТР показало, что они сохраняют деформационную способность вплоть до степени деформации 5% (бейнитная сталь – 2%), благодаря многокомпонентной контрастной структуре, характеризующейся неоднородным распределением углерода (большая часть углерода связана в островках МА, мартенсите, цементите, наноразмерных карбидах (Nb,V)C), легирующих элементов, различной прочностью структурных составляющих, большим количеством свободных дислокаций, не закрепленных атомами внедрения.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Проведено комплексное исследование механизма влияния деформационного старения на механические свойства, температурные зависимости работы зарождения и распространения трещины, хладостойкость и структурное состояние трубных сталей различных классов прочности (K52–K65) и типов структуры. Установлен аномальный эффект деформационного старения стали со структурой низкоуглеродистого бейнита, обусловленный вырождением стадии деформационного упрочнения ( $\sigma_{0,2}/\sigma_B \rightarrow 1$ ) и снижающий эксплуатационную надежность труб.

2. При исследовании температурной зависимости ударной вязкости образцов с острым надрезом установлено, что металл K65 характеризуется более высоким уровнем энергоемкости разрушения по сравнению с металлом для труб K52, K56, K60. Основную долю в энергии разрушения исследуемых трубных сталей составляет работа зарождения трещины. Металл K65 отличается более высокими значениями работы распространения трещины, особенно при пониженных температурах испытаний.

Установленная связь между переходной температурой хрупкости низколегированных трубных сталей и величиной релаксационного эффекта  $\Delta\sigma_p$  выявила, что повышенная хладостойкость стали K65 по сравнению с менее прочными сталями K52–K60 является следствием меньшего уровня локальных микронапряжений, возникающих при нагружении, что обусловлено более однородной и мелкодисперсной структурой.

3. Показано, что в результате деформационного старения повышается отношение предела текучести к временному сопротивлению, снижаются показатели пластичности, изменяется вид кривой «напряжение-деформация». Одновременно происходит снижение уровня ударной вязкости при всех температурах испытания и трещиностойкости. В стали K65 снижение значений ударной вяз-



кости наиболее выражено при испытании образцов *KCV* в области низких (переходных) температур. В стали *K56* снижение значений ударной вязкости в этой области происходит более плавно. Установлено, что деформационное старение бейнитной стали снижает трещиностойкость (работу зарождения, работу распространения трещины, ее критическое раскрытие) при статических испытаниях на изгиб в значительно большей степени, чем феррито-перлитной стали.

4. Показано, что в результате деформационного старения происходит увеличение релаксационного эффекта, свидетельствующее о повышенном уровне локальных напряжений, возникающих при нагружении и деформации вследствие закрепления дислокаций атомами внедрения, концентрация которых возрастает в процессе предварительной деформации, о чем свидетельствует рост пика Снука при измерении внутреннего трения. Наиболее сильное влияние деформационного старения на релаксационный эффект обнаружено в стали со структурой бейнитного типа.

5. Показано, что в ходе деформации стали *K65* реализуется процесс превращения остаточного аустенита в мартенсит деформации (локальный TRIP-эффект), что подтверждается данными рентгеноструктурного и электронно-микроскопического анализов. С увеличением степени деформации происходит превращение оставшихся участков остаточного аустенита, содержащегося в островках *M/A*, до полного его исчезновения при степени деформации 3%. Нагрев при температуре 200 °С приводит к распаду мартенситной составляющей с выделением карбидов, что снижает сопротивление металла пластической деформации. Полное исчезновение участков остаточного аустенита в структуре исследованной бейнитной стали, наблюдаемое при степени деформации 3%, приводит к снижению сопротивления пластической деформации с одновременным снижением прочности материала в результате исчезновения *M/A*-составляющей.

6. Резкое увеличение скорости деформации повышает сопротивление деформации, прирост которого для бейнитной стали выше, чем для феррито-перлитной. Впервые установлено, что деформационное старение стали с бейнитной структурой увеличивает прирост предела текучести при скачкообразном повышении скорости деформации, что является следствием повышения сопротивления термоактивируемого скольжения в результате увеличения полей искажений кристаллической решетки вокруг атомов внедрения, концентрация которых в менее равновесной бейнитной структуре, вероятно, выше, чем в феррито-перлитной.

