

Эксплуатационные изменения свойств трубной стали в нефтедобыче

В.В. Шайдаков

д.т.н., профессор кафедры прикладной гидромеханики¹

v1v2sh50@yandex.ru

К.В. Чернова

к.т.н., доцент кафедры электроэнергетики²

chernova-k@yandex.ru

¹ФГБОУ ВО УГАТУ, Уфа, Россия

²ФГБОУ ВО ТИУ, Тобольск, Россия

В статье представлены результаты лабораторных исследований образцов стали 20 из трубы без эксплуатации и из трубы трубопровода, отработавшего на перекачке сероводородосодержащей нефти восемь лет. Проведены испытания на ударный изгиб, металлографические исследования, фрактографический анализ. Установлена степень деградации стали 20 в эксплуатационных условиях, которая совместно с локальной коррозией может стать причиной аварийных ситуаций.

Ключевые слова

трубопровод, сероводородосодержащая нефть, испытания на ударный изгиб, металлографические исследования, фрактографический анализ, микроструктура стали

Добыча сероводородосодержащей нефти осложняется значительной аварийностью трубопроводных коммуникаций и технологического оборудования вследствие коррозионного поражения. Причем эксплуатационные изменения свойств стали, как правило, не учитываются.

С целью оценки изменения свойств трубной стали в процессе эксплуатации были проведены испытания на ударный изгиб образцов труб, не подвергнувшихся эксплуатации, и труб эксплуатировавшихся в сероводородосодержащей нефти в течение 8 лет. Содержание сероводорода составляло 400–1300 мг/л [2]. Образцы вырезаны из труб 159х7, материал — сталь 20 (рис. 1).

Испытания проводили по ГОСТ 9454-78 при температурах +20°C и -40°C. Результаты испытаний представлены в таб. 1. В проведении экспериментальных исследований принимали участие А.В. Емельянов, Н.К. Ценев, А.А. Масланов.

Среднее значение ударной вязкости образцов стали 20 неэксплуатировавшейся трубы при температуре испытаний +20°C ниже, чем той же стали после воздействия сероводородосодержащей среды (таб. 1). В то время как при температуре испытаний -40°C среднее значение ударной вязкости ниже для стали трубы, подвергшейся восьмилетней эксплуатации.

Далее были проведены металлографические исследования микроструктуры

сравниваемых образцов. Для этого применялся метод световой микроскопии, позволяющий получить информацию о строении, размерах, форме, взаимном расположении зерен, включений и дефектах кристаллической структуры.

Исследовались две группы образцов: из трубы, не претерпевшей эксплуатационного воздействия (№ 1, 6, 7 и 10) и трубы после восьми лет эксплуатации (№ 3', 4', 7' и 10'). Исследования проводили на специально изготовленных шлифах, которые получали путем разрезки металла труб в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Анализ микроструктуры проводили с помощью оптического микроскопа «Eriquant». Размер структурных составляющих стали 20 определяли методом секущих на базе измерения 100–200 зерен в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Результаты представлены в таб. 2.

Микроструктура стали всех образцов представляет собой двухфазную смесь ферритных и перлитных зерен. Количество перлита составляет 20–25% от общей площади шлифа, что соответствует микроструктуре доэвтектоидной углеродистой стали «Сталь 20» (содержание углерода 0,2%) в равновесном состоянии. Для обеих групп образцов стали структура достаточно однородна и изотропна. Принципиальной разницей структуры является различие в размерах зерен феррита и перлита.

