

Экспериментальные исследования разрушения труб нефтепроводов с коррозионными дефектами на внутренней поверхности

А. А. Костюченко^а, А. М. Бордовский^а, А. Н. Козик^а, В. В. Воробьев^а,
Л. А. Сосновский^б

^а РУП “Гомельтранснефть Дружба”, Гомель, Беларусь

^б ООО “НПО Трибофатика”, Гомель, Беларусь

Представлены результаты экспериментальных исследований разрушения труб нефтепровода с коррозионными дефектами на внутренних поверхностях стенок. Установлено, что при прогнозировании остаточной долговечности трубы нефтепровода необходимо использовать критерии коррозионно-механического и коррозионно-эрозионного износа.

Ключевые слова: разрушение, коррозионные дефекты, износ.

Введение. Наиболее опасными участками магистральных нефтепродуктопроводов являются подводные переходы, поскольку их разрушение связано с выбросом нефтепродуктов в водную акваторию. Аварийные разрушения подводных переходов магистральных продуктопроводов “Унеча–Вентспилс” (в марте 2007 г. на р. Ула) и “Мозырь–Гомель” (в феврале 2008 г. в пойме р. Днепр) вызвали общественный резонанс и придали проблеме международный статус.

В течение длительного времени возможность протекания коррозионных процессов во внутренней полости труб магистральных нефтепроводов не рассматривалась, хотя такая проблема имеет место на промысловых трубопроводах, транспортирующих сырую нефть.

Изначальная недооценка опасности возникновения внутренней коррозии привела к медленному, но непрекращающемуся развитию коррозионных повреждений на внутренней поверхности труб.

Методами дефектоскопического контроля* установлено, что после эксплуатации в течение более 35–40 лет в резервных нитках подводных переходов нефтепровода обнаруживаются два характерных типа локальных коррозионных повреждений (ЛКП) – в виде овала (рис. 1) и протяженной полоски (рис. 2). Их образование обусловлено скоплением коррозионных компонентов в пониженных малопроточных зонах труб. При этом ЛКП типа протяженной полоски преимущественно развиваются на наклонных участках подводного перехода, тогда как овального типа – на самых низких (донных) участках. Показано, что для ЛКП овального типа характерна так называемая ручейковая коррозия, сосредоточенная на дне овала. Для ЛКП типа протяженной полоски характерно скопление линейных цепочек осповидных повреждений

* Костюченко А. А., Воробьев В. В. Особенности коррозионного повреждения труб нефтепровода после длительной эксплуатации // Динамика, прочность и ресурс машин и конструкций: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. – Киев, 2005. – Т. 1. – С. 162 – 163.

по берегам полосы. И ручейковые и осповидные коррозионные повреждения представляются как местные концентраторы напряжений, в зоне которых появляется и растет разрушающая магистральная трещина (МТ).

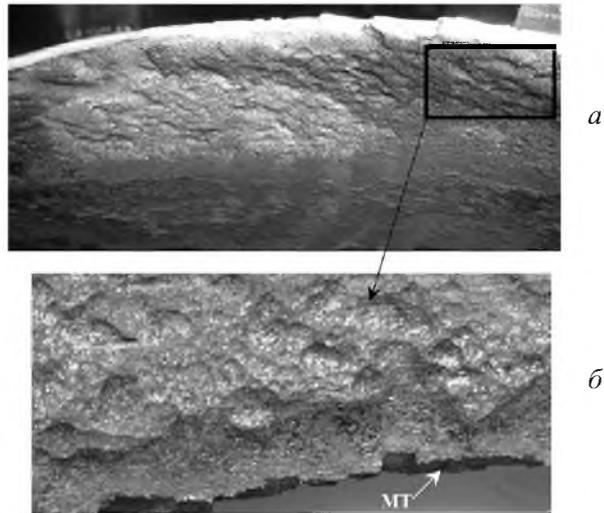


Рис. 1. Локальные коррозионные повреждения овального типа: *а* – характерная картина ручейковой коррозии; *б* – магистральная трещина по дну одного из ручейков.

