

2. Наиболее чувствительная двухэнергетическая инспекционная система представляет из себя НД (ZnSe(Te)) – ВД (CsI(Tl)). Такая система имеет контрастную чувствительность менее 1% при проникающей способности по стали, равной 25 мм для $U_a = 140$ кВ, и способна разделять органику от неорганики.

3. Дальнейшее развитие радиографических систем с высоким пространственным разрешением планируется путем использования фотодиодных структур с усилителями и коммутатором в одном корпусе с шагом менее 800 мкм.

НТЦ РП НТК «Ин-т монокристаллов» НАН Украины,
ПО «Коммунар», НТ СКБ «Полисвит»,
Харьков

1. *Harrison's R. M.* Digital radiography – a review of detector design // NIM, 1991, A310. – P. 24–34.
2. *Добромыслов В. А., Румянцев С. В.* Радиационная интроскопия. – М.: Атомиздат, 1972.
3. *Кристаллы* сцинтилляторов и детекторы ионизирующих излучений на их основе / Под ред. В.Д. Рыжикова. – Киев: Наук. думка, 1998.
4. *Scintillator-photodiode* detecting systems for two-level X-ray inspection systems / V. D. Ryzhikov, N. G. Starzhinskiy, L. P. Gal'chinetskii, et al. // Proc. of 15th World Conf. on non-destructive testing, Roma, 15–21 October 2000. – P. 466.

Поступила в редакцию
02.02.2001

УДК 621.129.16

ДЕФОРМАЦИОННОЕ СТАРЕНИЕ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ

В. С. ГИРЕНКО, С. Е. СЕМЕНОВ, Л. В. ГОНЧАРЕНКО

Одним из существенных аспектов технической диагностики и оценки остаточного ресурса магистральных трубопроводов является определение возможных изменений служебных характеристик металла в процессе длительной эксплуатации.

В последние годы появилось много работ, в которых рассмотрено ухудшение свойств металла трубопроводов в течение времени как следствие процессов старения. Ограничиваясь только упоминанием об этом¹, заметим, что многообразие явлений старения требует четкой интерпретации сущности протекающих процессов в материалах. Часто употребляемый термин «старение» зачастую не полностью отражает реальную картину. По сути в ряде случаев речь идет не столько о влиянии фактора времени, сколько о реакции трубного металла на испытываемые им воздействия. При широком понимании термина "старение" изменение служебных характеристик металла и сварных соединений трубопроводов может быть связано с различными физико-химическими процессами. В данном случае рассматриваются возможные последствия деформационного старения.

Основное затруднение, которое возникает при попытках непосредственной оценки соответствующих эффектов, обычно обусловлено отсутствием достоверных образцов-свидетелей. Использование результатов тех или иных не вполне целенаправленных побочных испытаний, выполненных ранее, не обеспечивает корректность выводов. Это обусловлено значительным различием свойств, характерным для трубных сталей, являющихся продукцией массового производства. В этом может заключаться одна из причин противоречий между результатами различных исследований [1–4]. Возникающие трудности усугубляются тем, что максимально

возможные изменения свойств в процессе деформационного старения после длительной эксплуатации должны определяться не столько временем, сколько величиной предварительной пластической деформации. При этом наибольшие деформации носят локальный характер, что дополнительно осложняет непосредственную оценку. Исключая из рассмотрения экстремальные случаи, связанные с грубыми нарушениями условий монтажа трубопроводов, подвижками грунта и т. п., целесообразно отметить следующее.

Трубный передел сопровождается холодным деформированием металла, что особенно характерно для производства сварных труб. В современной нормативной документации на трубы для магистральных нефте- и газопроводов нормируется только предельно допустимая величина экспандирования труб (не более 1,2 %). Однако следует иметь в виду, что деформационные процессы в трубном производстве не ограничиваются операцией экспандирования. Они могут быть весьма разнообразными и характеризуются одно- и многократным приложением сосредоточенных либо распределенных силовых нагрузок, различной степенью деформирования по длине и толщине стенки заготовки. Иными словами, при трубном переделе нельзя полностью исключить возможность возникновения повышенных местных пластических деформаций.

Как известно, форма трубной заготовки заметно изменяется в ходе технологического процесса. Это обусловлено многократным деформированием в различных силовых агрегатах (формовочных, сборочных, сварочных и др.), сварочными операциями, а также упругопластической релаксацией внутренних напряжений в периоды, когда частично либо окончательно сформованная трубная заготовка

¹Обсуждение опубликованных работ, посвященных проблеме старения трубного металла, содержится в [1].

лежит либо движется по рольгангу технологического потока.