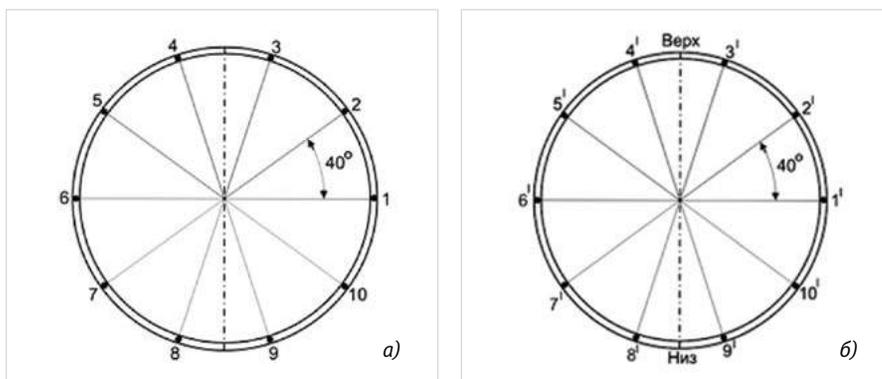


Рис. 1 — Схема расположения вырезанных образцов
а) не эксплуатировавшаяся труба; б) труба после 8 лет эксплуатации
Fig. 1 — The arrangement of cut samples:
a) the tube, not being in operation; b) the tube after the eight-year maintenance

№ образца	Ударная вязкость образцов из не эксплуатировавшейся трубы KCV_i^0 , Дж/см ²		№ образца	Ударная вязкость образцов из эксплуатировавшейся трубы KCV_i^1 , Дж/см ²	
	+20°C	-40°C		+20°C	-40°C
1, 6	90,0	61,2	1', 6'	101,2	50,8
2, 5	91,8	55,1	2', 5'	100,8	24,8
3, 4	88,0	66,6	3', 4'	113,4	20,2
7, 10	102,1	32,0	7', 10'	89,1	84,9
8, 9	96,0	36,4	8', 9'	103,7	23,0
Среднее KCV^0	93,58	50,26	Среднее KCV^1	101,64	40,74

Таб. 1 — Значения ударной вязкости образцов из стали 20
Tab. 1 — The impact number of the steel 20 tube sample

Так, в структуре стали образцов № 1 и 7, испытанных при +20°C, средний размер зерен составил 10,0±1,0 мкм, а для образцов № 3' и 7' — 5,0±0,5 мкм. Образцы, испытанные при -40°C, имеют средний размер зерен для № 6 и 10 — 10,2±1,0 мкм, для № 4' и 10' — 5,3±0,4 мкм.

Видно, что в пределах каждой группы, независимо от температуры испытания образцов, размер зерен одинаков. Однако механические испытания на ударный изгиб показали, что среднее значение ударной вязкости выше на 8,1 Дж/см² в случае образцов с мелкозернистой структурой для испытаний при +20°C и ниже на 9,5 Дж/см² — для испытаний при -40°C. Кроме того, показано, что механические испытания при отрицательной температуре (-40°C) приводят к значительному снижению ударной вязкости: для образцов со средним размером зерна 10,0 мкм — в среднем на 43,3 Дж/см², для образцов со средним размером зерна 5,0 мкм — на 60,9 Дж/см².

Известно, что пластическая деформация металлов осуществляется за счет реализации двух механизмов: скольжения дислокаций и двойникования. Пониженная скорость деформации при ударных испытаниях способствует развитию двойникования и перемещению множества дислокаций по большому числу систем скольжения. Мелкозернистая структура имеет более развитую поверхность границ зерен по сравнению с крупнозернистой. При движении дислокаций границы зерен являются значительным препятствием для их скольжения. Для преодоления таких барьеров необходим более высокий уровень напряжения для продолжения деформации. Кроме этого, увеличение числа границ на пути развивающейся внутри кристаллической решетки трещины затрудняет ее перемещение. С этим связаны более высокие значения ударной вязкости в образцах стали с мелкозернистой структурой.

Понижение температуры испытания до отрицательных значений, высокая скорость деформации, как правило, приводят к значительному снижению ударной вязкости, что очень характерно для сталей с ферритно-перлитной структурой и типично для металлов с объемно-центрированной кристаллической решеткой.

Кривая зависимости ударной вязкости от температуры характеризуется температурой хрупко-вязкого перехода T_{xp} . Зная T_{xp} и рабочую температуру T_p испытуемой стали, можно оценить ее температурный запас вязкости χ_m :

$$\chi_m = \frac{T_p - T_{xp}}{T_p}$$

Чем больше χ_m , тем меньше опасность хрупкого разрушения.

Таким образом, исследование структуры и механических свойств стали 20 показало, что главными факторами, влияющими на величину ударной вязкости (в данном случае) являются размер зерна и температура испытания.