7. Сформулирован механизм деформационного старения низколегированной стали с бейнитной структурой, при котором увеличение сопротивления деформации и упрочнение, вызванное взаимодействием атомов внедрения с дислокациями, сопровождается одновременным разупрочнением в результате фазового превращения при деформации (локальный TRIP-эффект), приводящий к исчезновению в структуре стали участков упрочняющей *M/A*-составляющей.

8. Установлена предельно допустимая величина холодной деформации металла труб (5%), гарантирующая величину равномерного удлинения металла отводов холодного гнущего для труб АТР магистральных газопроводов.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

*Статьи в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ:*

1. Мишетьян, А.Р. Деформационное старение и свойства низколегированных трубных сталей / **А.Р. Мишетьян**, Г.А. Филиппов, Ю.Д. Морозов, О.Н. Чевская // Проблемы черной металлургии и материаловедения. — 2011. — № 2. — С. 12–19. (1,00 п.л. / 0,41 п.л.).

2. 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. — 2011. — №8. — С. 40–43. (0,50 п.л. / 0,33 п.л.).

3. Филиппов, Г.А. Влияние длительной эксплуатации на температурную зависимость внутреннего трения и склонность к деформационному старению низколегированных сталей / Г.А. Филиппов, В.Н. Зикеев, И.П. Шабалов, О.В. Ливанова, **А.Р. Мишетьян** // Проблемы черной металлургии и материаловедения. — 2017. — № 1. — С. 49–55. (0,88 п.л. / 0,24 п.л.).

4. Филиппов, Г.А. Комплексная оценка надежности и долговечности магистральных трубопроводов / Г.А. Филиппов, И.П. Шабалов, О.В. Ливанова, **А.Р. Мишетьян** // Бюл. НТИЭИ «Черная металлургия». — 2017. — № 2. — С. 63–70. (1,00 п.л. / 0,26 п.л.).

5. 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.).

6. 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.).

7. 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.).

8. Мишетьян, А.Р. Влияние условий трубного передела и структурного состояния на эксплуатационную надежность высокопрочных трубных сталей / **А.Р. Мишетьян**, И.П. Шабалов, О.Н. Чевская, Г.А. Филиппов // Бюл. НТИЭИ «Черная металлургия». — 2021. — № 4. — С. 455–463. (1,13 п.л. / 0,47 п.л.).

9. Зикеев, В.Н. Влияние структурного состояния конструкционных высокопрочных сталей на сопротивление разрушению / В.Н. Зикеев, О.Н. Чевская, **А.Р. Мишетьян**, В.Г. Филиппов, А.Б. Коростелев // Металлург. — 2021. — № 4. — С. 15–25. (1,38 п.л. / 0,39 п.л.).

10. Мишетьян, А.Р. Исследование влияния деформационного старения на сопротивление разрушению трубных сталей в зависимости от структурного состояния / **А.Р. Мишетьян** // Сб. тез. докл. III Конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий» (14–15 декабря 2011 г.). – М.: ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», 2011. – С.63.

11. Мишетьян, А.Р. Исследование склонности к деформационному старению низколегированных трубных сталей различной категории прочности / **А.Р. Мишетьян**, Г.А. Филиппов, Ю.Д. Морозов, О.Н. Чевская // 51-я Международная конференция «Актуальные проблемы прочности»: сб. матер. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2011. – Ч.1. – С. 110.

12. Мишетьян, А.Р. Влияние структурного состояния на сопротивление зарождению и распространению трещины низколегированных сталей / **А.Р. Мишетьян**, Г.А. Филиппов, Ю.Д. Морозов, О.Н. Чевская // Сб. тр. VI Евразийской науч.-практич. конф. «Прочность неоднородных структур – ПРОСТ 2012». – М.: НИТУ «МИСиС», 2012 – С. 223.

13. Мишетьян, А.Р. Исследование склонности к деформационному старению и хрупкому разрушению трубных сталей в зависимости от структурного состояния / **А.Р. Мишетьян**, Г.А. Филиппов, Ю.Д. Морозов, О.Н. Чевская // 52-я Междунар. конф. «Актуальные проблемы прочности»: сб. тез. докл. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2012. – Ч.1. – С. 140.

14. Мишетьян, А.Р. Исследование закономерностей деформационного старения низколегированных сталей с феррито-бейнитной структурой / **А.Р. Мишетьян**, Ю.Д. Морозов, Г.А. Филиппов, О.Н. Чевская // 53-я Междунар. конф. «Актуальные проблемы прочности»: сб. матер. – Витебск: УО «ВГТУ», 2012. – Ч. 1. – С. 171–173.

