

На правах рукописи



Варнак Ольга Васильевна

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НА СКЛОННОСТЬ К  
ДЕФОРМАЦИОННОМУ СТАРЕНИЮ И ПРОЯВЛЕНИЮ  
ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА В НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ  
СТАЛЯХ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ**

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск

2019



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы.* Рост объемов потребления энергоресурсов обуславливает интенсивное развитие трубопроводного транспорта. Разработка месторождений в отдаленных регионах, таких как Ямал, Восточная Сибирь, Дальний Восток и на континентальном шельфе северных морей, включает в себя прокладку и эксплуатацию трубопроводов в экстремальных условиях окружающей среды: в районах вечной мерзлоты, зонах с сейсмической активностью и активных тектонических разломов, в акватории морей. В связи с этим возникает необходимость использования сварных и бесшовных труб, металл которых должен обладать высокой прочностью, а также вязкостью при отрицательных температурах, иметь повышенную пластичность, высокое сопротивление повторным нагрузкам, хорошую свариваемость и малую склонность к деформационному старению.

Деформационное старение, обусловленное взаимодействием находящихся в твердом растворе атомов углерода и азота с дефектами кристаллического строения, может получать развитие как в процессе изготовления труб, так и при их длительной эксплуатации. Если ранее для трубопроводов использовали в основном низкоуглеродистые стали с ферритно-перлитной структурой, то сейчас предпочтение отдается высокопрочным сталям с ферритно-бейнитной структурой. Закономерности развития деформационного старения низкоуглеродистых сталей с ферритно-перлитной структурой изучены сравнительно подробно. В меньшей степени исследовано поведение при деформационном старении высокопрочных сталей, содержащих в структуре бейнитную составляющую. Остается неясным, в какой мере на склонность к деформационному старению низкоуглеродистых сталей с такой структурой влияют объемная доля бейнита и его морфология, а также условия нагрева, режим горячей деформации и процессы отпуска.

Одним из факторов, который следует учитывать при производстве сварных труб из низкоуглеродистых сталей, является эффект Баушингера, заключающийся в уменьшении предела текучести при смене знака деформации. Этот эффект может возникать при таких технологических операциях как формовка и экспандирование. Он проявляется при правке

(распрямлении) вырезанных из труб сегментов, предназначенных для изготовления поперечных полнотолщинных плоских образцов для механических испытаний.

Для строительства морских подводных трубопроводов используют бесшовные трубы из низкоуглеродистых сталей, наиболее прогрессивным и скоростным методом применения которых является укладка с судна, оборудованного барабаном. В процессе намотки бесшовных труб на барабан, а также при их размотке в стенке трубы имеют место знакопеременные пластические деформации. В настоящее время отсутствуют обстоятельные исследования по влиянию структуры на эффект Баушингера при знакопеременных деформациях. Недостаточно полно изучены закономерности его проявления, когда знакопеременная деформация осуществляется после деформационного старения стали.

В соответствии с вышеизложенным актуальным является проведение комплексного исследования влияния структуры на склонность низкоуглеродистых трубных сталей к деформационному старению и проявлению эффекта Баушингера. Важно выяснить, как эти два фактора будут сказываться на механических свойствах низкоуглеродистых сталей.

Данная работа выполнена в рамках «Программы научно-технического сотрудничества ПАО «Трубная Металлургическая Компания» и ПАО «Газпром» на 2012 – 2015 гг. и 2015 – 2020 гг.»

**Целью работы** является установление влияния параметров микроструктуры и режимов термической обработки на изменение механических свойств низкоуглеродистых трубных сталей при деформационном старении и знакопеременной деформации для повышения эксплуатационных свойств.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

- установить основные закономерности изменения механических свойств низкоуглеродистых трубных сталей с ферритно-перлитной и ферритно-бейнитными структурами при деформационном старении;
- выявить влияние легирования низкоуглеродистых сталей и условий их обработки (аустенитизации и последующего охлаждения,

отпуска, горячей деформации и высокотемпературной термомеханической обработки – ВТМО) на склонность к деформационному старению;

- изучить закономерности проявления эффекта Баушингера в низкоуглеродистых сталях с различным типом структур;
- определить особенности проявления эффекта Баушингера в низкоуглеродистых сталях, подвергнутых деформационному старению с использованием знакопеременной деформации;
- разработать химический состав и режим термической обработки бесшовных труб, предназначенных для строительства морских трубопроводов с укладкой труб с барабана.

#### **Научная новизна работы:**

- установлено, что низкоуглеродистая сталь с ферритно-бейнитной структурой обладает большей склонностью к деформационному старению по сравнению с ферритно-перлитной, причем наиболее неблагоприятной является крупнозернистая структура, содержащая преимущественно речный бейнит, а присутствие в ферритно-бейнитной структуре грубых участков мартенситно-аустенитной (МА) составляющей отрицательно влияет на статическую трещиностойкость стали, подвергнутой деформационному старению;
- показано, что низкоуглеродистая трубная сталь с ферритно-бейнитной структурой обладает заметной склонностью к обратимой отпускной хрупкости, развитие которой ослабляет ВТМО, не оказывая влияния на охрупчивание, связанное с деформационным старением;
- установлена зависимость проявления эффекта Баушингера от типа структуры низкоуглеродистых трубных сталей, при этом сталь с ферритно-бейнитной структурой обладает большей склонностью к проявлению эффекта Баушингера, чем с ферритно-перлитной;
- показано, что в низкоуглеродистых сталях с ферритно-бейнитной структурой с увеличением объемной доли бейнита склонность к деформационному старению и проявлению эффекта Баушингера возрастает.

#### **Практическая значимость работы.**

Данные работы использованы при разработке методики механических испытаний №РосНИТИ 16-06-13 «Оценка склонности металла труб к деформационному старению в соответствии с DNV-OS-F101,

дополнительным требованием «Р» - «Трубы с повышенной деформационной способностью». Данная методика устанавливает метод определения склонности металла труб к деформационному старению в соответствии с требованиями DNV-OS-F10-2013.

На основании результатов исследования разработан химический состав стали и режим термической обработки бесшовных горячедеформированных труб группы прочности X65, предназначенных для обустройства морских трубопроводов с укладкой труб с барабана, в соответствии с требованиями международного стандарта DNV- OS- F101- 2013.

