

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ТРУБНЫХ ОБВЯЗОК ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ

Максютин И.В.\* , Андронов И.Н.\*\*

\* филиал ООО ВНИИГАЗ "Севернипгаз"

\*\* Ухтинский государственный индустриальный университет

Приведен анализ результатов экспериментального определения характеристик механических свойств металла трубной обвязки газораспределительной станции, находившейся в эксплуатации 37 лет. Дана оценка влияния деформационного старения на служебные характеристики металла.

Работоспособность магистральных газопроводов и трубных обвязок компрессорных и газораспределительных станций зависит от многих факторов, одним из главных среди которых является качество металла труб как конструкционного материала. Данная статья содержит результаты экспериментального определения характеристик механических свойств металла трубной обвязки, находившейся в эксплуатации 37 лет. Металл обвязки за время длительной эксплуатации претерпевает изменения, которые сказываются на служебных характеристиках, отражаемых в сертификатах на трубы. Однако зачастую на объектах отсутствует техническая документация с сертификатами, а ГОСТы и технические условия по имеющимся документам давно устарели.

Анализ результатов лабораторных исследований металла позволяет получить объективную информацию о качестве металла, оценить влияние деформационного старения и дефектов структуры на служебные характеристики металла и тем самым дать общую оценку изменения механических свойств углеродистых трубных сталей.

Для проведения механических испытаний были вырезаны четыре темплета размером 250×300 мм находящиеся: первый – выходной коллектор из зала редуцирования (линия низкого давления – 1,2 МПа); второй – входной коллектор в пылеуловители (линия высокого давления – 2,8 МПа); третий и четвертый – подземная и надземная линии высокого давления (2,8 МПа) перед входным коллектором пылеуловителей. Из каждого темплета вырезали 14 образцов для проведения испытаний на растяжение, ударный изгиб и исследования структуры металла. Для всех выбранных темплетов предусматривалась единая схема расположения образцов. Следует отметить одну особенность изготовления образцов для проведения механических испытаний. Она заключается в том, что кроме полнотолщинных образцов, использовали образцы уменьшенной толщины, расположенные следующим образом по толщине стенки трубы: один из них примыкает к наружной поверхности (образцы № 3 и 6), другой – к внутренней (образцы № 5 и 8), а третий располагается в срединной поверхности трубы (образцы № 4 и 7). Полнотолщинные и уменьшенной толщины образцы вырезали как в продольном, так и поперечном направлениях, выпрямляемые статической нагрузкой, относительно продольной оси трубы. Всего было изготовлено и испытано 44 образца. Из испытанных образцов на растяжение количество полнотолщинных образцов составило 8, а число образцов уменьшенной толщины – 24. На ударный изгиб было испытано 12 образцов.

Для нагружения образцов до разрушения использовалась испытательная машина МР-100. Измерение изменения длины на рабочей части образца при небольших дефор-

мациях (начальный участок диаграммы растяжения) проводилось с помощью рычажно-го тензометра. Испытание на растяжение осуществлялось согласно нормативной литературе [1], [2]. Начальный участок диаграммы растяжения для полнотолщинных образцов и образцов уменьшенной толщины использовался для определения силы  $P_{0,2}$ , необходимой для вычисления условного предела текучести и модуля упругости первого рода.

Основные результаты экспериментальных исследований для темплетов 1 и 4 приведены в таблице 1. Значок "ср" – среднее значение найденной величины по направлению, значок " 'ср " – среднее значение найденной величины по темплету.

Т а б л и ц а 1.