15. Мишетьян, А.Р. Особенности деформационного старения низкоуглеродистых микролегированных сталей в зависимости от структурного состояния / **А.Р. Мишетьян**, Ю.Д. Морозов, О.Н. Чевская, Г.А. Филиппов // Сб. тез. VII Международной конференции «Фазовые превращения и прочность кристаллов». Черноголовка, 2012. – С. 46.

16. Мишетьян, А.Р. Влияние структурного состояния на сопротивление зарождению и распространению трещины низколегированных сталей / **А.Р. Мишетьян** // Сб. тез. докл. IV Конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий». – М.: ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», 2012. – С. 58.

17. Мишетьян, А.Р. Исследование явления деформационного старения в трубных сталях различной категории прочности / **А.Р. Мишетьян**, Г.А. Филиппов, Ю.Д. Морозов, О.Н. Чевская // Сб. тез. докл. V Конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий». – М.: ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», 2014. – С. 74.

18. Мишетьян, А.Р. Исследование склонности к хрупкому разрушению трубных сталей в зависимости от структурного состояния / **А.Р. Мишетьян**, Г.А. Филиппов, О.Н. Чевская // Сб. тез. докл. VI Конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий». – М.: ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», 2015. – С. 77.



19. Мишетьян, А.Р. Деформационное старение и эксплуатационная надежность низколегированных трубных сталей / **А.Р. Мишетьян**, Г.А. Филиппов, О.Н. Чевская // VI Междунар. конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов»: сб. матер. – М.: ИМЕТ РАН, 2015. – С. 162.

20. Мишетьян, А.Р. Влияние структурного состояния на хладостойкость и стойкость к деформационному старению низколегированных трубных сталей / **А.Р. Мишетьян**, Г.А. Филиппов, И.П. Шабалов, О.Н. Чевская // XXII Петербургские чтения по проблемам прочности: сб. матер. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – С. 272–274.

21. Мишетьян, А.Р. Влияние структурной неоднородности на сопротивление зарождению и распространению трещины трубных сталей разных категорий прочности / **А.Р. Мишетьян**, И.П. Шабалов, Г.А. Филиппов, О.Н. Чевская // Сб. тр.в VIII Евразийской науч.-практич. конф. «Прочность неоднородных структур – ПРОСТ 2016». – М.: НИТУ «МИСиС», 2016. – С. 220.

22. Шабалов, И.П. Исследование природы процесса деформационного старения в низкоуглеродистых микролегированных сталях с бейнитной структурой / И.П. Шабалов, **А.Р. Мишетьян**, Г.А. Филиппов, О.Н. Чевская // Сб. тез. LVII междунар. конф. «Актуальные проблемы прочности». – Севастополь: СевГУ, 2016. – С. 193.

23. Мишетьян, А.Р. О физической природе влияния структурного состояния на хладноломкость трубных сталей разного класса прочности / **А.Р. Мишетьян**, И.П. Шабалов, О.Н. Чевская, Г.А. Филиппов // Сб. тез. IX Междунар. конф. «Фазовые превращения и прочность кристаллов». – Черногоровка, 2016. – С. 12.

24. Мишетьян, А.Р. Исследование механизма деформационного старения трубной стали класса прочности К65 / **А.Р. Мишетьян**, В.Я. Великоднев, И.П. Шабалов, Г.А. Филиппов, О.Н. Чевская // LVIII Междунар. конф. «Актуальные проблемы прочности»: сб. тез. – Пермь, 2017. – С. 75.

25. Мишетьян, А.Р. Влияние структурной неоднородности на сопротивление микродеформации и хладостойкость низколегированных трубных сталей / **А.Р. Мишетьян**, В.Я. Великоднев, И.П. Шабалов, Г.А. Филиппов, О.Н. Чевская // Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии»: матер. симпозиума. – Витебск: УО «ВГТУ», 2017. – Ч.2. – С. 206–208.

26. Шабалов, И.П. Хладостойкость и склонность к деформационному старению сталей для газопроводных труб в зависимости от структурного состояния / И.П. Шабалов, **А.Р. Мишетьян**, Г.А. Филиппов // В кн. «Перспективные материалы и технологии». – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2017. – Т.1. – С. 430–451. (1,38 п.л. / 0,51 п.л.).