В связи с этим корректнее сравнивать относительные изменения значения ударной вязкости при снижении температуры χ , а не ее абсолютные значения.

$$\chi = \frac{KCV_{+20^\circ C}}{KCV_{-40^\circ C}}$$

где $KCV_{+20^\circ C}$ — среднее значение ударной вязкости стали при +20°C, Дж/см²;

$KCV_{-40^\circ C}$ — среднее значение ударной вязкости стали при -40°C, Дж/см².

Поскольку показатель χ характеризует изменение значения ударной вязкости стали идентичной структуры, то он позволяет количественно оценить деградацию ее механических свойств в процессе эксплуатации. Так, для стали, не подвергшейся эксплуатационным воздействиям, величина χ_0 составила 1,86, а для стали после эксплуатации $\chi_1 = 2,49$.

Степень старения металла вследствие охрупчивания (C) может быть оценена по изменению коэффициента χ :

$$C = \frac{\chi_1 - \chi_0}{\chi_1} \cdot 100\% = \frac{2,49 - 1,86}{2,49} \cdot 100\% = 25,3\%$$

Таким образом, степень старения стали 20 после восьми лет эксплуатации составила 25,3%. Это указывает на то, что время эксплуатации в сероводородсодержащей среде влияет на относительную величину охрупчивания. Для подтверждения полученных данных рассмотрим результаты фрактографического анализа поверхности разрушения образцов после испытаний на ударный изгиб.

Фрактографический анализ поверхности разрушения стали после испытаний на ударный изгиб (рис. 2–5) позволил установить ряд характерных особенностей микрорельефа поверхности при температурах испытаний +20°C и -40°C. Отметим, что для всех образцов, независимо от того эксплуатировалась труба или нет, наблюдается вязко-хрупкий излом при температуре +20°C (рис. 2 и 4). В образцах четко просматривается граница хрупко-вязкого перехода. Однако величина хрупкой составляющей в образцах из трубы, не подвергшейся воздействию сероводородсодержащей среды, составляет около 45% от общей площади поверхности разрушения (рис. 2), а в образцах стали после эксплуатации — около 70% (рис. 4). Вязкий излом характеризуется совокупностью отдельных ямок. Для хрупкого излома характерно появление фасеток скола и ручьевого узора.

Интересные особенности изменения рельефа поверхности разрушения наблюдаются в образцах стали, испытанных при температуре $t = -40^\circ C$ (рис. 3 и 5). Снижение температуры деформации приводит к незначительному увеличению доли хрупкой составляющей (до 55% от общей площади поверхности разрушения) в образцах не эксплуатировавшейся

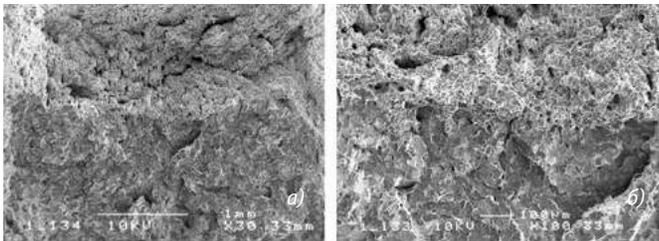


Рис. 2 — Микрорельеф поверхности разрушения образцов стали, не претерпевшей эксплуатационного воздействия: а) $\times 30$; б) $\times 100$; $t_{исп.} = +20^\circ C$

Fig. 2 — The break surface microrelief of the steel sample, not being in operation: а) $\times 30$; б) $\times 100$; $t_{test} = +20^\circ C$

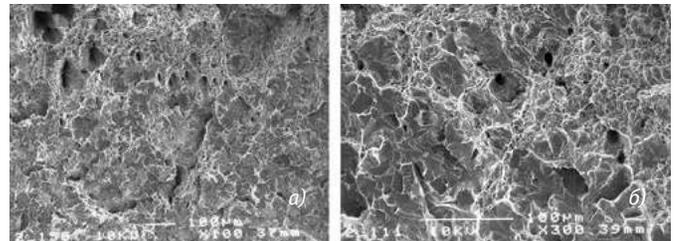


Рис. 3 — Микрорельеф поверхности разрушения образцов стали, не претерпевшей эксплуатационного воздействия: а) $\times 100$; б) $\times 300$; $t_{исп.} = -40^\circ C$