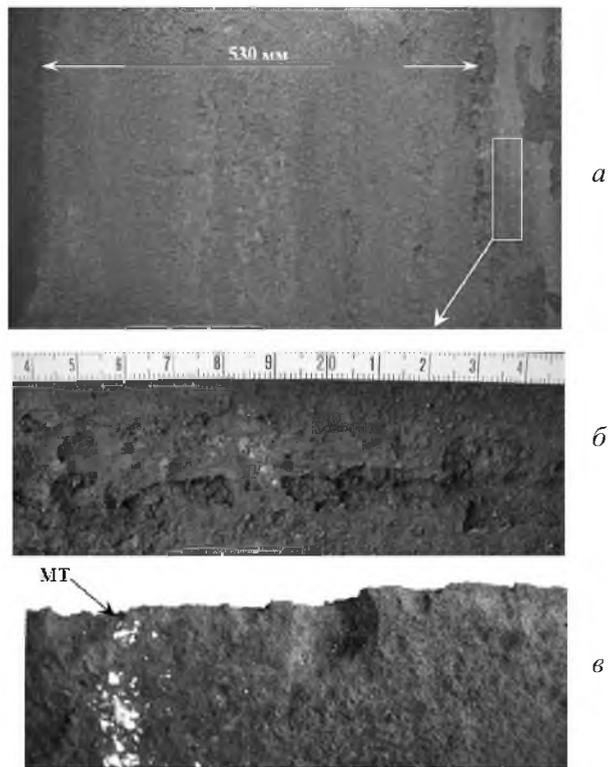


Рис. 2. Локальные коррозионные повреждения типа протяженной полосы: *а* – характерная общая картина повреждения; *б* – фрагмент берега полосы: линейная цепочка осповидных повреждений; *в* – развитие магистральной трещины по цепочке осповидных повреждений.

Методика исследований. Для оценки влияния ЛКП на процессы разрушения разработана методика испытаний натурных длинноразмерных плетей нефтепроводных труб большого диаметра с повреждениями и без них, включающая: контрольно-измерительные процедуры для определения зон расположения, характера и протяженности областей коррозионного повреждения (толщинометрия металла, ультразвуковой контроль сварных швов и т.д.); технологию подготовки отрезков трубы к испытанию (сварка элементов, монтаж системы нагружения внутренним давлением, выбор точек для измерения деформаций, технология наклейки тензорезисторов, монтаж и проверка измерительной системы и т.д.); порядок работы с нагружающими устройствами с обеспечением требований техники безопасности; технологию испытаний; методики измерений, обработки и представления данных. Методика предусматривает испытания труб до разрушения.