#### **Методология и методы исследования.**

Методологической основой исследования послужили научные труды ведущих отечественных и зарубежных ученых в области металловедения, термической и термомеханической обработки сплавов, основные положения теории структурных и фазовых превращений. Для решения задач работы были использованы просвечивающая и растровая электронная микроскопия, оптическая микроскопия, дифференциальный термический анализ, рентгеноструктурный анализ, а также методы определения механических свойств сталей.

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

- результаты исследования влияния деформационного старения на механические свойства низкоуглеродистых трубных сталей с ферритно-перлитной и ферритно-бейнитными структурами при статическом и динамическом нагружениях;
- зависимость склонности к деформационному старению низкоуглеродистых трубных сталей с ферритно-бейнитными структурами от объемной доли бейнитной составляющей, режимов горячей деформации и ВТМО;
- закономерности влияния ферритно-перлитной и ферритно-бейнитных структур на склонность низкоуглеродистых сталей к проявлению эффекта Баушингера;
- зависимость склонности к проявлению эффекта Баушингера низкоуглеродистых сталей от объемной доли бейнитной составляющей;

- влияние деформационного старения после знакопеременной деформации на проявление эффекта Баушингера.

**Достоверность полученных в работе экспериментальных результатов** обеспечена использованием современного оборудования и программного обеспечения. Она определяется применением взаимодополняющих методов исследования структуры, а также использованием результатов механических испытаний, проведенных в соответствии с ГОСТами, отраслевыми и международными стандартами. Достоверность проведенных исследований подтверждают положительные результаты их внедрения в производство бесшовных труб, предназначенных для строительства морских трубопроводов с укладкой с барабана.

#### **Апробация работы.**

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на Международной научно-технической Уральской школе-семинаре металловедов – молодых ученых (г. Екатеринбург, 2014, 2015), Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» (г. Москва, 2014), Международных научно-практических конференциях «ТРУБЫ-2014», «ТРУБЫ-2016», «ТРУБЫ-2018» (г. Челябинск), Конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий» (г. Москва, 2015), XIX Международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов» (г. Самара, 2015), VIII Научной конференции аспирантов и докторантов ЮУрГУ (г. Челябинск, 2016).

#### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, из них 8 – в изданиях, рекомендованных ВАК.

#### **Структура и объем диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов по работе, списка использованных источников. Работа изложена на 226 страницах машинописного текста, содержит 101 рисунок, 44 таблицы, список использованных источников из 140 наименований и 2 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна полученных результатов и практическая ценность работы.

В **первой главе** представлен аналитический обзор литературных данных по исследуемой проблеме. Приведены общие сведения о составе сталей и технологии изготовления труб. Рассмотрены основные закономерности проявления деформационного старения и эффекта Баушингера в металлических материалах и низкоуглеродистых сталях.

Во **второй главе** описаны материалы и методы их исследования. Для проведения экспериментов были выбраны стали 06Г2ФБ, 07Г2МФБ (1) и 06Г2МБ, промышленной выплавки, используемые для изготовления сварных труб (таблица 1). Часть экспериментов проводилась на сталях 07Г2МФБ (2), 08Г2ФБ, 10Г2ФБ и 14ГМБ, применяемых для изготовления бесшовных труб (таблица 2).

Для получения различных структур варьировали режимы нагрева и охлаждения. Заготовки подвергали нагреву на 950, 1000, 1100 и 1150 °С. После аустенитизации следовало охлаждение, средняя скорость которого в интервале 800...300 °С варьировали от 1 до 35 град/с. Горячую пластическую деформацию осуществляли на лабораторном прокатном стане со скоростью 1 с<sup>-1</sup> в один проход с относительным обжатием 30 %.

Исследование микроструктуры проводили методами оптической, растровой и просвечивающей электронной микроскопии. При работе на сканирующем микроскопе использовали метод EBSD-сканирования.

Таблица 1 – Химический состав сталей (масс. %) сварных труб

Марка стали	C	Mn	Si	S	P	V	Nb	Mo	Cr	Ni	Cu	N
06Г2ФБ	0,06	1,65	0,11	0,001	0,010	0,020	0,016	0,01	0,04	0,11	0,27	0,0044
07Г2МФБ (1)	0,07	1,58	0,18	0,003	0,007	0,070	0,050	0,23	0,04	0,02	0,01	0,0050
06Г2МБ	0,06	1,65	0,16	0,001	0,006	0,005	0,017	0,19	0,03	0,17	0,19	0,0056

Примечание: содержание Ti не более 0,015 %; Al не более 0,04.



Таблица 2 – Химический состав сталей (масс. %) бесшовных труб

Марка стали	C	Mn	Si	S	P	V	Nb	Mo	Cr	Ni	Cu	N
07Г2МФБ (2)	0,07	1,53	0,27	0,002	0,012	0,070	0,040	0,12	0,11	0,10	0,19	0,0060
08Г2ФБ	0,08	1,54	0,29	0,004	0,009	0,050	0,039	0,02	0,11	0,12	0,21	0,0044
10Г2ФБ	0,11	1,31	0,59	0,004	0,007	0,070	0,043	0,01	0,08	0,08	0,14	0,0070
14ГМБ	0,14	0,90	0,28	0,004	0,008	-	0,040	0,25	0,15	0,19	0,17	0,0070

Примечание: содержание Ti не более 0,003 %; Al не более 0,04 %.

Количество структурных составляющих оценивали с помощью программы IA-Structure. Рентгеноструктурные исследования проводили на дифрактометре «Rigaku» в отфильтрованном медном излучении и на аппарате ДРОН 4-07 в железном излучении. Рентгеноструктурный анализ использовался при определении остаточного аустенита, физического уширения интерференционных линий, микроискажений кристаллической решетки, плотности дислокаций и параметра решетки.

Испытание на статическое растяжение проводили на пятикратных образцах с диаметром рабочей части 6 мм. Для определения склонности к водородному охрупчиванию часть образцов подвергалась наводороживанию в течении 96 часов в растворе 5 % хлорида натрия и 0,5 % кристаллической уксусной кислоты в дистиллированной воде, насыщенном H<sub>2</sub>S (стандарт NACE TM0284-2016).

Для оценки трещиностойкости при статическом нагружении образцы с предварительно нанесенной усталостной трещиной подвергали нагружению по схеме трехточечного изгиба при температуре минус 20 °С. Далее определяли величину критического раскрытия трещины CTOD, соответствующую началу ее движения (стандарт BS 7448).

