

УДК 669.017

## **РОЛЬ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В СНИЖЕНИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР**

### **Сообщение 8. Изменение магнитных характеристик металла трубопровода в условиях возникновения зон локальных пластических деформаций в ходе длительной эксплуатации**

**Б. С. Ермаков, С. О. Маликов, А. В. Васильев**

Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий ■

В процессе сварки и последующего охлаждения в сварном соединении протекают сложные термомеханические процессы, обуславливающие образование временных напряжений, которые после полного охлаждения переходят в остаточные напряжения. В том случае, когда величина этих напряжений превышает предел текучести материала, возможна их релаксация с образованием зон локальных сварочных деформаций. Эти напряжения принято называть первичными, т. е. возникшими в конструкции еще до момента начала ее эксплуатационного периода. В ходе эксплуатации конструкция приобретает так называемые вторичные напряжения и деформации, связанные с воздействием каких-либо эксплуатационных нагрузок или ремонтных операций. Такие напряжения и деформации накладываются на первичные и могут как ослаблять (в случае, например, возникновения вторичных сжимающих напряжений в области растягивающих первичных), так и усиливать их роль. Более подробно влияние этих факторов на работоспособность материала трубопровода сжиженного гелия в ходе его длительной эксплуатации была описана в наших предыдущих сообщениях [1; 2].

Криогенные трубопроводы, в частности трубопроводы жидкого гелия, относятся к оборудованию, наиболее сложному с точки зрения обнаружения дефектов, возникающих в них при длительной эксплуатации. Это связано как с протяженностью объекта контроля, достигающего десятков и даже сотен метров, так и со сложной системой теплоизоляции трубопровода, что делает его практически недоступным для традиционных методов обнаружения различных повреждений, вплоть до момента его разрушения.

Из опыта эксплуатации и экспертизы промышленной безопасности подобных объектов известно, что наиболее повреждаемыми участками трубопровода являются зоны термического влияния (ЗТВ) монтажных сварных соединений, т. е. зоны, где суммирующее воздействие первичных и вторичных напряжений и деформаций оказывается максимальным [1].

Целью настоящего сообщения является описание результатов анализа изменения магнитных

свойств материала гелиевого трубопровода под действием первичных и вторичных напряжений и деформаций, которые возникли в ходе его длительной эксплуатации.

Такое внимание к магнитным свойствам материала трубопровода обусловлено следующими причинами. Криогенные трубопроводы, как правило, изготавливаются из маломангнитных хромоникелевых сталей аустенитного класса. Известно, что такие стали являются магниточувствительными материалами, т. е. под действием внешних нагрузок, приводящих к возникновению в них зон локальных пластических деформаций, магнитные свойства хромоникелевых сталей (особенно магнитная проницаемость) резко изменяются [3–5]. Таким образом, возникает возможность разработки нового метода обнаружения зон локальных пластических деформаций методом магнитного лосцирования криогенного трубопровода. Создание такого метода позволило бы повысить надежность и достоверность технического диагностирования криогенных трубопроводов, а также снизить трудозатраты при проведении экспертных работ.

Для проведения исследований были отобраны образцы из вырезок основного металла и металла сварных соединений трубопровода диаметром 108 × 8 мм, изготовленного из стали 12Х18Н12Т. Монтаж и пуск трубопровода в эксплуатацию был осуществлен в 1990 г. Монтажная сборка велась с помощью ручной электродуговой сварки током обратной полярности (сила тока составляла 70–80 А). При проведении сварочных операций были использованы электроды марки Э-07Х20Н9 диаметром 3 мм. Термообработка монтажных швов не осуществлялась. Трубопровод предназначен для перекачки сжиженного гелия от фильтра к емкости его хранения. По технической документации температура стенки трубопровода в процессе эксплуатации составляет примерно 4,2 К. Срок непрерывной эксплуатации — 1000 ч. По истечении этого срока необходима очистка системы фильтрации, которая осуществляется путем высокотемпературного нагрева фильтрующей среды. Нагрев осуществляется закачкой в систему продуктов сжигания природного газа. При этом темпера-

тура стенки металла трубопровода может достигать 750–800 К (470–520 °С).

С целью оценки влияния длительной эксплуатации на металл трубопровода производились периодические вырезки участков основного металла и сварных соединений трубопровода в 2000, 2002 и 2004 гг. Его наработка в 2000 г. составила 81600 ч, суммарная величина простоев 12300 ч, суммарное время разогревов стенки металла трубопровода до температур свыше 700 К — более 400 ч. В 2002 г. эти величины составили 88800, 12500, 440 ч, а в 2004 г. — 99400, 12900 и 495 ч соответственно.