Темплет № 1								
	Продольное направление				Поперечное направление			
№ образца	8	7	6	2	5	4	3	1
$\sigma_{0,2}$ , МПа	265	301	327	286	338	388	372	278
	$\sigma_{0,2 \text{ ср}} = 295, \sqrt{D(\sigma_{0,2})} = 26$				$\sigma_{0,2 \text{ ср}} = 344, \sqrt{D(\sigma_{0,2})} = 49$			
	$\sigma'_{0,2 \text{ ср}} = 319, \sqrt{D(\sigma_{0,2})} = 45$							
$\sigma_B$ , МПа	520	524	544	515	526	526	534	504
	$\sigma_{B \text{ ср}} = 526, \sqrt{D(\sigma_B)} = 13$				$\sigma_{B \text{ ср}} = 523, \sqrt{D(\sigma_B)} = 13$			
	$\sigma'_{B \text{ ср}} = 524, \sqrt{D(\sigma_B)} = 12$							
$\delta$ , %	22,5	27,5	23,8	21,6	13,8	26,2	17,5	18,2
	$\delta_{\text{ср}} = 24, \sqrt{D(\delta)} = 3$				$\delta_{\text{ср}} = 19, \sqrt{D(\delta)} = 5$			
	$\delta'_{\text{ср}} = 21, \sqrt{D(\delta)} = 5$							
$\psi$ , %	34,6	39,6	37,2	39,9	45,8	21,0	28,5	32,7
	$\psi_{\text{ср}} = 38, \sqrt{D(\psi)} = 2$				$\psi_{\text{ср}} = 32, \sqrt{D(\psi)} = 10$			
	$\psi'_{\text{ср}} = 35, \sqrt{D(\psi)} = 8$							
Темплет № 4								
	Продольное направление				Поперечное направление			
№ образца	8	7	6	2	5	4	3	1
$\sigma_{0,2}$ , МПа	328	339	346	358	321	350	312	353
	$\sigma_{0,2 \text{ ср}} = 343, \sqrt{D(\sigma_{0,2})} =$				$\sigma_{0,2 \text{ ср}} = 334, \sqrt{D(\sigma_{0,2})} = 21$			
	$\sigma'_{0,2 \text{ ср}} = , \sqrt{D(\sigma_{0,2})} =$							
$\sigma_B$ , МПа	536	548	511	534	547	560	494	530
	$\sigma_{B \text{ ср}} = 532, \sqrt{D(\sigma_B)} = 15$				$\sigma_{B \text{ ср}} = 533, \sqrt{D(\sigma_B)} = 29$			
	$\sigma'_{B \text{ ср}} = 532, \sqrt{D(\sigma_B)} = 21$							
$\delta$ , %	26,2	23,8	20,0	22,5	21,2	22,5	12,5	19,6
	$\delta_{\text{ср}} = 23, \sqrt{D(\delta)} = 3$				$\delta_{\text{ср}} = 19, \sqrt{D(\delta)} = 4$			
	$\delta'_{\text{ср}} = 21, \sqrt{D(\delta)} = 4$							
$\psi$ , %	56,0	47,1	35,5	61,3	53,7	36,0	31,0	25,0
	$\psi_{\text{ср}} = 50, \sqrt{D(\psi)} = 11$				$\psi_{\text{ср}} = 36, \sqrt{D(\psi)} = 12$			
	$\psi'_{\text{ср}} = 43, \sqrt{D(\psi)} = 13$							

Испытание на ударный изгиб позволяет определить работу, затраченную на разрушение образца при ударе, то есть найти ударную вязкость металла. Трубные стали подвержены старению, приводящему к снижению вязкости, что в свою очередь повышает опасность развития разрушения. К тому же, металлы с близкими по величине характеристиками прочности и пластичности, найденными при статических испытаниях, могут существенно различаться по своим свойствам при ударном изгибе. Сравнение полученных значений ударной вязкости с сертификатными значениями даст возможность оценить степень изменения этой характеристики, а сравнение со справочными данными позволит судить о допустимом изменении ударной вязкости.

Разрушение образцов при ударном изгибе осуществлялось на маятниковом копре согласно стандарту [3].

Испытывались образцы с U-образным надрезом (образцы с разрезом Менаже) при низкой ( $-40^{\circ}\text{C}$ ) и комнатной ( $+20^{\circ}\text{C}$ ) температурах. Результаты испытаний показаны в таблице 2.

Т а б л и ц а 2.

Номер темплета	Обозначение образца	Ударная вязкость (КСУ), Дж/см <sup>2</sup> при температуре			
		$-40^{\circ}\text{C}$	среднее значение	$+20^{\circ}\text{C}$	среднее значение
1	1-9	-	-	88	78
	1-10	-		69	
	1-11	47	41	-	-
	1-12	35		-	
2	2-9	-	-	49	48
	2-10	-		47	
	2-11	31	30	-	-
	2-12	29		-	
3	3-9	-	-	82	78
	3-10	-		74	
	3-11	45	41	-	-
	3-12	37		-	

По имеющейся проектной документации узлы входной и выходной нитки монтировались из труб, изготовленных из стали ст.4. Средние значения результатов испытания на растяжение, сертификатных данных и нормативные значения, соответствующие техническим требованиям стали ст. 4 приведены в таблице 3.