Для определения ударной вязкости использовали образцы с U и V – образными надрезами. По результатам динамических испытаний определяли температуру вязко-хрупкого перехода T<sub>50</sub>, соответствующую наличию в изломе 50 % вязкой составляющей (ГОСТ 4543-71). Кроме того, испытания на ударную вязкость проводили на образцах с наведенной усталостной трещиной как с боковыми надрезами, так и без них.

Склонность к деформационному старению оценивали после холодной пластической деформации, осуществляемой растяжением, прокаткой и сжатием и последующего одночасового нагрева на 250 °С. Деформацию растяжением величиной 1 – 4 % осуществляли на цилиндрических образцах

диаметром рабочей части 6 мм. Если при растяжении возникала площадка текучести, то деформацию с указанной степенью проводили за этой площадкой. О склонности к деформационному старению судили по величине прироста предела текучести:

$$\Delta\sigma = \sigma_T^{CT} - \sigma_d, \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_T = \sigma_T^{CT} - \sigma_T, \quad (2)$$

где  $\sigma_T^{CT}$  – предел текучести после старения;  $\sigma_d$  – напряжение, соответствующее предварительной деформации;  $\sigma_T$  – предел текучести в исходном состоянии. Кроме того, развитие деформационного старения оценивали по изменению показателя деформационного упрочнения  $n$  и характеристик пластичности.

Заготовки сечением 12,5×12,5 мм подвергали прокатке на величину 5 - 10 % и сжатию на 7 %. В этом случае о развитии деформационного старения в металле судили как по изменению свойств, определенных при испытаниях на статическое растяжение, так и по результатам динамических испытаний.

Склонность сталей к проявлению эффекта Баушингера исследовали на физическом симуляторе Gleeble 3800 в условиях одноосного растяжения и сжатия (рисунок 1). Определяли параметр напряжения  $\beta_\sigma$ , который описывает относительное уменьшение предела текучести, когда предварительная деформация сменяется обратной деформацией:

$$\beta_\sigma = \frac{(|\sigma_p| - |\sigma_r|)}{\sigma_p}, \quad (3)$$

где  $\sigma_p$  – наибольшее напряжение, достигаемое при предварительной деформации;  $\sigma_r$  – предел текучести на стадии обратной деформации.

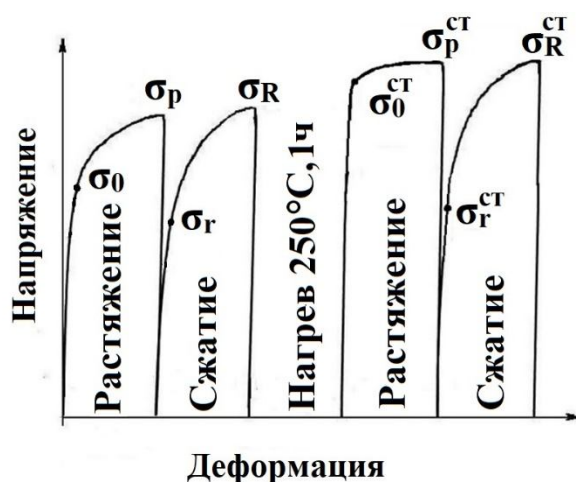


Рисунок 1 – Схема испытаний, использованная при исследовании эффекта Баушингера. Кривая сжатия перевернута на 180° относительно оси абсцисс.

В третьей главе рассмотрены закономерности деформационного старения сталей 06Г2ФБ, 07Г2МФБ (1) и 06Г2МБ. Основные эксперименты были выполнены на стали 06Г2ФБ, которая подвергалась различным режимам аустенитизации, горячей деформации и охлаждению. В большинстве экспериментов аустенитизацию этой стали осуществляли при 1000 °С, что позволяло получить относительно мелкое зерно аустенита и ослабляло влияние текстуры.

Наиболее подробно исследованы закономерности деформационного старения стали 06Г2ФБ при наличии ферритно-перлитной и ферритно-бейнитной структур, полученные при охлаждении после аустенитизации со скоростями 1 и 35 град/с соответственно. В ферритно-перлитной структуре кроме 90 % полигонального феррита и 5 % вырожденного перлита присутствовали отдельные рейки шириной до 2 – 3 мкм, трактуемые нами как кристаллы игольчатого бейнита, и одиночные «островки» МА-составляющей (рисунок 2 а).

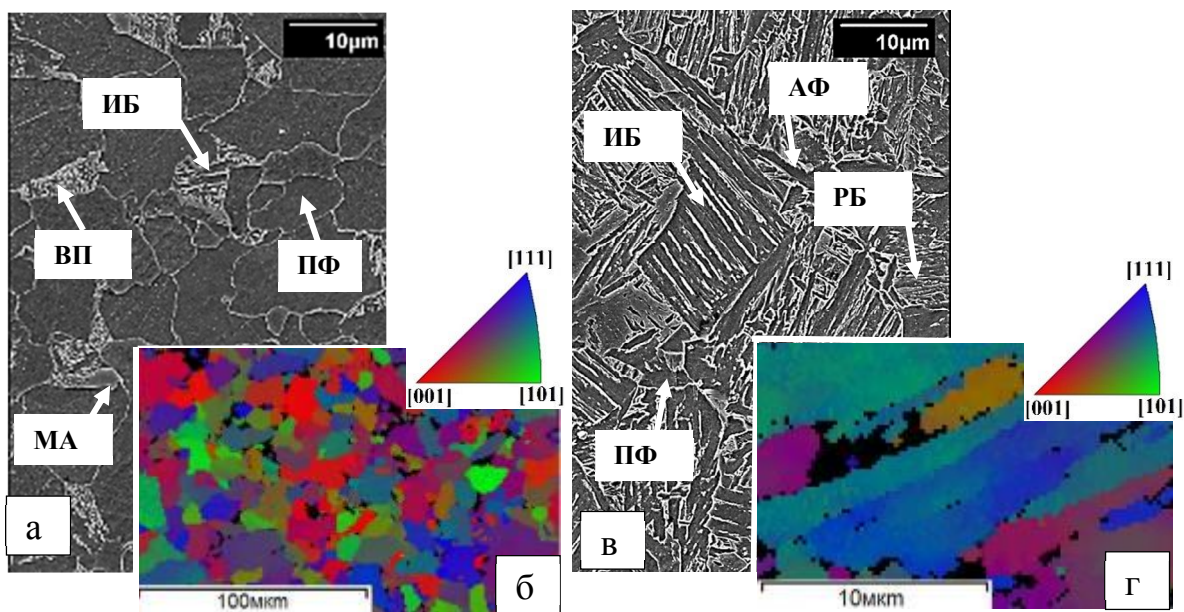


Рисунок 2 – Характерные структуры стали 06Г2ФБ:

а, б – ферритно-перлитная; в, г – ферритно-бейнитная; а, в – РЭМ,  
 б, г – EBSD сканирование (ПФ – полигональный феррит;  
 ВП – вырожденный перлит; ИБ – игольчатый бейнит; РБ – реечный  
 бейнит; МА – мартенситно-аустенитная составляющая)

В ферритно-бейнитной структуре доля ферритной составляющей не превышала 10 %, причем наблюдалась ее преимущественная локализация по границам исходного аустенитного зерна. Бейнитное превращение сопровождалось формированием преимущественно игольчатого бейнита (73 %) с небольшим количеством реечного (15 %) и глобулярного бейнита (2 %). На границах реек бейнитной  $\alpha$ -фазы присутствуют вытянутые участки МА-составляющей, что подтверждается травлением в реактиве Le Pera.

Анализ EBSD показал, что структуры обоих типов не имеют ярко выраженной текстуры. Судя по данным рентгеноструктурного анализа, образцы с ферритно-бейнитной структурой имеют более существенные микроискажения кристаллической решетки и большую плотность дислокаций, чем образцы с ферритно-перлитной структурой (таблица 3).

Таблица 3 – Результаты рентгеновского анализа стали 06Г2ФБ в исходном состоянии (числитель) и после деформации прокаткой на 5% с последующим одночасовым нагревом на 250 °С (знаменатель)

Уширение линий, рад, $\beta \cdot 10^{-3}$		$\beta_{(220)}/\beta_{(110)}$	Микроискажения $\Delta a/a \cdot 10^{-3}$		Плотность дислокаций $\rho \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$	Параметр решетки, $\text{\AA}$
$\beta_{(110)}$	$\beta_{(220)}$		Метод аппроксимации	Метод Холла		
Ферритно-перлитная структура						
<u>3,15</u>	<u>11,71</u>	<u>3,7</u>	<u>0,50</u>	<u>3,00</u>	<u>1,68</u>	<u>2,8670</u>
3,92	21,77	5,5	1,50	6,20	5,81	2,8660
Ферритно-бейнитная структура						
<u>4,57</u>	<u>24,81</u>	<u>5,4</u>	<u>1,70</u>	<u>6,89</u>	<u>7,58</u>	<u>2,8678</u>
4,76	27,57	5,8	2,11	8,47	9,23	2,8660

Существенное различие в плотности дислокаций рассмотренных структур подтверждают и данные просвечивающей электронной микроскопии. Более высокое значение параметра решетки у образцов с ферритно-бейнитной структурой по сравнению с ферритно-перлитной, позволяет предположить, что в случае охлаждения с большей скоростью в твердом растворе сохраняется большая концентрация атомов углерода.

Несмотря на то, что при выбранном режиме аустенитизации часть углерода осталась связанной в карбиды и не перешла в твердый раствор, сталь 06Г2ФБ обладает высокой склонностью к деформационному старению. Такой эффект реализуется при всех исследованных способах

деформации (растяжение, прокатка, сжатие), осуществляемой перед одночасовым нагревом на 250 °С. Совмещение деформации с последующим нагревом сопровождается ростом микроискажений кристаллической решетки и плотности дислокаций. Его развитие приводит к повышению пределов текучести и прочности, а также их отношения (таблица 4). Одновременно снижается показатель деформационного упрочнения  $n$  и относительное равномерное удлинение, что свидетельствует об уменьшении деформационной способности стали в состаренном состоянии (рисунок 3, таблица 4). Деформационное старение снижает статическую трещиностойкость (СТОД) стали.

Таблица 4 – Влияние деформационного старения на свойства стали 06Г2ФБ с ферритно-перлитной (числитель) и ферритно-бейнитной (знаменатель) структурами

Механические свойства	Исходное состояние	Деформация+250 °С, 1 ч			
		Растяжение 3%	Прокатка 5%	Прокатка 10%	Сжатие 7%
$\sigma_{0,2}$ ( $\sigma_T$ ), МПа	$\frac{(369)^*}{568}$	$\frac{(517)}{(821)}$	$\frac{494}{838}$	$\frac{584}{992}$	$\frac{620}{1050}$
$\sigma_B$ , МПа	$\frac{481}{765}$	$\frac{546}{835}$	$\frac{553}{893}$	$\frac{608}{1011}$	$\frac{668}{1118}$
$\sigma_{0,2}/\sigma_B$	$\frac{0,77}{0,74}$	$\frac{0,95}{0,98}$	$\frac{0,89}{0,94}$	$\frac{0,96}{0,99}$	$\frac{0,92}{0,94}$
$\delta$ , %	$\frac{28,5}{18,8}$	$\frac{22,5}{16,5}$	$\frac{22,0}{15,5}$	$\frac{14,3}{12,8}$	$\frac{21,5}{17,5}$
$\delta_{равн}$ , %	$\frac{18,0}{7,2}$	$\frac{9,3}{5,0}$	$\frac{11,0}{5,8}$	$\frac{3,5}{2,3}$	$\frac{4,0}{2,6}$
$\psi$ , %	$\frac{81}{82}$	$\frac{80}{79}$	$\frac{81}{79}$	$\frac{78}{75}$	$\frac{75}{70}$
СТОД <sup>-20°С</sup> , мм	$\frac{2,47}{0,47}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{0,46}{0,08}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{-}{-}$
$T_{50}$ , °С	$\frac{-85}{-110}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{-75}{-70}$	$\frac{-55}{-30}$	$\frac{-60}{-30}$
КСТ <sup>+20</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	$\frac{320}{290}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{272}{90}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{-}{-}$
КСТ <sub>6</sub> <sup>+20</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	$\frac{282}{193}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{270}{34}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{-}{-}$
$\Delta\sigma_T = \sigma_T^{CT} - \sigma_T$ , МПа	$\frac{-}{-}$	$\frac{148}{253}$	$\frac{125}{271}$	$\frac{215}{424}$	$\frac{257}{482}$
$\Delta\sigma = \sigma_T^{CT} - \sigma_d$ , МПа	$\frac{-}{-}$	$\frac{72}{100}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{-}{-}$

\* - В скобках указан физический предел текучести.