27. Мишетьян, А.Р. Влияние структурного состояния современных высокопрочных трубных сталей на эксплуатационную надежность магистральных трубопроводов / **А.Р. Мишетьян**, О.Н. Чевская, Г.А. Филиппов, И.П. Шабалов // Междунар. конф. «Микролегированные трубные стали для нефтегазовой отрасли»: сб. докл. – М.: Металлургиздат, 2018. – С. 66–76. (1,38 п.л. / 0,48 п.л.).

28. Мишетьян, А.Р. Особенности влияния структурного состояния на прочность и сопротивление разрушению стали / **А.Р. Мишетьян**, И.П. Шабалов, А.Б. Коростелев, В.Г. Филиппов, О.Н. Чевская // XXIII Петербургские чтения по проблемам прочности: сб. матер. – СПб.: Изд-во ВВМ, 2018. – С. 234–236.

29. Мишетьян, А.Р. Влияние неоднородности структуры на хладостойкость и склонность к деформационному старению трубных сталей / **А.Р. Мишетьян**, И.П. Шабалов, Г.А. Филиппов, О.Н. Чевская // Сб. тр. IX Евразийской науч.-практич. конф. «Прочность неоднородных структур – ПРОСТ 2018». – М.: ООО «Студио-Принт», 2018. – С. 194.

30. Мишетьян, А.Р. Механизм аномальной склонности к деформационному старению низколегированных сталей с бейнитной структурой / **А.Р. Мишетьян**, И.П. Шабалов, Г.А. Филиппов, О.Н. Чевская // 60-я Междунар. науч. конф. «Актуальные проблемы прочности»: матер. конф. – Витебск: УО «ВГТУ», 2018. – С. 421–423.

31. Мишетьян, А.Р. Деформационное старение низколегированной трубной стали с бейнитным типом структуры: механизм и влияние на комплекс свойств / **А.Р. Мишетьян**, И.П. Шабалов, Г.А. Филиппов, О.Н. Чевская // Сб. тез. докл. Междунар. конф. молодых ученых «Научное наследие Д.К. Чернова». – М.: ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», 2018. – С.52.

32. **Mishet'yan A.R.**, Shabalov I.P., Chevskaya O.N., Filippov G.A. Effect of structural state and temperature on crack generation and propagation resistance in pipe steels // Metallurgist. 2018. Vol. 61, No. 11–12. – P. 1084–1092.

33. Мишетьян, А.Р. Механизм деформационного старения низколегированных сталей с разным структурным состоянием и его влияние на свойства листового проката и труб / **А.Р. Мишетьян**, И.П. Шабалов, Г.А. Филиппов, О.Н. Чевская // Матер. междунар. науч. конф. «Актуальные проблемы прочности». – Молодечно: Типография «Победа», 2020. – С. 260.

34. Мишетьян, А.Р. Локальный трип-эффект в низколегированных сталях с разной структурой и его влияние на свойства листового проката и труб / **А.Р. Мишетьян**, И.П. Шабалов, Г.А. Филиппов, О.Н. Чевская // Сб. тез. XI Междунар. конф. «Фазовые превращения и прочность кристаллов». – Черноголовка, 2020. – С. 60.

35. Zikeev V.N., Chevskaya O.N., **Mishet'yan A.R.**, Filippov V.G., Korostelev A.V. Effect of high strength structural steel structural state on fracture resistance // Metallurgist. 2021. Vol. 65, No. 3–4. P. 375–388.

36. Чевская, О.Н. Трещиностойкость и хладостойкость высокопрочных конструкционных сталей в различном структурном состоянии / О.Н. Чевская, **А.Р. Мишетьян**, В.Г. Филиппов / В кн. «Перспективные материалы и технологии». Минск: Издательский центр БГУ, 2021. – С. 570–583. (0,88 п.л. / 0,47 п.л.).

37. **Mishet'yan A.R.**, Fillipov G. A., and Chevskaya O. N. Effect of Strain Aging on the Rate Dependence of the Strain Resistance and the Cold Resistance of Low-Carbon Steels with Ferritic–Pearlitic and Bainitic Structures // Russian Metallurgy (Metally). Vol. 2021, No. 10. P. 1284–1288.

---

Подписано в печать 21.01.2022. Формат 60×84 1/16  
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 11  
Отпечатано в ООО «Металлургиздат»  
105005, Москва, ул. Радио, д. 23/9, стр. 2