Т а б л и ц а 3.

Источник информации		Механические характеристики		
		$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\sigma_{\text{т}}$ , МПа	$\delta$ , %
Результаты испытания темплета	№2	524	319	21,4
	№7	536	372	18,0
	№9	530	381	23,8
	№10	532	338	21,0
Сертификат на трубы		492	313	26
ГОСТ 8731-74, технические требования		412	245	20

Сравнение результатов испытания на растяжение образцов, изготовленных из темплета №2 с данными технических требований [4] и осредненными сертификатными данными показывает, что:

а) средние значения результатов испытания соответствуют техническим требованиям по пределу прочности, по пределу текучести и относительному удлинению;

б) средние значения предела прочности и предела текучести по результатам испытания несколько выше соответствующих сертификатных значений, в то время как средние значения относительного удлинения меньше сертификатного значения;

в) среднее значение относительного сужения по результатам испытания намного меньше справочного значения [5].

Таким образом, сравнение средних результатов испытания образцов на растяжение показывает, что прочностные характеристики несколько возрастают, а характеристики пластичности уменьшаются: относительное остаточное удлинение примерно на 20%, а относительное сужение в 1,5 раза. Описанное выше изменение свойств металла при длительной эксплуатации согласуется с данными, приведенными в статьях [6], [7].

Сопоставление результатов, полученных для образцов, расположенных на различных расстояниях от наружной поверхности трубы, показало, что наиболее существенное изменение свойств металла происходит на наружной поверхности. Это можно объяснить присутствием концентраторов напряжений и воздействием изменяющейся во времени температуры, солнечной радиации.

Результаты испытания образцов, вырезанных из темплета №2 (труба диаметра 426 мм подземной линии высокого давления) на уровне средних величин соответствуют по пределам прочности и текучести техническим требованиям [4] и не соответствуют по относительному удлинению, среднее значение которого ниже предельного на 10%.

Полученные по результатам испытаний предел прочности и предел текучести больше средних сертификатных значений соответственно на 9% и на 19%, а среднее значение полученного относительного удлинения ниже сертификатного в 1,44 раза и относительное остаточное удлинение по результатам испытаний оказалось меньше справочного в 1,38 раза.

Для образцов, расположенных у наружной поверхности трубы, происходит наиболее существенное ухудшение пластических свойств металла. Последнее, вероятно, произошло вследствие воздействия грунта из-за дефектов изоляции. Более высокую степень изменения предела текучести, предела прочности и относительного удлинения для металла линии высокого давления по сравнению с линией низкого давления можно объяснить, например, более высоким уровнем кольцевых напряжений.

Значения кольцевых напряжений (МПа) определяют по формуле:

$$\sigma_{кц} = P \frac{D_{вн}}{2\delta},$$

где  $D_{вн}$  – внутренний диаметр трубы (мм);  $\delta$  – номинальная толщина стенки трубы (мм);  $P$  – рабочее давление газа (МПа).

Для трубы с наружным диаметром  $D_n = 426$  мм и толщиной стенки  $\delta = 10$  мм внутренний диаметр  $D_{вн} = D_n - 2\delta = 426 - 2 \times 10 = 406$  мм, поэтому при рабочем давлении 1,2 МПа (линия низкого давления)

$$\sigma_{кц} = \frac{1,2 \times 406}{2 \times 10} = 24,4 \text{ (МПа)},$$

а при рабочем давлении 2,8 МПа (линия высокого давления)

$$\sigma_{кц} = \frac{2,8 \times 406}{2 \times 10} = 56,8 \text{ (МПа)}.$$

Если воспользоваться относительной величиной напряжений  $\sigma_{кч} / \sigma_m$  (в долях от предела текучести), то для линии низкого давления  $\frac{\sigma_{кч}}{\sigma_{mcp}} = \frac{24,4}{319} = 0,076$ , а для линии

высокого давления  $\frac{\sigma_{кч}}{\sigma_{mcp}} = \frac{56,8}{372} = 0,153$ , поэтому их отношение составит  $\frac{0,153}{0,076} = 2$ .