Вырезанные из трубопровода участки подвергались испытаниям, в ходе которых были определены механические свойства основного металла (ОМ), металла шва (МШ) и зоны термического влияния (ЗТВ) сварного соединения. Металл зоны термического влияния анализировался таким образом, чтобы максимально учесть структурные изменения, произошедшие в процессе сварки: рост зерна стали, карбидные превращения и т. п. Результаты исследований структуры и свойств металла вырезок приведены в [1]. Магнитная про-

ницаемость образцов, изготовленных из вырезок, была исследована по методикам, описанным в [3], в сильных внешних магнитных полях в диапазоне температур 293 — 4 К и в магнитном поле Земли при 293 К.

Результаты этих исследований и данные по структурному состоянию металла вырезок приведены в табл. 1.

В ходе проведения технического диагностирования 2000 и 2002 гг. повреждений трубопровода обнаружено не было. При проведении визуально-измерительного контроля в 2004 г. был обнаружен обрыв неподвижной опоры трубопровода, приведший к нарушению его трассировки. Это повреждение привело к возникновению в зоне сварного соединения трубопровода растягивающих напряжений и зоны вторичных локальных пластических деформаций. Величина этих деформаций, определенная рентгеноструктурным анализом, составила около 12–15 %. Анализ структуры металла в зоне ЗТВ, подвергшейся пластическому деформированию, показал, что в ходе деформирования в структуре металла произошло деформационное мартен-

**Таблица 1.** Механические свойства и структура металла вырезок

№ образца	Год и место вырезки, (время наработки, тыс. ч)	Температура воздействия T, К	Магнитная проницаемость в магнитных полях напряженностью кА/м				Структура металла вырезки
			10	40	80	поле Земли	
1	2000 — ОМ (81,6)	293	1,112	1,096	1,091	1,098	А + Ме <sub>23</sub> С <sub>6</sub> (1,5–3 %)
		150	1,118	1,100	1,097		
		4,2	1,145	1,137	1,112		
2	2002 — ОМ (88,8)	293	1,116	1,110	1,092	1,099	А + Ме <sub>23</sub> С <sub>6</sub> (1,5–3 %)
		150	1,121	1,117	1,101		
		4,2	1,157	1,147	1,136		
3	2004 — ОМ (99,4)	293	1,117	1,114	1,099	1,099	А + Ме <sub>23</sub> С <sub>6</sub> (2–3,5 %)
		150	1,122	1,121	1,108		
		4,2	1,160	1,149	1,145		
4	2000 — МШ (81,6)	293	1,899	1,800	1,734	1,815	А + Φ (менее 5 %) + Ме <sub>23</sub> С <sub>6</sub> (1–2,5 %)
		150	1,946	1,875	1,810		
		4,2	2,315	2,111	1,946		
5	2002 — МШ (88,8)	293	1,900	1,844	1,765	1,822	А + Φ (менее 5 %) + Ме <sub>23</sub> С <sub>6</sub> (1–3 %)
		150	1,970	1,899	1,845		
		4,2	2,319	2,121	1,934		
6	2004 — МШ (99,4)	293	1,929	1,901	1,875	1,915	А + Φ (менее 5 %) + Ме <sub>23</sub> С <sub>6</sub> (1,5–3 %)
		150	2,043	1,999	1,921		
		4,2	2,488	2,215	2,024		
7	2000 — ЗТВ (81,6)	293	1,131	1,117	1,102	1,109	А + Ме <sub>23</sub> С <sub>6</sub> (1,5–3 %)
		150	1,146	1,121	1,109		
		4,2	1,172	1,159	1,144		
8	2002 — ЗТВ (88,8)	293	1,134	1,131	1,112	1,119	А + Ме <sub>23</sub> С <sub>6</sub> (2–3 %)
		150	1,144	1,145	1,117		
		4,2	1,198	1,167	1,162		
9	2004 — ЗТВ (99,4) (в зоне локальных деформаций ε = 12–15 %)	293	Не определялась		9,534	≥ 10	А + Ме <sub>23</sub> С <sub>6</sub> (2,5–3,5 %) + М <sub>д</sub> (12–14 %)
		150			9,978		
		4,2			—		
10	2004 — ЗТВ (99,4) (вне зоны локальных деформаций)	293	1,143	1,134	1,115	1,137	А + Ме <sub>23</sub> С <sub>6</sub> (2,5–3,5 %)
		150	1,159	1,141	1,131		
		4,2	1,177	1,169	1,158		

Примечание: А — аустенит, Φ — феррит, Ме<sub>23</sub>С<sub>6</sub> — карбидные включения, М<sub>д</sub> — мартенсит деформации (в процентах от видимой площади поверхности шлифа).

ситное превращение. Вид мартенситных игл, их форма и расположение позволяют предположить, что обрыв опоры и возникновение деформированной зоны произошли после последнего технологического разогрева, так как при металлографическом исследовании не был обнаружен распад мартенситной фазы, который бы следовало ожидать во время нагрева (отпуска) стали.

