

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛО- И ХЛАДОТЕХНИКИ**

УДК 669.017

**РОЛЬ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ  
В СНИЖЕНИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ,  
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР  
СООБЩЕНИЕ 6. АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ  
МЕТАЛЛА ТРУБОПРОВОДА В УСЛОВИЯХ  
КОРРОЗИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СРЕДЫ****С. О. Маликов, Б. С. Ермаков, А. В. Козаченко, Ю. П. Солнцев**

Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий ■

Трубопроводные системы относятся к числу наиболее сложных с точки зрения прогнозирования остаточного ресурса элементов низкотемпературной техники, отработавшей расчетный срок службы. Это связано как со сложностью непосредственного контроля металла трубопровода, защищенного термоизоляцией, и труднодоступностью объектов, так и со значительным количеством монтажных сварных соединений, которые выполняются непосредственно при сборке объекта. Организация соответствующих всем требованиям нормативно-технической документации на сварочные работы на низкотемпературных объектах операций сварки (разделки швов, предварительного и сопутствующего подогревов, обеспечения заданной скорости охлаждения шва после сварки или необходимой термической обработки) затруднена, что в ряде случаев приводит к отказу от восстанавливающей структуры металла термической обработки монтажного сварного соединения. Монтажные швы являются зонами пониженной точности выполнения сварочных работ, что способствует возникновению неучитываемых в прочностных расчетах сварочных деформаций и напряжений, участков повышенной дефектности макро- и микроструктуры металла. Отклонение геометрической схемы конструкции от принятой при расчетах прочности и устойчивости также может изменять характер действия рабочих нагрузок и приводить к возникновению дополнительных напряжений.

При повреждении термоизоляции на наружной поверхности и при скоплении коррозионно-агрессивного конденсата в зонах застоя на внутренней поверхности трубопровода во время межэксплуатационных остановов в зонах монтажных сварных соединений, т. е. в зонах повышенных напряжений и деформаций, возможно возникновение участков локальных повреждений металла по механизму — коррозии под напряжением (КР), или стресс-коррозии.

В настоящее время в эксплуатации находится значительное количество оборудова-

ния низкотемпературной техники, изготовленного из коррозионно-стойких хромоникелевых сталей аустенитного класса, в основном сталей типа (08–12)X18H(10–12)T, наработка которых близка к предельно допустимым ресурсным показателям или превышает их.

Проблема коррозионных повреждений, возникающих во время межэксплуатационных периодов, низкотемпературного оборудования уже обсуждалась в ряде исследований [1–3 и др.], ее вклад в снижение запасов пластичности и прочности металла низкотемпературных систем известен. Однако в большинстве работ исследования проводились на «основном металле», т. е. на достаточном удалении от зон термического влияния сварных соединений. Вопросы взаимного усиления коррозионных процессов при одновременном воздействии сварочных напряжений и деформаций, изменении структуры металла в зоне термического влияния сварных швов низкотемпературного оборудования и агрессивной среды изучены значительно меньше и требуют дополнительных исследований, без которых невозможно дать однозначный ответ на вопрос о возможности продления срока службы криогенной трубопроводной системы.

Коррозия под напряжением, так же как и межкристаллитная коррозия, относится к числу наиболее опасных видов коррозии, повреждающих низкотемпературное оборудование. Межкристаллитная коррозия отмечается в основном на оборудовании, которое в межэксплуатационные периоды подвергается технологическим разогревам. В системах, где температура при остановках не превышает комнатной, чаще выявляются повреждения, связанные коррозией под напряжением [4].

В работе были проведены исследования влияния растягивающих напряжений и холодной пластической деформации на скорость анодного процесса в основном металле и зонах термического влияния стали 12X18H12T, увеличение которой указывает на возможность возникновения в металле дефектов по механизму КР. Основным металлом, т. е. металлом, не подвергшимся термическому

воздействию в ходе сварочных работ, находился в аустенитизированном состоянии: нагрев до температуры 1320 К, выдержка 1 ч, охлаждение в воде; зону термического влияния (ЗТВ) монтажного сварного соединения имитировали образцы, обработанные по режиму — аустенитизация и последующий термический сварочный цикл с максимальной температурой нагрева порядка 850 К, который, как было показано в работе [5], приводит к максимальному охрупчиванию материала.

Испытания по влиянию растягивающих напряжений на скорость анодного процесса в стали — одного из основных показателей склонности стали к возникновению дефектов КР [6] — проводили на кольцевых образцах, вырезанных из трубы  $108 \times 8$  мм, шириной 15 мм. Для оценки влияния локальных напряжений на изменение склонности к КР стали на ряде образцов наносили треугольные риски — надрезы с углом при вершине  $90^\circ$  и радиусом скругления в вершине 0,2 мм. Глубина надрезов составляла 25 % от толщины стенки трубного образца. Влияние предварительной деформации металла на возникновение склонности к КР было исследовано на образцах, вырезанных из листа стали 12Х18Н12Т, термообработанных по тем же режимам и в тех же условиях, что и кольцевые пробы. Необходимая степень деформации задавалась методом холодной дробной прокатки с шагом деформирования в 1 %.