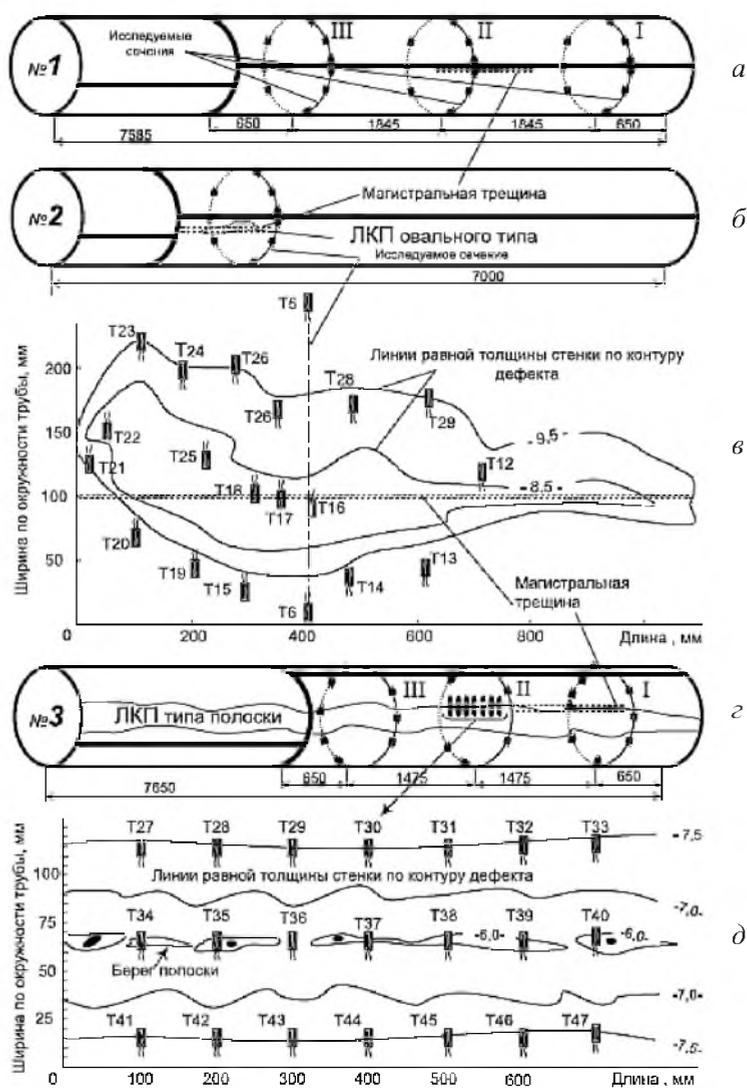


Рис. 3. Испытуемые плети (а, б, в) с ЛКП овального типа (в) и типа протяженной полоски (д).

Для проведения гидравлических испытаний изготавливали плети длиной 7 м из труб диаметром 630 мм, демонтированных с подводных переходов со сроком эксплуатации 40 и более лет (рис. 3). Отобранные плети после дефектоскопического контроля визуальном-измерительным, ультразвуковым и рентгенографическим методами, монтажа к торцам эллиптических днищ помещали на специально оборудованный полигон (рис. 4).

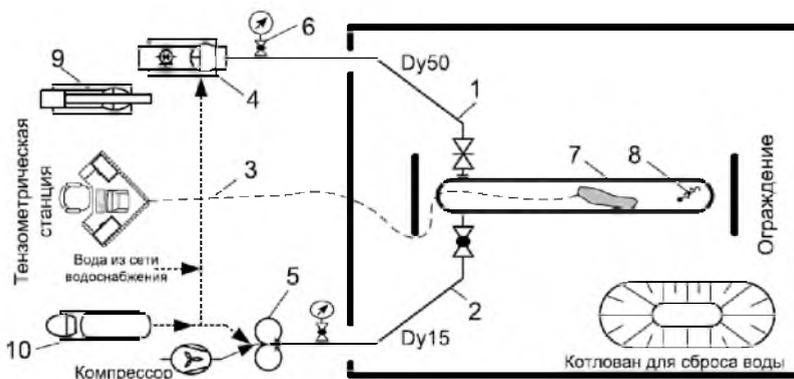


Рис. 4. Схема испытательного полигона: 1, 2 – напорные водоводы; 3 – кабель; 4 – мобильная гидравлическая насосная станция; 5 – пневматическая насосная станция ПНС-1-24; 6 – манометр; 7 – испытываемая плеть; 8 – кран для воздуха; 9 – автомобиль с гидроманипулятором, сварочным постом и ремонтной мастерской; 10 – пожарный автомобиль.

При определении напряжений в металле, в том числе и в зоне коррозионного дефекта, использовали метод тензометрирования.

Методика испытаний имеет следующие особенности:

используются 10-кратные плети, для которых отношение длины трубы L к диаметру D больше 10, что гарантирует разрушение в рабочей зоне, достаточно удаленной от приваренных днищ;

реализуется ступенчатое повышение испытательного давления, что обеспечивает стабилизацию измеряемой деформации при выдержке на каждой ступени и позволяет “уловить” текучесть материала;

предусматривается двухэтапное нагружение испытываемой трубы внутренним давлением (рис. 5): 1-й этап – контрольное нагружение до давления на 15...20% ниже рабочего и полная разгрузка трубы, при этом используется пневматическая насосная станция, обеспечивающая повышенную точность измерения малых давлений, что позволяет надежно оценить стабильность работы и погрешность показаний тензодатчиков; 2-й этап – нагружение до разрушения.

