

ПРОЦЕССЫ СТАРЕНИЯ В НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЯХ И МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ ТРУБ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Ливанова О. В., *Белкин А. А., Филиппов Г. А.

ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва, Россия
*ОАО «ЦТД «ДИАСКАН», г. Луховицы, Московская обл., Россия
iqs12@yandex.ru

В процессе длительной эксплуатации металл трубопроводов подвергаются воздействию рабочих давлений, их циклическим изменениям, коррозионному воздействию транспортируемых продуктов и грунтовых вод, наводороживанию. При этом происходит изменение структурного состояния, приводящее к снижению сопротивления хрупкому разрушению.

Одними из главных факторов снижения эксплуатационной стойкости трубопроводов являются деформационное старение, процессы коррозии, а также снижение параметров сопротивления разрушению. Коррозия приводит к уменьшению толщины стенки трубы и возникновению концентраторов напряжений. Насыщение металла водородом, вызывает образование внутренних дефектов типа микротрещин в местах воздействия локальных микронапряжений [1].

Объектом исследования были выбраны трубы магистральных нефтепроводов (МН) из стали типа 17ГС в исходном состоянии и после эксплуатации до 30 лет. Длительная эксплуатация практически не влияет на стандартные механические свойства, но приводит к снижению структурочувствительных характеристик, таких как работа зарождения Аз и распространения Ар трещины, ударная вязкость, хладостойкость, критическое раскрытие трещины COD. Усредненный уровень снижения данных характеристик представлен в таблице 1.

Таблица 1. Влияние 25 лет эксплуатации на свойства металла труб из стали типа 17ГС

Состояние	σ _B	σ _B	δ, %	Аз	Ар	КСУ ⁻⁴⁰	COD, мм
	МПа			Дж/см ²			
Исходное состояние	564±63	404±43	26±3	17	35	59,5	0,3
25 лет эксплуатации				8,5	25	50	0,2
Снижение свойств, %	не выявлено			50	30	15	44

Эксплуатация трубопроводов создает условия для деформационного старения металла, приводящего к повышению локального сопротивления микропластической деформации и увеличению опасности появления в металле областей с «пиковыми» напряжениями. Вследствие этого уменьшается возможность релаксации локальных напряжений в вершине концентратора напряжений и повышается склонность стали к хрупкому разрушению. Склонность к деформационному старению определяли по приросту предела текучести после прекращения активной деформации и нагрева при 200°С. Для исследования были выбраны трубы из стали марки 17ГС с близким содержанием углерода (0,16–0,19%) и азота (0,006–0,008%). Оказалось, что склонность к деформационному старению металла труб из стали марки 17ГС с увеличением срока эксплуатации уменьшается. Так, после 15–30 лет эксплуатации прирост предела текучести снижается с 91 МПа до 77 МПа.

Склонность к деформационному старению стали зависит от содержания в твердом растворе атомов внедрения в несвязанном с дислокациями состоянии. Для изучения механизма процесса старения металла труб при длительной эксплуатации применяли метод измерения внутреннего трения, как наиболее чувствительный к локальным изменениям структурного состояния стали.

О содержании углерода и азота в твердом растворе можно судить по результатам измерения температурной зависимости внутреннего трения (ТЗВТ). Известно, что на кривой ТЗВТ стали, содержащей углерод и азот в свободном состоянии, вблизи 40-60°C наблюдается максимум Сноека, обусловленный движением свободных атомов внедрения в поле напряжений. Чем больше свободных атомов углерода и азота в твердом растворе, тем выше максимум Сноека.

После эксплуатации в течение 30 лет на кривой ТЗВТ образцов труб из стали 17ГС происходит уменьшение высоты пика Сноека и увеличение высоты максимума при 200–250°C, который наблюдается только в том случае, когда металл подвергнут пластической деформации и последующему старению (рис. 1).