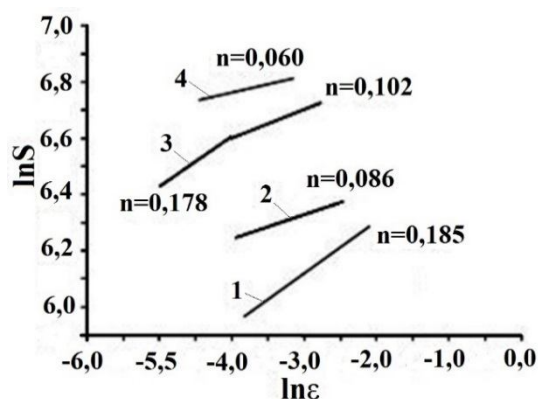


Рисунок 3 – Деформационное упрочнение ферритно-перлитной (1,2) и ферритно-бейнитной (3,4) структур стали 06Г2ФБ: 1, 3 – исходное состояние; 2, 4 – после прокатки на 5% + 250 °С, 1 ч

При динамическом нагружении, осуществляемом при комнатной температуре испытания, склонность к деформационному старению стали 06Г2ФБ наиболее надежно выявляется на образцах с наведенной усталостной трещиной КСТ и боковыми надрезами КСТ<sub>б</sub> (таблица 4). При отрицательных температурах испытания деформационное старение сопровождается смещением сериальных кривых ударной вязкости КСУ и температур вязко-хрупкого перехода  $T_{50}$  в сторону более высоких температур (рисунок 4).

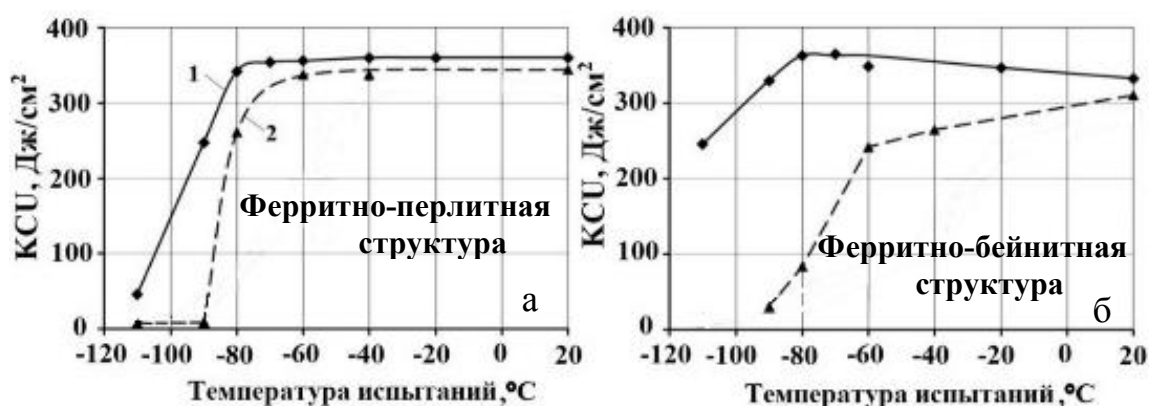


Рисунок 4 – Ударная вязкость КСУ стали 06Г2ФБ: 1 – исходное состояние; 2 – деформация прокаткой на 5 % + 250 °С, 1 ч

Анализ свойств, определенных как при статическом, так и динамическом нагружении показал, что при ферритно-бейнитной структуре деформационное старение получает большее развитие, чем при ферритно-перлитной. Такое различие в склонности исследованных структур к деформационному старению может быть обусловлено разной степенью пересыщения твердого раствора углеродом. В случае охлаждения с небольшой скоростью, когда формируется ферритно-перлитная структура, основная часть углерода оказывается связанной в карбиды перлитной

составляющей. При ферритно-бейнитной структуре, образовавшейся при высокой скорости охлаждения, следует ожидать большего количества атомов углерода в твердом растворе, которые могут взаимодействовать с дефектами кристаллического строения.

В кристаллах бейнитной  $\alpha$ -фазы плотность дислокаций значительно выше, чем в зернах полигонального феррита. Эта закономерность сохраняется и в случае проведения пластической деформации. Весьма вероятно, что более высокая плотность дислокаций в бейните приводит к уменьшению путей «дрейфа» атомов углерода к дефектам кристаллического строения. Этот фактор наряду с большим пересыщением твердого раствора должен способствовать более интенсивному развитию деформационного старения, когда в структуре преобладает бейнитная составляющая.

Показано, что с увеличением объемной доли игольчатого бейнита от 4 до 90 % склонность стали 06Г2ФБ к деформационному старению увеличивается. Эффект упрочнения, обусловленный деформационным старением, наиболее существенен при объемной доле бейнита более 50 – 60 %. Что касается статической трещиностойкости (СТОД), то ее резкое снижение наблюдалось уже при содержании в структуре 40 % бейнита, что обусловлено присутствием в структуре крупных участков МА-составляющей.

Склонность к деформационному старению стали 06Г2ФБ с ферритно-бейнитной структурой можно уменьшить, если ее подвергнуть высокому отпуску при 600 и тем более 660 °С.

В работе проведена оценка склонности стали 06Г2ФБ к деформационному старению после аустенитизации в широком интервале температур 950–1150 °С. Показано, что склонность стали к деформационному старению возрастает, когда при аустенитизации формируется крупнозернистая структура и происходит более полное растворение карбидов (1100–1150 °С), а при последующем ускоренном охлаждении возрастает объемная доля реечного бейнита, характеризующегося высокой плотностью дислокаций и большой протяженностью малоугловых границ.

Для оценки влияния горячей пластической деформации на склонность к деформационному старению заготовки из стали 06Г2ФБ после нагрева на

1150 °С подвергали прокатке с относительным обжатием 30 % при 1050...760 °С и последующим охлаждением со скоростью 34 град/с, обеспечивающим получение ферритно-бейнитной структуры. Установлено, что горячая пластическая деформация при 1050 и 950 °С сопровождалась интенсивным развитием рекристаллизации, приводящей к измельчению аустенитного зерна и обеспечивающей при последующем охлаждении уменьшение объемной доли реечного бейнита и увеличение количества игольчатого бейнита и феррита.