Результаты магнитных измерений позволяют с необходимой для технического диагностирования точностью обнаружить зону локальных пластических деформаций, а значит, определить тот участок трубопровода, в котором вероятность повреждений максимальна. Для подтверждения возможности применения такого метода контроля на практике был использован магнитный зонд, описанный в работе [6]. Этот зонд размещается на рабочей части эндоскопа и легко вводится в исследуемый трубопровод через вентили, задвижки, предохранительные устройства. Применение подобного зонда позволяет совместить процедуру визуального осмотра трубопровода с точным определением координат зон, обладающих повышенной магнитной проницаемостью, и сосредоточить основное внимание при контроле трубопровода на наиболее проблемных зонах.

Для оценки пригодности такого метода контроля при техническом диагностировании трубопроводных систем были проведены стендовые испытания модельного участка трубопровода. С этой целью из труб, изготовленных из стали 12Х18Н12Т с содержанием никеля 13,0 % диаметром 51 мм и толщиной стенки 3 мм был изготовлен и исследован участок трубопровода, моделирующий условия изготовления и эксплуатации трубопровода жидкого гелия. Модельный участок представлял из себя крутозагнутый под углом 90° гиб и прилегающие к нему прямые участки труб длиной 1000 мм в каждую отгиба сторону (рисунок). Все три участка были изготовлены из одной трубы, поэтому химический состав всех трех участков — одинаков. Гибка велась в холодную на трубогибочной машине, полученный гиб и прямые участки труб перед сваркой были аустенилизированы по режиму: нагрев до 1050 °С, выдержка 1 ч, охлаждение в воде. Приварка прямых участков труб к гибу велась тем же способом и в тех же режимах, что были применены при монтаже трубопровода [1]. Высокая стоимость жидкого гелия и длительность технологического цикла между технологическими разогревами не

позволяла полностью смоделировать режим работы трубопровода, поэтому при моделировании был применен следующий режим: охлаждение до 4,2 К, выдержка при этой температуре 1 ч и последующий разогрев до комнатной температуры. Затем модельный участок помещался в печь, где моделировались условия технологического разогрева оборудования: нагрев со скоростью 100 град/ч до 500 °С, выдержка при этой температуре в течение 1 ч и последующее охлаждение на воздухе. Всего было проведено 5 термических циклов. После проведения каждого термического цикла зона сварного шва 1 подвергалась пластическому деформированию (изгибу), шаг деформирования, определяемый по линии максимального растяжения, составлял 2 %. Величина пластической деформации оценивалась в зоне максимального растяжения металла на дифрактометре ДРОН-3.0, на том же приборе оценивались структурные изменения в растянутой зоне. Магнитная проницаемость замерялась с шагом 200 мм на прямых участках, в зонах термического влияния сварных соединений и в сварных швах. Измерения проводились по линии максимального растяжения шва 1. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Как следует из приведенных данных, магнитная проницаемость всего металла медленно нарастает с увеличением времени выдержки при 500 °С от 1 до 5 ч. Среднее увеличение магнитной проницаемости составляет 0,04–0,05 и, видимо, связано с началом образования карбидных фаз в структуре стали.

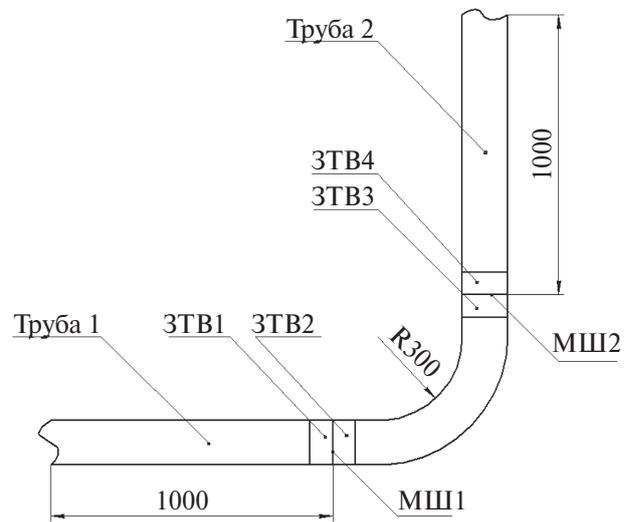


Схема модельногогиба

**Таблица 2.** Результаты магнитных измерений модельногогиба

Цикл	Расстояние от торца 1																
	0	200	400	600	800	ЗТВ1	МШ1	ЗТВ2	Центр	ЗТВ3	МШ2	ЗТВ4	800	600	400	200	0
1	1,069	1,070	1,069	1,070	1,088	1,131	1,895	1,126	1,064	1,100	1,911	1,099	1,068	1,071	1,069	1,070	1,072
2	1,073	1,075	1,074	1,076	1,104	1,457	1,951	1,129	1,078	1,109	1,926	1,107	1,076	1,079	1,081	1,076	1,074
3	1,083	1,081	1,083	1,081	1,142	1,652	2,012	1,142	1,083	1,112	1,934	1,114	1,081	1,084	1,087	1,084	1,085
4	1,097	1,099	1,098	1,096	1,198	1,961	2,354	1,218	1,095	1,121	1,956	1,120	1,095	1,097	1,096	1,095	1,092
5	1,119	1,120	1,120	1,121	1,322	2,354	2,768	1,460	1,115	1,127	1,978	1,130	1,114	1,112	1,117	1,116	1,117