Fig. 3 — The break surface microrelief of the steel sample, not being in operation: а) $\times 100$; б) $\times 300$; $t_{test} = -40^\circ C$

№ образца	Средний размер зерна d_3 , мкм *		Ударная вязкость KCV , Дж/см ²
	→	↑	
1	10,0	10,3	90,0
6	10,6	10,5	61,2
7	10,5	9,3	102,1
10	10,2	9,8	32,0
3'	5,0	5,1	113,4
4'	5,3	5,2	20,2
7'	5,2	5,4	89,1
10'	5,3	5,4	84,9

* Примечание: → — в направлении параллельном оси трубы, ↑ — в направлении перпендикулярном оси трубы

Таб. 2 — Размер зерен и значения ударной вязкости стали 20
Tab. 2 — The grain size and the impact number of the steel 20 tube sample

трубы (рис. 3). Важно отметить, что глубина ямок, характеризующих вязкий излом, значительно уменьшается при снижении температуры испытаний. В образцах стали трубы, подвергшейся восьмилетней эксплуатации, относительная величина хрупкого излома при температуре $t = -40^\circ\text{C}$ составляет более 90% от общей площади разрушения (рис. 5). Вязкий излом характеризуется совокупностью мелких ямок.

Таким образом, результаты фрактографического анализа и механических испытаний на ударный изгиб показали, что эксплуатация в сероводородсодержащей среде приводит, по существу, к повышению температуры хрупко-вязкого излома, поскольку при отрицательных температурах величины относительных составляющих вязкого и хрупкого излома заметно отличаются. В образцах стали, подвергшейся воздействию сероводородсодержащей среды, величина хрупкой составляющей при температуре ударного разрушения $t = -40^\circ\text{C}$ превышает 90%, что и является основной причиной повышения коэффициента χ .

Итоги

Подтверждено совместное воздействие охрупчивания металла и локальной коррозии на эксплуатационные характеристики металла труб.

Выводы

1. Микроструктура образцов стали 20 из трубы, не находившейся в эксплуатации, и трубы после восьмилетней эксплуатации, представляет двухфазную смесь ферритных зерен и перлитных колоний. Наблюдается различие в размерах зерен феррита и перлита. В первом случае средний размер зерен составил $10,0 \pm 1,0$ мкм, а для стали после эксплуатационной наработки — $5,0 \pm 0,5$ мкм.
2. В качестве показателя оценки охрупчивания металла трубы в процессе ее эксплуатации в сероводородсодержащей среде был выбран коэффициент относительного изменения значения ударной вязкости при снижении температуры χ .
3. Сопоставлением ударной вязкости металла трубы, не находившейся в эксплуатации, и трубы, подвергшейся воздействию сероводородсодержащей среды, обнаружены

признаки охрупчивания стали в процессе эксплуатации. Оно выразилось в повышении коэффициента χ на 25,3% (степень охрупчивания).

4. Наличие охрупчивания металла трубы в процессе эксплуатации подтвердилось результатами фрактографического анализа поверхности разрушения образцов после испытаний на ударный изгиб.
5. Совместное воздействие охрупчивания металла и локальной коррозии может быть причиной значительных аварийных ситуаций на трубопроводах перекачивающих сероводородсодержащую продукцию скважин.

Список литературы

1. Nakasugi H., Matsuda H. Development of New Dine-Pipe Steels for Sour Gas Servis // Nippon Steel. Techn. rep. 1979. №14. pp. 66–78.
2. Кудасов В.В., Масланов А.А., Шайдаков В.В. и др. Сбор и подготовка сернистой нефти. Под общей ред. В.В. Шайдакова. Уфа: Монография, 2005. 129 с.