Результаты исследований и их обсуждение. Объектом испытаний служили три плети из труб подводных переходов нефтепровода “Мозырь–Брест” диаметром 630 мм (таблица), рабочее давление составляло 6,4 МПа. Плеть № 1 (сталь 18Г2А) не имела ЛКП, № 2 (та же сталь) – с овальными ЛКП на внутренней поверхности трубы вдоль нижней образующей площадью $\sim 0,25 \text{ м}^2$ и № 3 (сталь 14ХГС) – с ЛКП типа полоски шириной 530 мм по всей длине плети вдоль нижней образующей.

Характеристика испытываемых плетей и параметры разрыва

Характеристика	№ плети		
	1	2	3
Толщина стенки, мм	9	10	8
Срок эксплуатации, лет	43	43	40
Давление разрушения, МПа	12,2	14,1	11,2
Зона и параметры (длина×ширина, мм) разрыва	Вдоль сварного шва (1780×212)	ЛКП овального типа (1340×174)	ЛКП типа полоски (1470×154)
Напряжение при разрушении σ_v , МПа:			
	по сертификату	520	520
по результатам испытаний	466	428	427
Коэффициент запаса прочности труб $\sigma_v/\sigma_{раб}$	2,2	2,2	1,8

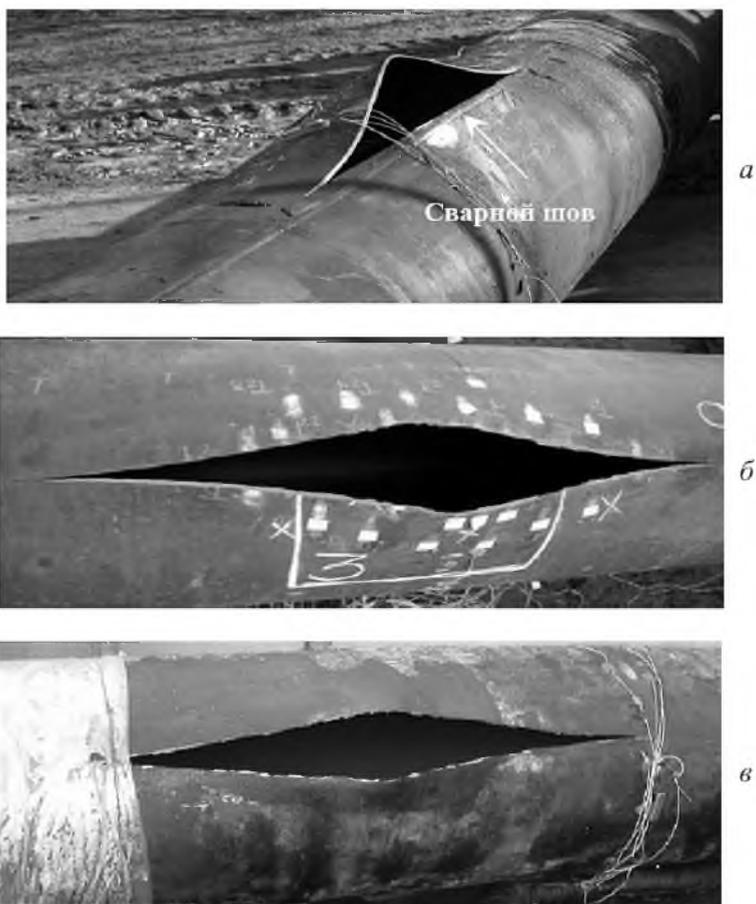


Рис. 5. Характер и зона разрушения плетей: а – плеть № 1, МТ вдоль сварного шва; б – плеть № 2, МТ через дно ЛКП овального типа по коррозионным ручейкам; в – плеть № 3, МТ по линейному скоплению оспообразных повреждений на одном из берегов ЛКП типа полоски.