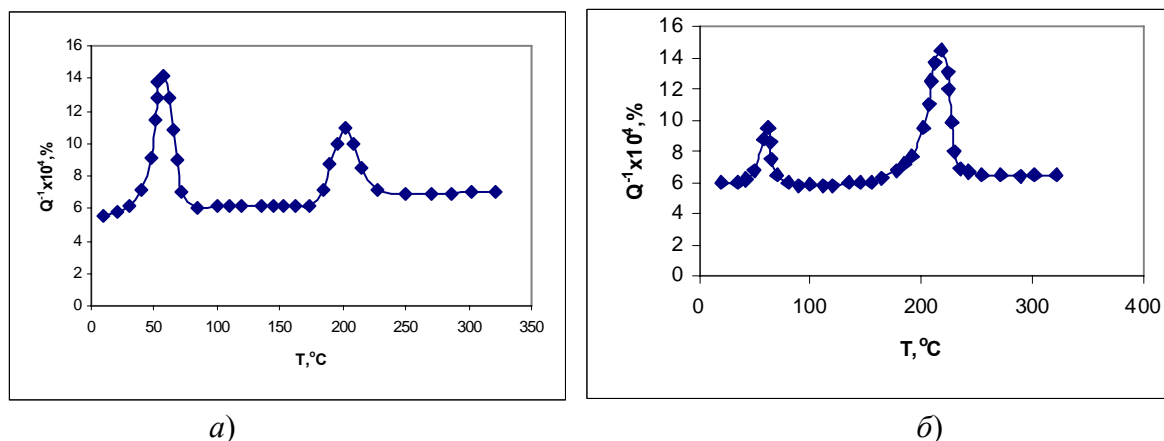


Рис. 1. Температурная зависимость внутреннего трения металла труб из стали 17ГС аварийного запаса (а) и после длительной эксплуатации в течение 30 лет (б)

Как правило, зарождение трещин в трубах МН происходит по месту расположения концентраторов напряжений, а повреждение поверхности трубы сопровождается локальной пластической деформацией. Уменьшение толщины стенки трубы на глубину дефекта может повышать значение окружающих напряжений выше порогового напряжения КРН. Микрорельеф в области стабильной трещины ступенчатый, характерный для коррозионного растрескивания под напряжением (рис. 2, а). Он обусловлен слиянием зародышевых трещин КРН в магистральную. При этом отмечаются множественные бороздки параллельные фронту распространения трещины, соответствующие местам ее остановки (рис. 2, б).

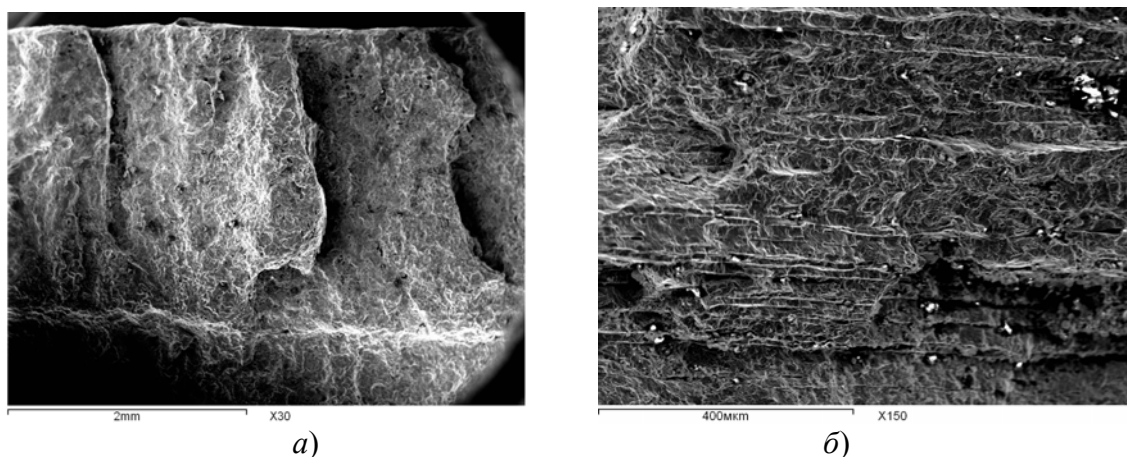


Рис. 2. Коррозионно-усталостная трещина с поверхности трубы МН (а), усталостные бороздки в области стабильной трещины (б)