Таким образом, для линии высокого давления уровень напряжений выше в 2 раза, чем для линии низкого давления, и следовательно происходит более существенное изменение предела прочности, предела текучести, относительного удлинения при длительной эксплуатации.

Сравнение результатов испытания образцов, изготовленных из темплетов №3 и №4 (подземная и надземная линии высокого давления) на уровне средних величин с данными, приведенными в технических требованиях [4], говорит о соответствии полученных и требуемых величин.

Сопоставление осредненных результатов испытания со средними сертификатными значениями показывает, что в процессе длительной эксплуатации произошло увеличение значений предела прочности и предела текучести соответственно на 8% и 22% для металла темплета №3, а для металла темплета №4 увеличение этих характеристик оказалось одинаковым и равным 8%. Значение относительного удлинения длительно работающего металла по сравнению с сертификатным уменьшилось на 8% для темплета №3 и на 19% для темплета №4.

Среднее значение относительного сужения по результатам испытания образцов, вырезанных из темплета №3, оказалось не ниже справочных данных, а результаты испытаний образцов темплета №4 показали уменьшение относительного сужения на 21%. Такое значительное ухудшение пластических свойств металла надземной части можно объяснить несколькими причинами. Одной из них является более высокий уровень кольцевых напряжений в трубе надземной части обвязки, так как толщина стенки здесь оказалась меньше, чем для подземной части.

Кроме этого, причиной ухудшения пластических свойств металла могут быть дополнительные воздействия окружающей среды, такие как постоянно меняющаяся температура и солнечная радиация. Об этом свидетельствуют, например, низкое значение относительного удлинения (12,5%), полученное при испытании образца №4-3, примыкающего к наружной поверхности трубы.

Для сравнительного анализа результатов испытания на ударный изгиб здесь используется среднее значение ударной вязкости (КСУ), равное 9 Дж/см<sup>2</sup> при температуре +20°С для сталей данного класса, так как в сертификатах на сталь ст. 4 отсутствует информация о значениях ударной вязкости. В этом случае можно будет говорить лишь о тенденции изменения ударной вязкости при длительной эксплуатации металла. В качестве нижней границы значения ударной вязкости рассматривается минимально допустимое для трубных сталей значение, приведенное в [5] и равное 30 Дж/см<sup>2</sup> при наименьшей температуре эксплуатации.

Сравнение осредненных значений результатов испытания со средним справочным значением указывает на тенденцию уменьшения ударной вязкости по мере увеличения срока эксплуатации трубной обвязки. В наибольшей степени это проявилось для темплета №2, вырезанного из трубы подземной части линии высокого давления. Уменьшение ударной вязкости обусловлено, во-первых, большим сроком эксплуатации (36 лет), во-вторых, более высоким уровнем кольцевых напряжений, что следует из сравнения результатов, полученных при испытаниях образцов темплета №1 и №2. Уменьшение ударной вязкости при повышении напряжений согласуется с результатами, приведенными в [5]. Сравнение полученных в результате испытания значений ударной вязкости

при температуре  $-40^{\circ}\text{C}$  с минимально допустимым значением показывает, что они не меньше требуемого значения. Вместе с тем, следует отметить, что для металла темплета №2 среднее значение результатов испытания равно минимально допустимому значению.

Таким образом, результаты испытания на изгиб указывают на изменение свойств металла, а именно: с увеличением срока эксплуатации трубы значение ударной вязкости уменьшается, что влечет за собой повышение вероятности хрупкого разрушения трубы.

Графическая иллюстрация изменения свойств металла трубной обвязки представлена в виде диаграмм на рис. 1.