В результате этого заметно снижается склонность стали к деформационному старению. Если при горячей пластической деформации рекристаллизация отсутствует (прокатка при 850 и 760 °С), то склонность к деформационному старению остается на уровне высокотемпературного нагрева на 1150 °С.

Установлено, что сталь 06Г2ФБ с ферритно-бейнитной структурой, сформировавшаяся после ускоренного охлаждения от 1150 °С, обладает заметной склонностью к обратимой отпускной хрупкости. Длительный нагрев на 500 °С привел к появлению в изломах ударных образцов участков хрупкого интеркристаллитного разрушения. Осуществление ВТМО, заключающейся в прокатке при 850 °С с последующим ускоренным охлаждением, ослабляет ее развитие, что сопровождается заменой интеркристаллитного разрушения транскристаллитным (рисунок 5). В тоже время ВТМО не оказывает существенного влияния на транскристаллитное охрупчивание, возникающее при деформационном старении.

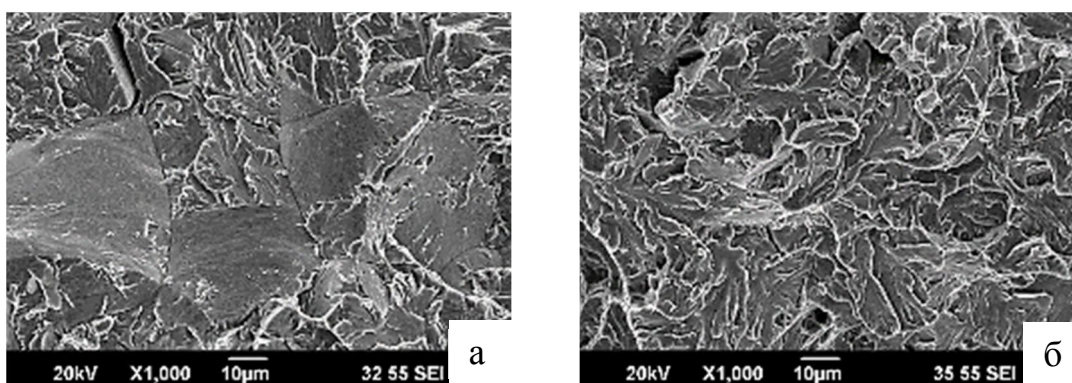


Рисунок 5 – Характер разрушения стали 06Г2ФБ, подвергнутой закалке (а) и ВТМО (б), с последующим нагревом на 500 °С, 24 ч.

Испытания при минус 60 °С. РЭМ



Легирование стали 07Г2МФБ (1) молибденом и повышенным количеством ниобия и ванадия предопределяет ее меньшую склонность к деформационному старению, чем стали 06Г2ФБ. Но этот эффект наиболее четко проявляется лишь при объемной доли бейнитной составляющей более 50 – 60 %.

В четвертой главе рассмотрены закономерности проявления эффекта Баушингера в стали 06Г2ФБ с ферритно-перлитной и ферритно-бейнитной структурами. Установлено, что при приложении знакопеременной деформации на 3 % у стали 06Г2ФБ наблюдается достаточно высокая склонность к проявлению эффекта Баушингера. Вне зависимости от последовательности приложения нагрузки у стали с ферритно-бейнитной структурой выше не только параметр Баушингера  $\beta_{\sigma}$ , но и  $\Delta\sigma_{p-o}=\sigma_p-\sigma_0$ ,  $\Delta\sigma_{p-r}=\sigma_p-\sigma_r$  и  $\Delta\sigma_{o-r}=\sigma_0-\sigma_r$  по сравнению с ферритно-перлитной (таблица 5). При этом с увеличением объемной доли бейнитной составляющей в исследуемом интервале склонность к проявлению эффекта Баушингера монотонно возрастает.

Величина эффекта Баушингера зависит от числа и природы преград для движущихся дислокаций, а также от начальной плотности мобильных дислокаций и активности их образования в процессе деформации. Сталь 06Г2ФБ с ферритно-бейнитной структурой характеризуется высокой плотностью дислокаций, значительная часть которых подвижна, о чем свидетельствует непрерывный переход от упругой к пластической области диаграмм предварительного нагружения. Дополнительным источником

Таблица 5 – Характеристика стали 06Г2ФБ при циклическом нагружении сжатие + растяжение (числитель) и растяжение + сжатие (знаменатель)

Структура	$\sigma_0$ , МПа	$\sigma_p$ , МПа	$\sigma_r$ , МПа	$\beta_{\sigma}$	$\Delta\sigma_{p-o}=\sigma_p-\sigma_0$ , МПа	$\Delta\sigma_{p-r}=\sigma_p-\sigma_r$ , МПа	$\Delta\sigma_{o-r}=\sigma_0-\sigma_r$ , МПа	$\sigma_0^{ст}$ , МПа
Ферритно-перлитная структура	<u>384*</u>	<u>447</u>	<u>315</u>	<u>0,30</u>	<u>63</u>	<u>132</u>	<u>69</u>	<u>521</u>
	385	442	313	0,29	57	129	72	447
Ферритно-бейнитная структура	<u>580</u>	<u>798</u>	<u>435</u>	<u>0,45</u>	<u>218</u>	<u>363</u>	<u>145</u>	<u>808</u>
	578	761	430	0,43	183	331	148	622

\* Некоторое несоответствие значений пределов текучести, полученных при однонаправленной и циклической деформации наблюдается в виду испытания разного типа образцов (сравнить таблицы 4 и 5).

мобильных дислокаций в бейнитной структуре является ее МА- составляющая, генерирующая новые дислокации на межфазных границах с бейнитной  $\alpha$ -фазой. С другой стороны, участки МА- составляющей могут служить «стопорами» для движения дислокаций. Кроме того, бейнитная структура содержит повышенную плотность «стопоров» дислокаций в виде границ дисперсных кристаллов  $\alpha$ -фазы.