Контроль величины раздачи трубы по изменению ее периметра не гарантирует от повышенных местных пластических деформаций при экспандировании. При хорошо отлаженном процессе производства к моменту экспандирования подается заготовка, форма поперечного сечения которой мало отличается от правильного круга. Однако, поскольку в районе продольных сварных швов в отдельных случаях возникают местные отклонения от цилиндрической формы, а сварной шов слабо деформируется в процессе экспандирования, локальные пластические деформации в прилегающей к нему зоне могут достигать значительного уровня. Например, при максимально допустимых условиях раздачи труб диаметром 720 мм местные пластические деформации в зоне продольного шва могут достигать 7 %. В отдельных случаях они становятся соизмеримыми с предельной пластичностью металла [5].

Максимальные искажения формы поперечного сечения трубной заготовки наблюдаются на концевых участках (так называемый концевой эффект). Характерно, что значительное количество разрушений при испытаниях и эксплуатации трубопроводов зарождается именно в этих местах. Наименее контролируемы значения возможных пластических деформаций в монтажных условиях. Уровень допустимой пластической деформации ограничивается опосредованно правилами выполнения работ, таких, как холодное гнутье труб или выправление местных искажений формы. Наконец, при эксплуатации пластические деформации, уровень которых зависит от ряда факторов, могут возникать в зоне механических повреждений и коррозионных дефектов, в местах образования гофров и на других участках деформирования металла трубопровода. Оценка возможных эффектов деформационного старения в связи с предварительным холодным пластическим деформированием металла, возникающем на различных этапах производства труб, монтажа и эксплуатации трубопроводов, имеет прямое отношение к определению технического состояния эксплуатируемых магистральных трубопроводов [6].

С учетом сказанного выше предпринята попытка получить дополнительную информацию о возможных изменениях служебных характеристик трубных сталей в результате деформационного старения.

Исследуемые стали и механические испытания. Методика работы определялась стремлением выяснить, насколько серьезной может быть деградация служебных свойств металла магистральных

трубопроводов в процессе длительной эксплуатации в связи с развитием деформационного старения.

Исследования проводились на металле сварных и бесшовных труб диаметром 720 мм с толщиной стенки 8...9 мм, изготовленных из сталей марок 17ГС со следующим массовым содержанием, %: С 0,19; Si 0,49; Mn 1,1; S 0,019; P 0,016 и типа 19Г (С 0,17; Si 0,22; Mn 1,09; S 0,018; P 0,009). Трубы были взяты из запаса — они пролежали на складе более 20 лет и не испытывали монтажных и эксплуатационных воздействий. Исследование их металла позволяло в чистом виде оценить последствия естественного старения после общих деформаций при трубном переделе. Металл этих же труб в дальнейшем подвергался дополнительной пластической деформации и искусственному старению с целью оценки возможных изменений его служебных свойств в зонах концентрации деформаций.

Образцы вырезались из мест, удаленных от сварных швов и концов труб. Чтобы обеспечить полное протекание процесса старения, изготовленные образцы подвергли нагреву при 250 °С в течение 1 ч после предварительной пластической деформации растяжением на 2, 5 и 10 %. Из состаренного металла для определения прочностных и пластических характеристик при растяжении изготавливались цилиндрические образцы по ГОСТ 10006, для определения ударной вязкости (KCV) — образцы с острым надрезом, тип 13, по ГОСТ 9454.

Результаты механических испытаний приведены в табл. 1. Для сравнения в ней представлены механические свойства металла в исходном состоянии непосредственно тех труб, металл которых подвергался старению. Можно видеть, что деформационно-термическая обработка приводит к закономерным явлениям упрочнения и понижения характеристик вязкости исследованных материалов, характерных для состаренных конструкционных сталей подобного типа.

Сопротивление трубных сталей вязким разрушениям. В условиях ограниченно низких эксплуатационных температур при небольших толщинах стенок трубопроводов (до 10...12 мм) основное значение приобретают характеристики сопротивляемости применяемых материалов вязким разрушениям.