Исследование КР чаще всего проводят при одновременном воздействии на металл растягивающих напряжений и коррозионной среды. Этот метод, как наименее сложный и трудоемкий, был использован в работе на первой стадии испытаний — при определении влияния напряжений на склонность к КР стали 12Х18Н12Т. При дальнейших исследованиях, когда было необходимо моделировать процессы КР в действующем криогенном оборудовании, исследования КР проводились на предварительно деформированных образцах, так как этот метод наиболее полно отражает процессы, протекающие в металле низкотемпературного оборудования, когда процессы пластического де-

формирования и коррозионного воздействия оказываются разнесенными друг от друга по времени.

Влияние напряженного состояния на электрохимические характеристики стали 12Х18Н12Т исследовали при непрерывной деформации образца со скоростью 1 мм/мин. Кинетика анодного процесса изучалась в растворе сульфата натрия с концентрацией последнего 1 моль на литр раствора (однонормальный раствор) при электрохимическом потенциале 0,6 В, что соответствует пассивному, т. е. не склонному к КР, состоянию стали.

Результаты исследований приведены в табл. 1. Было обнаружено, что резкий скачок скорости анодного процесса на гладких (без надреза) образцах основного металла соответствует напряжениям, примерно равным пределу текучести стали — 250–270 МПа.

Скорость анодного процесса у образцов из основного металла (без надреза) в области упругих напряжений практически не изменяется, т. е. вероятность возникновения склонности к КР у основного металла трубопровода крайне мала. Возникновение пластических течений при превышении предела текучести в гладком образце приводит к ускорению анодного процесса и, как следствие, к появлению опасности повреждений по механизму КР. Зоны локальных напряжений, возникающих у рисок, подрезов и других механических дефектов основного металла трубопровода (надрезанные — с заранее нанесенными дефектами), приводят к снижению уровня напряжений, при котором скорость анодного процесса, указывающего на опасность возникновения КР, начинает резко увеличиваться. Таким образом, склонность к КР у этой группы образцов наступает значительно раньше, до достижения напряжений, соизмеримых с пределом текучести металла, что связано с возникновением локальных напряжений в зоне надреза, величина которых значительно превышает их средние значения. Зона термического влияния сварного соединения (образцы, имитирующие ЗТВ монтажного шва) оказывается еще менее защищенной от КР, что следует связывать со структурными изменениями в этой зоне, приводящими

**Таблица 1.** Скорость анодного процесса в гладких и надрезанных образцах основного металла и образцах, имитирующих ЗТВ монтажного шва

Растягивающие напряжения, МПа	Скорость анодного процесса, МкА/см <sup>2</sup>		
	Гладкий образец	Надрезанный образец	Образец, имитирующий ЗТВ монтажного шва
0	-1,4	-1,4	-1,3
100	-1,4	-1,4	-1,2
150	-1,4	-1,3	-0,7
200	-1,4	-0,4	+0,2
250	-1,3	+0,3	+0,4
270	-0,1	+0,4	—
300	+0,2	+0,4	—
350	+0,4	—	—

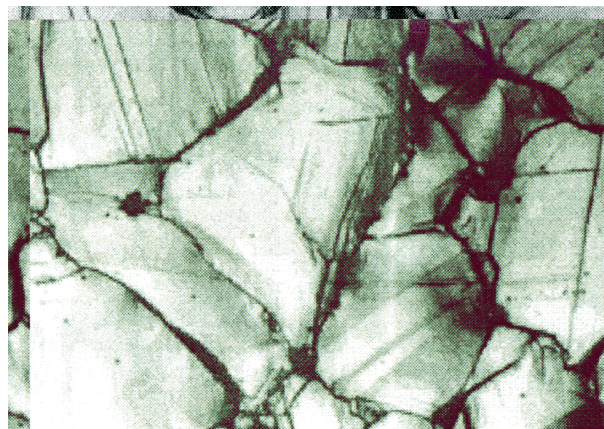
к появлению в границах зерен стали карбидных включений типа  $Me_{23}C_6$ . Объем карбидных частиц значительно больше объема исходного твердого раствора, из которого произошло выделение избыточных карбидных фаз, что приводит к резкому изменению сложнапряженного состояния границ зерен, их разупрочнению и охрупчиванию, возникновению дополнительных растягивающих напряжений в областях с минимальной стойкостью против коррозионных повреждений — границах зерен.

Изменение электрохимических характеристик анодного процесса, наступающее при напряжениях порядка 270, 200 и 150 МПа, для всех образцов, по-видимому, следует связывать с тем, что при превышении локального в данном микрообъеме (у риски, у карбидного включения и т. п.) предела текучести начинается пластическое формоизменение металла с образованием линейных дефектов кристаллической решетки — дислокаций. Потенциальная энергия атомов в ядре таких дислокаций увеличивается в десятки и сотни раз по отношению к недеформированному состоянию, а возникающие ступеньки скольжения значительно увеличивают площадь поверхности контакта с коррозионной средой.