Исключение составляет зона растяжения, где пластическая деформация возрастает с каждым циклом примерно на 2 % в зоне термического влияния сварного шва (ЗТВ1). На этом участке величина магнитной проницаемости после каждого цикла испытаний практически удваивается, например, после цикла 3 — 1,652, после 4 — 1,961, после 5 — 2,354. Одновременно с ростом магнитной проницаемости идет увеличение доли мартенсита деформации: после цикла 1 — следы; после 2 — менее 0,5 %; после 3 — около 1,0 %; после 4 — 1,3 % и после цикла 5 — около 2 %. В данном случае под термином «мартенсит деформации» понимается не только мартенситная фаза, возникающая в процессе деформирования, но и продукт ее распада в ходе повторных нагревов — т. е. это суммарный объем распада аустенитной матрицы, обусловленный деформационным воздействием.

Деформирование модельного участка также отражается на повышении магнитной проницаемости на зонах, прилегающих к ЗТВ1: в точке 800 мм трубы 1 после 5 циклов ее величина достигла — 1,322 (при средней менее 1,200); в МШ1 — 2,768 (против 1,978 в МШ2), в ЗТВ2 — 1,460; ЗТВ4 — 1,130 и ЗТВ3 — 1,127. Увеличение магнитной проницаемости связано с совместным воздействием пластической деформации, которая, например, в точке 800 трубы 1 составила около 7 % (при 12 % в зоне ЗТВ1) и термическим воздействием на структуру металла. Количество мартенсита деформации в этой точке — менее 1 %.

Таким образом, проведенными исследованиями вырезок из поврежденного участка трубопровода жидкого гелия и модельного участка трубы была показана возможность магнитной локации зон локальных пластических деформаций, т. е. мест, где вероятность появления дефектов, приводящих к повреждениям трубопровода, максимальна. Использование совмещенного с эндоскопом магнитного зонда расширяет возможности магнитного метода контроля, позволяет совместить магнитометрию и визуально-измерительный контроль трубопровода, что значительно снижает время, затрачиваемое на техническое диагностирование сложного технического объекта, повышает надежность проведенных исследований.

## Список литературы

1. Роль остаточных сварочных деформаций в снижении работоспособности трубопроводов, эксплуатируемых в условиях низких температур. Сообщение 1. Анализ работоспособности металла трубопровода в условиях возникновения зон локальных пластических деформаций / Б. С. Ермаков, С. О. Маликов, Д. В. Поваров, Ю. П. Солнцев // Известия СПбГУНиПТ. 2006. № 1. С. 44–47.
2. Роль остаточных сварочных деформаций в снижении работоспособности трубопроводов, эксплуатируемых в условиях низких температур. Сообщение 2. Роль никеля в формировании свойств основного металла и зоны термического влияния сварных соединений хромоникелевых сталей / Б. С. Ермаков, С. О. Маликов, Д. В. Поваров, Ю. П. Солнцев // Известия СПбГУНиПТ. 2006. № 2. С. 48–54.
3. Ермаков Б. С. Теоретический и экспериментальный анализ магнитных, фазовых превращений и свойств аустенитностабильных криогенных сталей: Дисс. ... доктор техн. наук. — СПб.: СПбГУНиПТ, 2000. — 375 с.
4. Ермаков Б. С., Козаченко А. В., Вологжанина С. А. Некоторые аспекты магнитного анализа криогенных аустенитных сталей / Материалы конференции «Прочность материалов и конструкций при низких температурах». — СПб.: СПбГУНиПТ, 2000. С. 104–107.
5. Ермаков Б. С., Маликов С. О., Солнцев Ю. П. Роль особенностей эксплуатации криогенных систем в снижении надежности и долговечности металла сварных соединений из хромоникелевых сталей / Труды III Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата (пленарные доклады). — Якутск: СО РАН, 2006. С. 27–37.
6. Козаченко А. В. Роль эксплуатационных факторов риска в снижении надежности и долговечности оборудования низкотемпературной техники: Дисс. ... канд. техн. наук. — СПб.: СПбГУНиПТ, 2004. — 149 с.