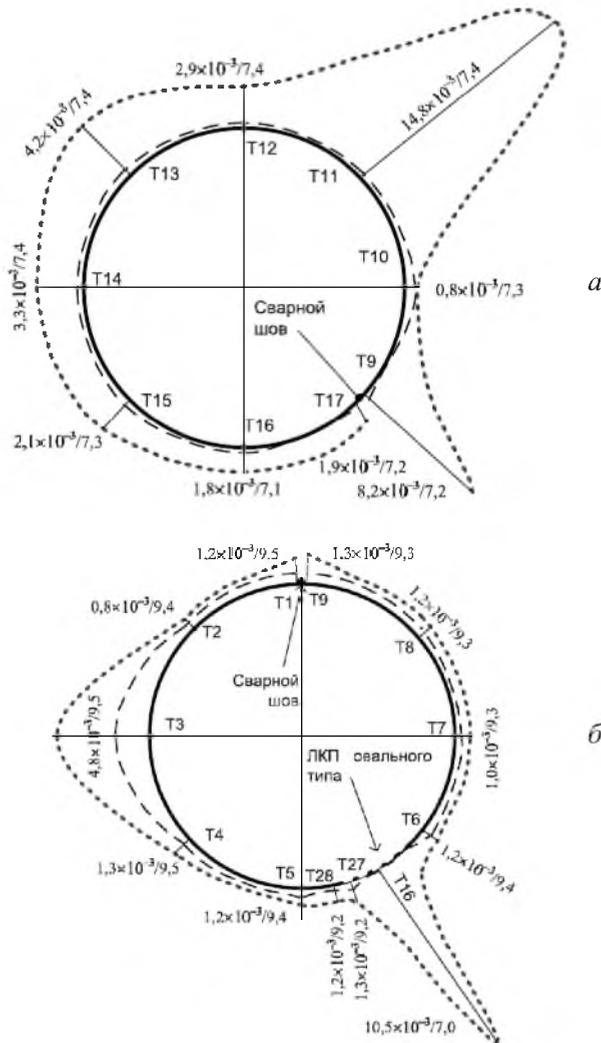
Данные таблицы свидетельствуют о следующем.

1. Несущая способность (прочность) труб с ЛКП лимитируется именно ими, а не сварными соединениями. Снижение предела прочности металла труб с ЛКП составляет по данным эксперимента 8...12%.

2. Исследованные ЛКП хотя и привели к снижению несущей способности труб подводных переходов после 35 лет эксплуатации, но не исчерпали ее: коэффициенты запаса прочности для них равны 1,8...2,2.

Испытания проводили по разработанной методике. Общий вид разрушения (рис. 5) – вдоль образующей, что типично для нефтепроводов (более 90% отказов). Однако разрушение плетей с ЛКП произошло нетипично: не вдоль сварного шва, что наблюдалось при разрушении плети без ЛКП, а по коррозионным повреждениям.

Анализ процессов деформирования труб диаметром 630 мм с ЛКП и без них при испытаниях внутренним давлением позволяет установить следующие особенности развития малых упругопластических деформаций, предшествующих разрушению (рис. 6).



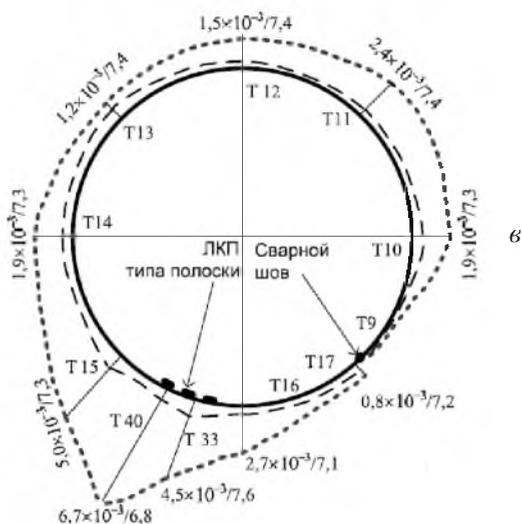


Рис. 6. Распределение относительных окружных деформаций ε по сечению трубы: а, б, в – плети № 1, 2, 3 соответственно. (Цифрами обозначены: измеренная окружная деформация ε /толщина стенки трубы h , мм; T – зоны наклейки тензодатчиков, мм; штрихом показано давление 10 МПа, штрихпунктиром – 6 МПа.)