В соответствии с представлениями механики разрушения и практическим опытом очаги разрушения обычно связывают с наличием трещиноподобных или объемных дефектов. К первым могут быть отнесены слоисто-вязкое растрескивание [7] с характерным «шиферным» изломом в зоне возникновения разрушения, а также трещины коррозионного или малоциклового происхождения. Различ-

Таблица 1. Свойства трубной стали после деформационного старения

Состояние металла труб	Сталь марки 17ГС				Сталь типа 19Г			
	σ_t , МПа	σ_b , МПа	KCV, Дж/см ²		σ_t , МПа	σ_b , МПа	KCV, Дж/см ²	
			0 °С	60 °С			0 °С	60 °С
Исходное состояние	428,1	605,2	34,7	80,0	308,5	533,5	60,5	110,0
Деформация 2 %, отпуск при T = 250 °С 1 ч	553,5	628,0	24,0	63,0	469,7	560,7	38,8	102,0
Деформация 5 %, отпуск при T = 250 °С 1 ч	624,9	651,8	14,2	61,0	536,1	584,6	20,1	60,0
Деформация 10 %, отпуск при T = 250 °С 1 ч	695,0	706,0	14,0	60,0	641,7	653,0	12,1	52,0

Таблица 2. Влияние деформационного старения на характеристики сопротивления вязкому разрушению

Состояние металла труб	Сталь марки 17ГС					Сталь типа 19Г				
	σ_b/σ_t	δ_i , мм	$tg \alpha$	ϵ_b	n	σ_b/σ_t	δ_i , мм	$tg \alpha$	ϵ_b	n
Исходное состояние	1,41	0,09	0,13	0,16	0,14	1,73	0,13	0,20	0,19	0,16
Деформация 2 %, отпуск при $T = 250^\circ C$ 1 ч	1,14	0,07	0,05	0,09	0,08	1,19	0,13	0,09	0,13	0,12
Деформация 5 %, отпуск при $T = 250^\circ C$ 1 ч	1,04	0,07	0,04	0,08	0,07	1,09	0,08	0,05	0,09	0,08
Деформация 10 %, отпуск при $T = 250^\circ C$ 1 ч	1,02	0,06	0,02	0,03	0,03	1,02	0,06	0,01	0,02	0,02

ные формы коррозионных потерь металла классифицируют как объемные дефекты.

При наличии трещиноподобных дефектов трещиностойкость материала определяется его сопротивлением иницированию и росту вязкой трещины вплоть до образования сквозного разрыва. Первая стадия, как известно, может быть охарактеризована деформационным критерием δ_i — значением раскрытия вершины дефекта в момент иницирования вязкой трещины [8]; вторая — модулем разрыва или углом раскрытия трещины (COA) [9, 10].

Для определения критерия δ_i использованы подходы работ [11, 12], получившие широкую проверку [13]. Они предусматривают оценку этого параметра по величине ударной вязкости при испытаниях образцов Шарпи типа 11 (сечением 10×10 мм) по ГОСТ 9454–78, а также значениям предела текучести σ_t и временного сопротивления σ_b :

$$\delta_i = K \frac{\frac{\sigma_t}{\sigma_b} KCV_m}{1 + 0,33 \frac{\sigma_b}{\sigma_t}} \quad (1)$$

Здесь KCV_m — значение удельной работы разрушения на «верхнем шельфе» температурной зависимости ударной вязкости при 100 % волокна в изломе; коэффициент $K = 0,075$ для образцов типа 11 по ГОСТ 9454–78.

Однако использование образцов этого типа при диагностике тонкостенных трубопроводов невозможно. Для образцов типа 13 по ГОСТ 9454 необходима корректировка коэффициента K , учитывающая изменение ударной вязкости при уменьшении толщины образца, в условиях вязкого состояния материала, за счет смягчения объемности напряженного состояния (рис. 1). Выполненные исследова-

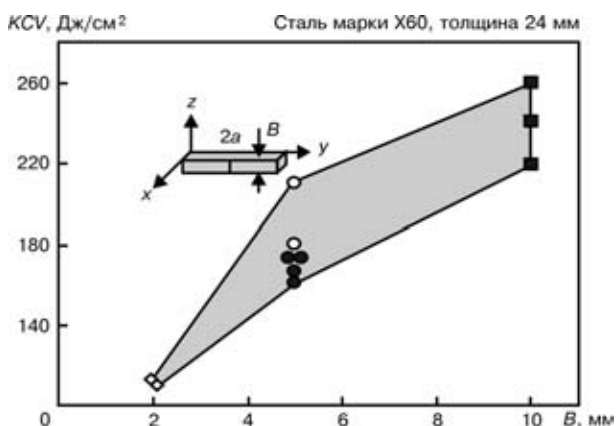


Рис. 1. Влияние толщины образца на значения ударной вязкости на «верхнем шельфе».

ния показали, что коэффициент K должен быть увеличен в 1,35 раза ($K = 0,1$).