Установлено, что после инкубационного периода, под воздействием циклически изменяющихся рабочих давлений происходил первоначальный рост микротрещин КРН по механизму анодного растворения металла. При этом вокруг неметаллических включений под воздействием напряжений возникают микропоры, и распространение трещины происходит путем их слияния. Характер излома при этом вязкий чашечный (рис.3,*а*), а конец трещины затуплен. Иногда при эксплуатации трубы с нарушенной гидроизоляцией во влажном грунте создаются условия для образования атомарного водорода, его проникновения в металл и молизация на дефектах. В области распространения трещины наблюдаются участки хрупкого разрушения с множественными вторичными трещинами и фрагментами межзеренного разрушения (рис.3, *б*), трещина тонкая, имеет множественные разветвления, распространяется преимущественно по границам зерен, присутствует «блистеринг». Траектория распространения трещин КРН представляет собой ломаную линию, разрушение идет без следов пластической деформации. В зависимости от конкретных условий эксплуатации реализуется один из данных механизмов КРН. Иногда рост стабильной трещины КРН начинается по механизму анодного растворения, а по мере насыщения стали водородом механизм разрушения меняется.

Под воздействием циклически изменяющихся рабочих давлений происходит удаление продуктов коррозии из вершины трещины, и процесс разрушения протекает быстрее. В изломах аварийных труб имеются наряду с характерными признаками разрушения по механизму КРН [2], присутствуют признаки характерные для разрушения под воздействием циклических нагрузок – усталостные «бороздки».

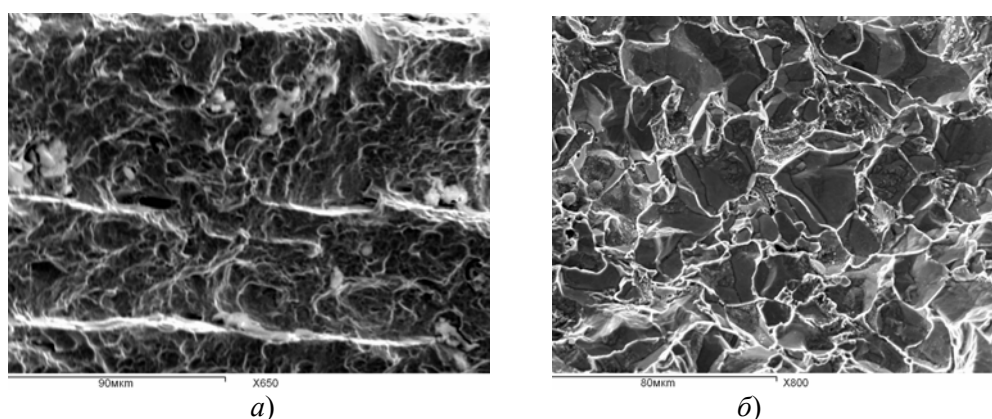


Рис. 3. Микрорельеф поверхности разрушения труб МН в области стабильной трещины КРН: *а*) анодное растворение, *б*) водородное охрупчивание.

Выводы

1. Длительная эксплуатация магистральных трубопроводов практически не влияет на стандартные механические свойства, но приводит к снижению структурочувствительных характеристик, таких как работа зарождения и распространения трещины, ударная вязкость, хладостойкость, критическое раскрытие трещины.

2. Деградация свойств металла труб происходит из-за возникновения локальных микронапряжений, развития процесса деформационного старения и накопления дефектов типа микротрещин.

Список литературы

1. Плешивцев В.Г., Пак Ю.А, Филиппов Г.А., Чевская О.Н, Ливанова О.В. Факторы, влияющие на эксплуатационную надежность трубопроводов// Деформация и разрушение материалов. 2007. №1. С. 6-11
2. Клевцов В.Г., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций.- М.: МИСиС, 2007, 264 с.