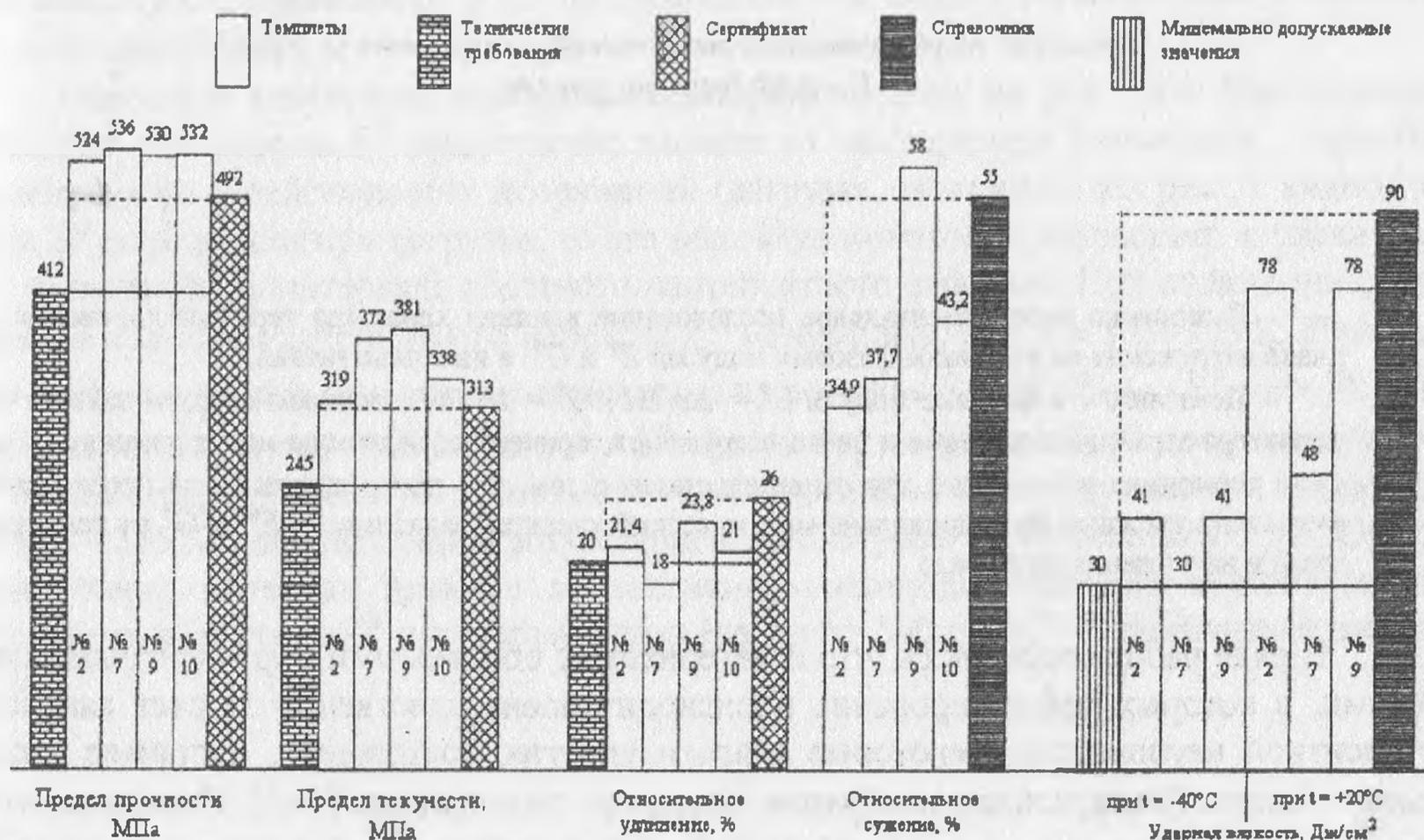


Рис. 1. Диаграмма сравнительного анализа результатов механических испытаний образцов вырезанных из трубной обвязки ГРС-1 г. Череповец

## Список литературы

- ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 37 с.
- ГОСТ 10006-80. Трубы металлические. Методы испытания на растяжение. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 17 с.
- ГОСТ 9454-78. Металлы. Методы испытаний на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 12 с.
- ГОСТ 8731-74. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Технические требования. – М.: Издательство стандартов, 1997. – 10 с.
- Анучкин М.П., Горицкий В.Н., Мирошниченко Б.И. Трубы для магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1986. – 231 с.
- Харионовский В.В. Эксплуатационная прочность северных газопроводов. // Проблемы прочности, 1983, №11, С. 100-105
- Костенко Н.А., Левкович Т.И., Костенко П.В., Буланова Е.В. Прогнозирование надежности и остаточного ресурса деталей с большим сроком службы. // Заводская лаборатория. 1997, Том 63, №6. С. 59-64.