При переходе от кольцевых трубных образцов, испытанных при постоянной скорости деформации, к листовым прокатанным пробам, которые затем подвергались коррозионному воздействию, было установлено, что скорость анодного процесса возрастает по мере повышения уровня пластической деформации, причем рост скорости зависит от степени дефектности структуры материала. Так, для аустенизированных образцов, имитирующих возникновение зон локальных деформаций в основном металле, после пластической деформации в 15 % скорость анодного процесса достигает  $0,15 \text{ мкА/см}^2$ ; после 20 % —  $0,3 \text{ мкА/см}^2$  (табл. 2).

Следует отметить, что в этом случае рост скорости анодного процесса эквидистантен росту степени пластической деформации — увеличивается вместе с ростом дефектности структуры. В случае имитации зоны термического воздействия сварного шва ситуация более сложна; изменение скорости

анодного процесса можно разбить на два участка. На первой стадии (примерно до деформации менее 10 %) скорость анодного процесса растет вместе с ростом степени деформации, при достижении 10 %-й деформации наблюдается скачок роста скорости анодного процесса. Этот скачок, вероятно, следует связывать с возникновением в ходе деформирования образцов, имитирующих ЗТВ, микротрещин вокруг карбидных частиц и, как следствие, с резким ростом площади контакта неpassивированного металла стенок трещины с агрессивной коррозионной средой (рисунок).



Зернограницные микротрещины вокруг включения карбида в структуре ЗТВ сварного соединения стали 12X18H12T после деформации в 15 %

Таким образом, установлено, что растягивающие напряжения приводят к росту скорости анодного процесса в основном металле и зонах термического влияния сварных соединений из стали 12X18H12T и могут являться причиной возникновения повреждений металла не только криогенных трубопроводов, но и всего низкотемпературного оборудования по механизму КР.

Учитывая значительные размеры криогенных трубопроводов, сосудов и емкостей, возможность нанесения механических повреждений (царапин, забоин, риск) в ходе плановых осмотров и ремонтов, сложность доступа к ряду элементов оборудования, следует предусмотреть дополнительные мероприятия контроля и особо тщательно прово-

**Таблица 2.** Влияние степени пластической деформации на скорость анодного процесса в основном металле и ЗТВ монтажного сварного шва из стали 12X18H12T

Степень пластической деформации, %	Скорость анодного процесса, $\text{мкА/см}^2$	
	Основной металл	ЗТВ монтажного сварного шва
0	-1,4	-1,3
1	-1,4	-1,2
5	-1,2	-0,9
10	-0,8	+0,2
12	-0,3	+0,3
15	+0,2	+0,4
20	+0,3	—
25	+0,4	—

дить визуальный осмотр поверхностей оборудования на предмет выявления и зашлифовки механических дефектов, так как они могут являться причиной возникновения трещин КР и ускоренного выхода из строя низкотемпературного оборудования, даже при напряжениях, значительно меньших предела текучести материала. Кроме того, в работе установлено, что наиболее склонными к КР являются зоны термического влияния монтажных сварных соединений, при выполнении которых частично или полностью не выполняются требования по восстанавливающей структуре термической обработке зоны ЗТВ. Показано, что отказ от такой термической обработки приводит к возникновению и росту карбидных частиц в структуре ЗТВ, что почти в два раза (с 270 до 150 МПа) снижает уровень напряжений, приводящих к возникновению в ЗТВ склонности к КР.

### Список литературы

1. Кузюмов А. Н., Крикун В. П., Нихаенко Ю. Я. Некоторые особенности коррозионного растрескивания оборудования в сернокислых средах // Защита металлов. 1999. Т. 35. № 3. С. 321–323.
2. Ермаков Б. С., Солнцев Ю. П. Межкристаллитная коррозия — основной фактор ускоренного разрушения оборудования из аустенитных сталей // Балтийские металлы. 2000. № 2. С. 18–21.
3. Ермаков Б. С., Вологжанина С. А., Ярыгин Г. Е. Коррозионная стойкость элементов оборудования космической промышленности. Неразрушающий контроль объектов наземной космической инфраструктуры: Тр. конф. — СПб.: ВКА, 2004. — С. 180–184.
4. Ермаков Б. С., Козаченко А. В. Способ неразрушающего контроля криогенных сосудов и трубопроводов. Материаловедение, пластическая и термическая обработка металлов. — СПб.: Политехника, 2001. — С. 31–32.
5. Роль остаточных деформаций в снижении работоспособности трубопроводов, эксплуатируемых в условиях низких температур. 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 СПбГУ-НИПТ. 2006. № 1. С. 44–47.
6. Эванс Ю. Р. Коррозия и окисление металлов. — М.: Машгиз, 1962. — 855 с.