Высокий отпуск стали 06Г2ФБ с ферритно-бейнитной структурой уменьшает склонность к проявлению эффекта Баушингера, но она остается на достаточно высоком уровне ( $\beta_{\sigma}=0,38$  для отпуска 600 °С и  $\beta_{\sigma}=0,35 - 0,34$  для 660 °С). Высокотемпературный нагрев на 1150 °С стали 06Г2ФБ, сопровождающийся формированием преимущественно реечного бейнита при последующем ускоренном охлаждении, способствует повышению склонности к проявлению эффекта Баушингера ( $\beta_{\sigma}=0,53$ ). В диссертации обсуждены причины приведенных выше закономерностей.

Установлено, что сталь 06Г2ФБ обладает заметной склонностью к деформационному старению, обусловленного совмещением знакопеременной деформации с охрупчивающим нагревом на 250 °С. Величина упрочнения зависит от последовательности направления предварительной циклической деформации. Наиболее высокий предел текучести достигается при предварительном нагружении образцов по схеме сжатие + растяжение.

В пятой главе приведены данные исследования сталей 07Г2МФБ (2), 08Г2ФБ, 10ГФБ и 14ГМБ, используемых для производства бесшовных труб. После аустенитизация при 910 °С, закалки в воде и отпуска при 620 и 660 °С произведена оценка их склонности к деформационному старению. Кроме того, на стали 08Г2ФБ исследовалась склонность к проявлению эффекта Баушингера. Показано, что на сталях, используемых для изготовления бесшовных труб и подвергнутых закалке и высокому отпуску, в основном реализуются те же закономерности, которые установлены для сталей сварных труб.

На основании этих данных для изготовления морских трубопроводов была предложена низкоуглеродистая марганцовистая сталь, содержащая 0,08 % углерода и комплексно легированная молибденом, ванадием и

ниобием. Была изготовлена партия бесшовных труб размерами 426×24 мм, с учетом требований ПАО «Газпром» и стандарта DNV- OS- F101-2013.

Испытания, проведенные в заводских условиях с использованием полнотолщинных образцов по методике, разработанной в ОАО «РосНИТИ», показали высокий комплекс механических свойств металла труб.

#### **Общие выводы и результаты работы:**

1. Низкоуглеродистые стали, применяемые для изготовления сварных и бесшовных труб, склонны к деформационному старению. Это установлено при различных видах небольшой деформации (растяжение, прокатка и сжатие) и последующего низкотемпературного нагрева. Развитие деформационного старения оказывает существенное влияние на механические свойства, определяемые как при статическом, так и динамическом нагружениях. Оно сопровождается ростом пределов текучести и прочности, увеличением их отношения, снижением общего и равномерного относительных удлинений, показателя деформационного упрочнения, величины критического раскрытия трещины при статическом нагружении (CTOD), а также понижением ударной вязкости и повышением температуры вязко-хрупкого перехода.

2. Склонность к деформационному старению низкоуглеродистых трубных сталей в существенной мере определяется исходной структурой. При исходной ферритно-бейнитной структуре, основной составляющей которой является игольчатый бейнит, склонность к деформационному старению значительно выше, чем при ферритно-перлитной структуре, состоящей из полигонального феррита и небольшой объемной доли вырожденного перлита. В случае ферритно-бейнитной структуры с увеличением объемной доли бейнитной составляющей склонность к деформационному старению возрастает. Наиболее существенное его развитие проявляется при объемной доле бейнита более 50 – 60 %.

При анализе свойств охрупченных сталей следует также учитывать дисперсность и морфологию МА-составляющей. Присутствие в структуре крупных участков МА-составляющей приводит к уменьшению объемной

доли бейнита (до 40 %), при которой происходит снижение статической трещиностойкости.

3. Склонность к деформационному старению низкоуглеродистых сталей в существенной мере зависит и от условий их обработки. Установлено, что высокий отпуск не устраняет полностью склонность к деформационному старению сталей с ферритно-бейнитной структурой, но заметно ее уменьшает. Склонность к деформационному старению стали возрастает, если при аустенитизации формируется крупнозернистая структура и происходит более полное растворение карбидов, а при последующем охлаждении увеличивается объемная доля реечного бейнита за счет уменьшения объемной доли игольчатого. Горячая пластическая деформация крупнозернистой стали с рекристаллизацией и измельчением аустенитного зерна обеспечивает при последующем ускоренном охлаждении уменьшение объемной доли реечного бейнита и увеличение количества игольчатого бейнита и феррита, снижая склонность к деформационному старению.

4. ВТМО, сопровождающаяся при охлаждении после горячей пластической деформации формированием ферритно-бейнитной структуры, ослабляет развитие обратимой отпускной хрупкости в низкоуглеродистой стали, заменяя интеркристаллитное разрушение транскристаллитным. При этом ВТМО не оказывает существенного влияния на склонность к деформационному старению.

5. В сталях, применяемых для сварных труб, наличие молибдена и повышенного количества ванадия и ниобия способствует меньшей склонности к деформационному старению при высокой объемной доле бейнитной составляющей в структуре. Существенного влияния легирования сталей, используемых для изготовления бесшовных труб и подвергаемых закалке и высокому отпуску, не выявлено. Более заметное развитие деформационного старения наблюдалось лишь в стали с повышенным содержанием углерода.

6. Низкоуглеродистые стали обладают заметной склонностью к проявлению эффекта Баушингера в условиях знакопеременной деформации растяжением и сжатием. Параметр Баушингера практически не зависит от

последовательности нагружения (растяжение + сжатие или сжатие + растяжение). При ферритно-бейнитной структуре, содержащей преимущественно игольчатый бейнит, он выше, чем при ферритно-перлитной. С увеличением объемной доли бейнитной составляющей склонность к проявлению эффекта Баушингера возрастает.

Высокий отпуск низкоуглеродистой стали с ферритно-бейнитной структурой уменьшает склонность к проявлению эффекта Баушингера. В случае формирования в стали крупнозернистой структуры, содержащей преимущественно речный бейнит, склонность к проявлению эффекта Баушингера возрастает.

7. Существенное развитие деформационного старения происходит не только при однонаправленной деформации, но и при знакопеременной. Наблюдаемый при этом рост предела текучести наиболее значителен, если направление деформации после старения совпадает по знаку с направлением деформации в последней фазе предварительного знакопеременного нагружения. Знакопеременная деформация сталей, подвергнутых деформационному старению, также сопровождается проявлением эффекта Баушингера. При этом величина параметра Баушингера состаренной стали не зависит от схемы циклического нагружения до старения.