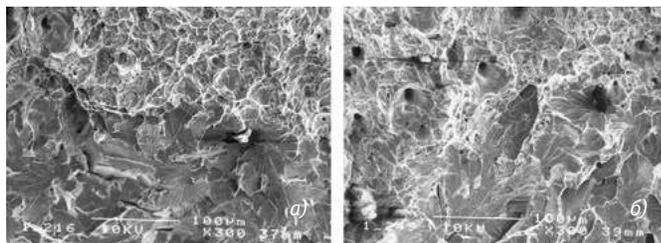


Рис. 4 — Микрорельеф поверхности разрушения образцов стали после восьми лет эксплуатации: а) и б) $\times 300$; $t_{\text{уч.}} = +20^\circ\text{C}$

Fig. 4 — The break surface microrelief of the steel sample after the eight-year maintenance: а) $\times 300$; б) $\times 300$; $t_{\text{test.}} = +20^\circ\text{C}$

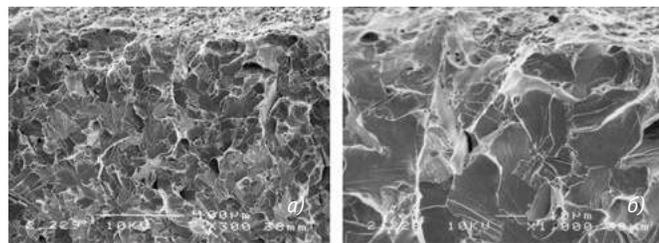


Рис. 5 — Микрорельеф поверхности разрушения образцов стали после восьми лет эксплуатации: а) $\times 300$; б) $\times 1000$; $t_{\text{уч.}} = -40^\circ\text{C}$

Fig. 5 — The break surface microrelief of the steel sample after the eight-year maintenance: а) $\times 300$; б) $\times 1000$; $t_{\text{test.}} = -40^\circ\text{C}$

ENGLISH

PIPELINE

Tube steel operation properties changes in oil production

UDC 621.643

Authors:

Vladimir V. Shaidakov — Sc.D., professor applied hydromechanics department¹; v1v2sh50@yandex.ru

Katerina V. Chernova — Ph.D., associate professor electrical energy department²; chernova-k@yandex.ru

¹Ufa State Aviation Technical University (USATU), Ufa, Russian Federation

²Tyumen industrial University (TIU), Tobolsk, Russian Federation

Abstract

The article presents the results of the laboratory tests of tube steel 20 samples without operation, as well as the pipeline tube, having pumped sour crude for eight years. Impact bending tests, metallographical tests and fractographic analysis were performed. The steel 20 degradation factor was set in operating conditions; it can cause accidents together with the local corrosion.

Results

Combined impact of steel embrittlement and local corrosion may cause serious accidents, occurred in the pipelines steel.

Conclusions

1. The microstructure of the tube steel 20 without having been in operation, and the tube after eight-year maintenance is a two-phase mixture of ferrite grains and pearlite stock. There is a difference in ferrite and pearlite grains size. The average size of grains is $10,0 \pm 1,0$ μm , and for steel after service life it is — $5,0 \pm 0,5$ μm .
2. The coefficient of the fractional change of the impact number during the temperature falling χ was selected as the quality factor of the metal embrittlement during the sour gas service.
3. The comparison of steel impact viscosity of the tube, not being in operation, and the tube after the sour gas service, showed traces of steel

embrittlement during the operation. It resulted in the coefficient χ increased by 25,3% (embrittlement rating).

4. The tube steel embrittlement during the operation was proved out by the results of the samples fracture surface fractographic analysis after the impact bending test.
5. Combined impact of steel embrittlement and local corrosion may cause serious accidents, occurred in the pipelines, pumping sour crude products of wells.

Keywords

pipeline, sour crude, impact bending tests, metallographical tests, fractographic analysis, steel microstructure

References

1. Nakasugi H., Matsuda H. Development of New Dine-Pipe Steels for Sour Gas Servis // Nippon

Steel. Techn. rep., 1979, issue 14, pp. 66–78.

2. Kudasov V.V., Maslanov A.A., Shaydakov V.V. and oth. Sbor i podgotovka sernistoy nefi

[Gathering and processing of sour crude oil]. Ed. by Shiydakov V.V. Ufa: Monografiya, 2005, 129 p.