1. При нагружении плети № 1 без ЛКП ее деформирование оказывается несимметричным: возникло местное выпучивание (окружные деформации увеличены в три раза), это может быть обусловлено тем, что сварной шов выполнен с нарушениями: деформации на одной его стороне ($8,2 \cdot 10^{-3}$) отличаются от деформаций на другой ($1,9 \cdot 10^{-3}$) более чем в три раза (рис. 6,а).

2. При деформировании плети № 2 с ЛКП овального типа установлено резкое местное повышение окружных напряжений (деформаций) в девять раз, что сопровождается значительным выпучиванием трубы в смежной зоне. В данном случае деформации ($\sim 4,8 \cdot 10^{-3}$) в 3,5 раза больше, чем обычно ($\sim 1,2 \cdot 10^{-3}$). Отметим, что состояние сварного шва качественное (деформации по обеим сторонам одинаковы).

3. При деформировании плети № 3 в зоне ЛКП типа полоски наблюдается примерно такое же резкое повышение напряжений (деформаций) в зоне повреждения (\sim в пять раз), обнаруживается местное выпучивание трубы, в зоне которого окружные деформации возрастают до значений порядка $2,5 \cdot 10^{-3}$, т.е. в $\sim 2,6$ раза больше общей деформации. Расхождение в деформациях по обеим сторонам сварного шва составляет $\sim 2,5$ раза ($0,3 \cdot 10^{-3}$ и $0,8 \cdot 10^{-3}$).

Таким образом, упругопластическое деформирование испытанных труб оказывается существенно неравномерным при осесимметричном нагружении внутренним давлением. Это и приводит к образованию магистральной разрушающей трещины. Установлено также, что в ограниченной области ЛКП наблюдается локализация напряженно-деформированного состояния в наиболее слабых точках: деформации возрастают в несколько раз по сравнению с общей деформацией.

Заключение. Установлены особенности коррозионного повреждения труб подводных переходов после длительной (более 35–40 лет) эксплуатации по сравнению с общей (сплошной) коррозией труб линейной части нефтепровода; обнаружены два типа ЛКП – в виде овала и протяженной полосы. Их образование обусловлено скоплением коррозионных компонентов в пониженных малопроточных зонах труб. При этом ЛКП типа полосы преимущественно развиваются на наклонных участках подводного перехода, тогда как овального типа – на самых низких (донных) участках. В зонах ЛКП наблюдаются локализация и местная концентрация напряжений, что приводит к образованию разрушающей трещины.

Результаты испытаний внутренним давлением до разрушения с применением разработанных методики и технологии испытаний впервые показали, что несущая способность (прочность) труб с ЛКП лимитируется указанными выше дефектами, тогда как несущая способность трубы без ЛКП – прочностью сварных соединений. Проведенные экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния труб с ЛКП и без подтвердили, что в дефектных зонах при повышении внутреннего давления повреждаемость металла резко интенсифицируется: деформации (напряжения) в три–пять и более раз выше, чем в зонах без дефектов (при одинаковом давлении). При этом предельное напряжение для труб с ЛКП на 8...12% ниже, чем для труб без них (в условиях опыта).

Таким образом, установлено, что после длительной (более 35 лет) эксплуатации опасными являются не околошовные зоны продольных сварных соединений, а зоны с ЛКП. Поэтому при прогнозировании остаточного ресурса труб подводных переходов необходимо использовать не критерий прочности сварных соединений, а критерий коррозионно-механической прочности, в том числе и коррозионно-механической усталости, поскольку известно, что эксплуатация нефтепроводных труб обуславливает повторно-переменный процесс их нагруженности.

Резюме

Представлено результати експериментальних досліджень руйнування труб нафтопроводу з корозійними дефектами на внутрішніх поверхнях стінок. Установлено, що при прогнозуванні залишкової довговічності труби нафтопроводу необхідно використовувати критерії корозійно-механічного та корозійно-ерозійного зносу.

Поступила 05. 01. 2009