8. На основании проведенных исследований разработана методика механических испытаний № РосНИТИ 16-06-13 (редакция 2) «Оценка склонности металла труб к деформационному старению в соответствии с DNV-OS-F101, с дополнительным требованием «Р» - Трубы с повышенной деформационной способностью». Согласно этой методике знакопеременная деформация при проведении деформационного старения осуществляется на полнотолщинных сегментах, вырезанных из труб.

Рекомендован и опробован химический состав стали и технология термической обработки бесшовных горячекатаных труб класса прочности Х65, предназначенных для строительства морских трубопроводов с укладкой с барабана в соответствии с требованиями международного стандарта DNV-OS- F101-2013.

**Список работ, опубликованных автором по теме диссертации в научных изданиях, входящих в список ВАК РФ:**

1. Смирнов, М. А. Деформационное старение низкоуглеродистой трубной стали / М. А. Смирнов, И. Ю. Пышминцев, О. В. Варнак, А. О. Струин // Вестник ЮУрГУ, Серия «Металлургия». – 2013. – Т. 13 – №1. – С. 129 – 133.
2. Варнак, О. В. Деформационное старение трубной стали с ферритно-бейнитной структурой / О. В. Варнак, С. И. Ильин, И. Ю. Пышминцев, М. А. Смирнов, С. Н. Тетеркин // Вестник МГТУ. – 2014. – №3. – С.43 – 47.
3. Смирнов, М. А. Влияние структуры на деформационное старение низкоуглеродистой стали / М. А. Смирнов, И. Ю. Пышминцев, О. В. Варнак, А. Н. Мальцева // Деформация и разрушение материалов. – 2014. – №8 – С. 9 – 15.
4. Смирнов, М. А. Склонность низкоуглеродистой трубной стали к проявлению эффекта Баушингера / М. А. Смирнов, А. М. Ахмедьянов, О. В. Варнак, А. Н. Мальцева // Вестник ЮУрГУ, Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15 – №2. – С. 26 – 32.
5. Смирнов, М. А. Исследование склонности низкоуглеродистых трубных сталей к проявлению эффекта Баушингера / М. А. Смирнов, О. В. Варнак, А. А. Жукова, А. Н. Мальцева, С. В. Рушиц, А. М. Ахмедьянов // Деформация и разрушение материалов. – 2015. – № 10. – С. 14 – 20.
6. Смирнов, М. А. Исследование склонности низкоуглеродистой стали к деформационному старению и проявлению эффекта Баушингера / М. А. Смирнов, И. Ю. Пышминцев, О. В. Варнак, А. Н. Мальцева, Ю. Н. Гойхенберг // Сталь. – 2016. – №1. – С. 39 – 45.
7. Пышминцев, И. Ю. Исследование деформационного старения низкоуглеродистых трубных сталей / И. Ю. Пышминцев, М. А. Смирнов, О. В. Варнак, А. Н. Мальцева, Ю. Н. Гойхенберг // Metallurg. – 2017. – №12. – С. 51 – 59.
8. Смирнов, М. А. Влияние высокотемпературной термомеханической обработки на хрупкость низкоуглеродистой стали /

М. А. Смирнов, И. Ю. Пышминцев, О. В. Варнак, А. Н. Мальцева // Физика металлов и металловедение. – 2018. – Т. 119. – №2. – С. 205 – 210.

**Публикации в других изданиях:**

1. Варнак, О. В. Склонность к деформационному старению низкоуглеродистой трубной стали с различной структурой / О. В. Варнак, И. Ю. Пышминцев, М. А. Смирнов, А. Н. Мальцева // Сборник трудов VII-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур – ПРОСТ 2014». – Москва: НИТУ «МИСиС», 2014. – С. 191.

2. Варнак, О. В. Свойства низкоуглеродистой трубной стали, подвергнутой деформационному старению / О. В. Варнак, М. А. Смирнов, И. Ю. Пышминцев, А. Н. Мальцева, А. А. Жукова // Труды XXI Международной научно-практической конференции «Трубы 2014»: сборник научных трудов. – Челябинск: ОАО «РосНИТИ», 2014. – Ч. 2. – С. 264 – 271.

3. Варнак, О.В. Изменение свойств низкоуглеродистой трубной стали при деформационном старении / О.В. Варнак // XV Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов – молодых ученых: сборник научных трудов. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – С. 243 – 245.

4. Варнак, О. В. Исследование свойств низкоуглеродистой трубной стали, подвергнутой деформационному старению / О. В. Варнак, А.Н. Мальцева // VI Конференция молодых специалистов. Перспективы развития металлургических технологий: сборник научных трудов. – Москва: ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», 2015. – С.13 – 14.

5. Смирнов, М. А. Склонность к деформационному старению трубной стали, предназначенной для эксплуатации в экстремальных условиях нагружения / М. А. Смирнов, И. Ю. Пышминцев, О. В. Варнак, А. Н. Мальцева // XIX Международная конференция «Физика прочности и пластичности материалов». – Самара: СамГТУ, 2015. – С. 186.

6. Варнак, О. В. Влияние структуры низкоуглеродистой трубной стали на ее склонность к проявлению эффекта Баушингера / О. В. Варнак,

А. М. Ахмедьянов // XVI Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов – молодых ученых: сборник научных трудов. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 24 – 27.

7. Смирнов, М. А. Склонность к деформационному старению и проявлению эффекта Баушингера низкоуглеродистой трубной стали / М. А. Смирнов, И. Ю. Пышминцев, О. В. Варнак, А. Н. Мальцева // 11-ая Международная научно-техническая конференция. Современные металлические материалы и технологии (СММТ'15). Санкт-Петербург: СПГПУ, 2015. – С. 855 – 856.

8. Мальцева, А. Н. Освоение производства труб, предназначенных для строительства морских трубопроводов / А. Н. Мальцева, И. Ю. Пышминцев, М. А. Смирнов, О. В. Варнак, Р. Е. Мухамеджанов, Д. П. Усков, М. Ю. Чубуков, И. В. Мякотина // XXII Международная научно-практическая конференция «Трубы 2016»: сборник научных трудов. – Челябинск: ОАО «РосНИТИ», 2016. – С. 228 – 230.