Тангенс угла раскрытия трещины (COA) также может быть выражен через стандартные механические характеристики [10]:

$$tg \alpha = 0,5 \frac{\sigma_b}{\sigma_t} \frac{n}{(1-n)^2} \quad (2)$$

где n — коэффициент деформационного упрочнения (табл. 2), который связан с деформацией ϵ_b , соответствующей временному сопротивлению:

$$n = \frac{\epsilon_b}{1 + \epsilon_b}$$

Физический смысл этого критерия ($tg \alpha$) следующий: чем больше подрастание трещины в результате ее раскрытия при увеличении нагрузки, тем меньше угол ее раскрытия и, соответственно, ниже сопротивление материала развитию вязкого разрушения.

В случае объемных дефектов в виде гладкопрофильных коррозионных выемок основным критерием сопротивления вязким разрушениям является критическая деформация $\epsilon_c = \epsilon_b$, соответствующая потере пластической устойчивости материала в условиях растяжения. Она связана с отношением стандартных характеристик σ_b/σ_t .

Влияние предварительной пластической деформации и старения на характеристики δ_i , $tg \alpha$, ϵ_b приведено в табл. 2 и на рис. 2.

Переходя к обсуждению результатов, необходимо прежде всего остановиться на рассмотрении исходного состояния металла на примере стали 17ГС, взятого из трубы аварийного запаса.

Механические свойства и ударная вязкость образцов стали 17ГС соответствуют нормативным требованиям, что непосредственно указывает на отсутствие серьезных изменений в стандартных свойствах после предварительной деформации при трубном переделе и длительного вылеживания трубы (в течение 20 лет). Более того, механические свойства труб из запаса не существенно отличаются от свойств металла, претерпевшего эксплуатационные воздействия в течение такого же срока службы нефтепровода [1].

Таким образом, следует отметить, что общее состояние металла труб, связанное с их деформированием при изготовлении, является вполне удовлетворительным. На этом фоне может быть оценено влияние более значительных локальных пластических деформаций, возникновение которых в отдельных случаях, как отмечалось, нельзя исключить. Наиболее существенным является тот факт, что уже после сравнительно небольшой 2 %-й

деформации и старения предельная деформация ϵ_b и характеристика сопротивления развитию вязкой трещины $\text{tg } \alpha$ исследованных сталей снижаются очень резко (табл. 2, рис. 2). Интересно отметить, что при увеличении предварительной пластической деформации до 5 % этот процесс несколько замедляется. В случае больших предварительных деформаций (10 %) все характеристики сопротивления вязким разрушениям падают до катастрофически низких значений.

Переходя к интерпретации полученных результатов применительно к задачам технической диагностики нефтепроводов, целесообразно подчеркнуть следующее.

С одной стороны, нет достаточных оснований говорить о том, что процесс старения и соответственно деградация служебных свойств металла трубопроводов в условиях длительной эксплуатации при отсутствии водородного охрупчивания или других химико-механических воздействий может привести к негативным последствиям общего характера.

С другой стороны, как отмечалось, нельзя полностью исключить возможность существования в трубопроводе локальных областей, претерпевших повышенные пластические деформации. Соответственно к эксплуатационным дефектам, расположенным в потенциально опасных зонах, нужно подходить с повышенной осторожностью. Кроме того, при определенных условиях пластические деформации могут возникать под эксплуатационными дефектами.

Поскольку основные характеристики трещиностойкости даже после незначительных пластических деформаций и старения резко уменьшаются, надежность трубопровода с дефектами может существенно снизиться в результате деформационного старения. Это необходимо учитывать при расчетной оценке допустимых размеров эксплуатационных дефектов в трубопроводах.

ВЫВОДЫ

1. Деформационное старение даже при сравнительно небольшом значении предварительной холодной пластической деформации (2 %) существенно понижает характеристики сопротивления вязкому разрушению (ϵ_b , $\text{tg } \alpha$) исследованных сталей, широко применявшихся в прежние годы для изготовления сварных (17ГС) и бесшовных (типа 19Г) труб большого диаметра.

Следует особо подчеркнуть, что деформационное старение может значительно облегчить возникновение и подрастание вязких трещин в металле трубопроводов.

2. Высокий уровень механических свойств металла исследованных труб диаметром 720 мм из указанных сталей после продолжительной выдержки без эксплуатационной нагрузки свидетельствует в целом об относительно слабом влиянии трубного передела на процессы старения металла, протекающие в естественных условиях.

Данный вывод не следует распространять на сварные трубы производства конца 50-х — начала

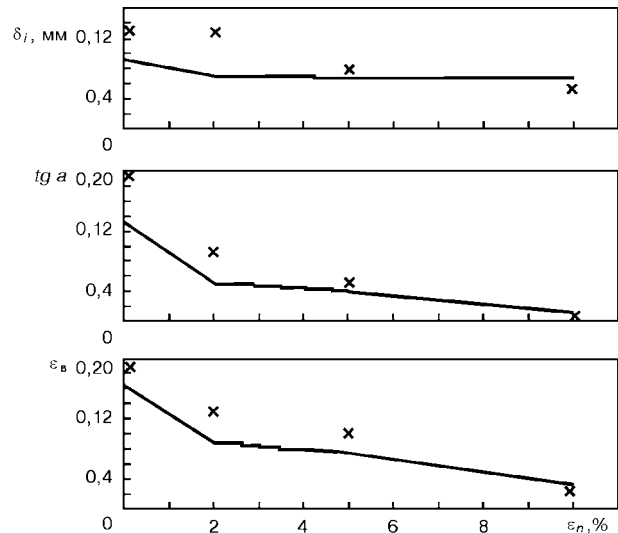


Рис. 2. Влияние предварительной деформации и старения на характеристики пластичности и трещиностойкости стали 17ГС (X — стали типа 19Г).

60-х годов, которые экспандировались на значение 2 % и более. Требуют специального изучения эффекты деформационного старения труб из сталей с высоким отношением предела текучести к временному сопротивлению.

3. Вследствие деформационного старения могут весьма существенно понижаться служебные свойства трубного металла на отдельных участках холодного пластического деформирования. К последним можно отнести зоны выправления местных искажений формы при изготовлении (экспандировании) труб («угловатость» сопряжения кромок в районе продольных сварных швов) или при монтаже трубопроводов (вмятины, перегибы на концевых участках труб, зоны максимальной деформации труб холодного гнутья, «гофры» и др.).

Обусловленное значительными местными пластическими деформациями и деформационным старением ухудшение характеристик сопротивления разрушению может наблюдаться также в зонах коррозионных повреждений трубопроводов.

4. Возможные последствия деформационного старения следует принимать во внимание при расчетной оценке допустимых размеров эксплуатационных дефектов в трубопроводах.

1. *О старении* и оценке состояния металла эксплуатируемых магистральных трубопроводов / Б. Е. Патон, С. Е. Семенов, А. А. Рыбаков и др. // Автомат. сварка. — 2000. — № 7. — С. 3–12.
2. *Старение* труб нефтепроводов / А. Г. Гумеров, Р. С. Зайнуллин, К. Н. Ямалеев, А. В. Росляков. — М.: Недра, 1995. — 216 с.
3. *Прогнозирование* остаточного ресурса прочности магистральных газонефтепроводов с учетом продолжительности эксплуатации / Ю. И. Пашков, Ю. И. Анисимов, Г. А. Ланчаков и др. // Строит. трубопроводов. — 1996. — № 2. — С. 2–5.
4. *Тарлинский В. Д., Головин С. В.* Экспериментальная оценка свойств металла длительно эксплуатируемых газопроводов // Там же. — 1997. — № 1. — С. 29–32.
5. *Пашков Ю. Н.* Трещиностойкость сварных труб для газопроводов: Автореф. ... дис. д-ра техн. наук — М., 1996.

(Окончание на с. 45).

6. *Kip'yan V. I.* До подовження терміну експлуатації магістральних трубопроводів, які відпрацювали свій нормативний строк. — Механіка і фізика руйнування будів. матер. та конструкцій. — Вип. 3. — 1998. — С. 21–24.
7. *Слоистое, слоисто-хрупкое и слоисто-вязкое разрушение сварных соединений / В. С. Гиренко, А. В. Бернацкий, М. Д. Рабкина, Н. П. Коржова // Пробл. прочности. — 1987. — № 3. — С. 70–76.*
8. *Crack opening displacement (COD) testing. BS 5762:1979.*
9. *Суратори М., Миєси Т., Мицусита Х.* Вычислительная механика разрушения. — М.: Мир, 1986. — С. 71.
10. *Гиренко В. С., Дядин В. П.* Корреляция характеристик трещиностойкости материалов и сварных соединений с результатами стандартных механических испытаний // Автомат. сварка. — 1990. — № 6. — С. 1–4.
11. *Гиренко В. С., Дядин В. П.* Зависимости между ударной вязкостью и критериями механики разрушения δ_{ic} , K_{1c} конструкционных сталей и их сварных соединений // Там же. — 1985. — № 9. — С. 14–15.
12. *Гиренко В. С., Дядин В. П.* Зависимости между ударной вязкостью и критериями механики разрушения конструкционных материалов и их сварных соединений // Там же. — 1986. — № 10. — С. 61–62.
13. *Phaal R., Madnald K. A., Brown P. A.* Correlations between fracture toughness and charpu impact energe. — 1993, Dok. 5605/7/93.

*Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
Киев*

*Поступила в редакцию
14.05.2001*