

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
МЕТАЛЛА ТРУБ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ
ПОСЛЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**
STUDY OF CHARACTERISTICS OF MECHANICAL PROPERTIES
OF GAS-DISTRIBUTING STATION PIPES METAL AFTER LONG-TERM OPERATION

И. Ю. Быков, И. Н. Бирилло, П. А. Кузьбожев

I. Yu. Bykov, I. N. Birillo, P. A. Kuzbozhev

Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта
Филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта

*Ключевые слова: газораспределительная станция; механические свойства;
продолжительная эксплуатация*

Key words: gas-distributing station; mechanical properties; long-term operation

При проведении капитального ремонта газораспределительной станции (ГРС) ООО «Газпром трансгаз Ухта» была заменена технологическая трубопроводная обвязка, из которой были отобраны фрагменты для изучения особенностей изменения свойств металла труб при длительной эксплуатации (37 лет). Для проведения сравнительной оценки был отобран металл из надземных трубопроводов высокого (2,8 МПа) и низкого (1,2 МПа) давлений. Фрагмент трубопровода низкого давления (фрагмент № 2) представлял собой отрезок коллектора с подводящими шлейфами на выходе из зала редуцирования ГРС. Фрагмент трубопровода высокого давления (фрагмент № 10) представлял собой отрезок трубопровода на прямолинейном надземном участке перед переходом в участок подземной прокладки на входе в пылеуловитель.

Цель механических испытаний — оценка влияния условий механического нагружения при эксплуатации технологических трубопроводов ГРС на изменение свойств металла труб. На трубопроводе высокого давления — давление выше, но режим его воздействия квазистатический, на трубопроводе низкого — давление ниже, но добавляется воздействие высокоскоростного потока газа после редуцирующего клапана-регулятора.

Из отобранных фрагментов металла труб были изготовлены образцы для проведения механических испытаний по ГОСТ 1497-84 [1]. Изготавливались образцы двух типов: образцы полной толщины трубы с сохранением фактического состояния внутренней и наружной поверхностей труб и образцы уменьшенной толщины. Изготавливалось фрезерованием по два образца уменьшенной толщины, которые располагались в пределах сечения толщины стенки трубы следующим образом:

- с сохранением наружной поверхности трубы (образцы № 3 и 6);
- с сохранением внутренней поверхности трубы (образцы № 5 и 8);
- посередине толщины стенки трубы (образцы № 4 и 7).

Образцы полной и уменьшенной толщины вырезались в продольном и в поперечном направлениях относительно продольной оси трубы. Было изготовлено и испытано 4 образца полной толщины и 12 образцов уменьшенной толщины, всего 16 образцов. Полученные результаты представлены в таблице и на рис. 1, 2. Сравнение результатов выполнено с данными технических условий на трубы [2] и справочными данными [3]. Для сравнительного анализа результатов испытаний использовались характеристики стали марки ст. 4. Согласно акту приемки в эксплуатацию технологические трубопроводы на входе и выходе ГРС монтировались из труб диаметром 426 мм, толщиной стенки 10 мм, марка стали труб — сталь ст. 4, что также подтверждается данными сертификатов на трубы.

Принципиальным моментом является преимущественно меньшие значения предела прочности для образцов, отобранных из трубопровода низкого давления, в сравнении с образцами, отобранными из трубопровода высокого давления. Данная тенденция свойственна 12 образцам из 16 испытанных.

**Результаты определения характеристик механических свойств образцов металла
трубопроводной обвязки ГРС**

Номер образца	Местоположение по толщине стенки трубы / направление вырезки	Характеристики механических свойств					
		$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{разр}$, МПа	δ , %	ψ , %	E, ТПа
2–1	Полной толщины, поперечное	278	504	709	18,2	32,7	0,196
2–2	Полной толщины, продольное	286	515	767	21,6	39,9	0,200
2–3	Снаружи, поперечное	372	534	707	17,5	28,5	0,182
2–4	Посередине, поперечное	327	526	770	26,2	37,2	0,194
2–5	Снаружи, поперечное	388	526	628	13,8	21,0	0,197
2–6	Снаружи, продольное	301	544	814	23,8	39,6	0,191
2–7	Посередине, продольное	338	524	806	27,5	45,8	0,200
2–8	Внутри, продольное	265	520	733	22,5	34,6	0,194
10–1	Полной толщины, поперечное	353	530	655	19,6	25,0	0,189
10–2	Полной толщины, продольное	358	534	1037	22,5	61,3	0,189
10–3	Снаружи, поперечное	312	494	623	12,5	31,0	0,191
10–4	Посередине, поперечное	346	560	707	22,5	35,5	0,174
10–5	Внутри, поперечное	350	547	781	21,2	36,0	0,175
10–6	Снаружи, продольное	339	511	775	20,0	47,1	0,167
10–7	Посередине, продольное	321	548	906	23,8	53,7	0,193
10–8	Внутри, продольное	328	536	932	26,2	56,0	0,189

Аналогично для условного предела текучести — 10 образцов из 16 испытанных. При этом у 4-х образцов значения условного предела текучести меньше требуемого осредненного сертификатного значения 313 МПа (рис. 1 а, образцы №№ 2–1, 2–3, 2–5 и 10–3). Это означает, что при воздействии квазистатического внутреннего давления газа в трубопроводе предел прочности со временем наработки закономерно и объяснимо возрастает. Чем большее статическое давление испытывает металл трубы, тем в большей степени возрастает предел прочности. При меньшем статическом давлении, сопровождающемся дополнительной нагрузкой в виде высокоскоростного потока газа, наблюдается некоторое уменьшение условного предела текучести в сравнении с условиями отсутствия динамической нагрузки.

Характеристики пластических свойств, контролируемые относительным удлинением после разрыва образцов, лишь в 4-х случаях из 16 не соответствуют нормативным требованиям. Характерно, что в трех случаях из четырех это несоответствие приходится на образцы, изготовленные из фрагмента трубопровода с меньшей величиной внутреннего рабочего давления (рис. 1 б, образцы №№ 2–1, 2–3, 2–5). Наблюдаемое изменение характеристик механических свойств происходит при воздействии дополнительной неучитываемой динамической нагрузки от высокоскоростного потока дросселируемого газа.

Анализ распределения модуля упругости первого рода показывает, что его зависимости с другими характеристиками механических свойств металла не прослеживаются. Общая тенденция соответствует увеличению модуля упругости с увеличением относительного удлинения после разрыва образцов и уменьшением их предела прочности. Однако данные закономерности характеризуются существенным разбросом данных и не являются функциональными.

Все три образца с недостаточными характеристиками пластических свойств вырезаны поперек продольной оси трубопровода. Это свидетельствует о том, что изменение свойств произошло при воздействии кольцевых напряжений, возникающих от внутреннего рабочего давления газа. Кольцевые напряжения определяют по формуле

$$\sigma_{кц} = P \frac{D_{вн}}{2\delta}, \quad (1)$$

где $D_{вн}$ — внутренний диаметр трубы (мм), δ — номинальная толщина стенки трубы (мм); P — рабочее давление газа (МПа).

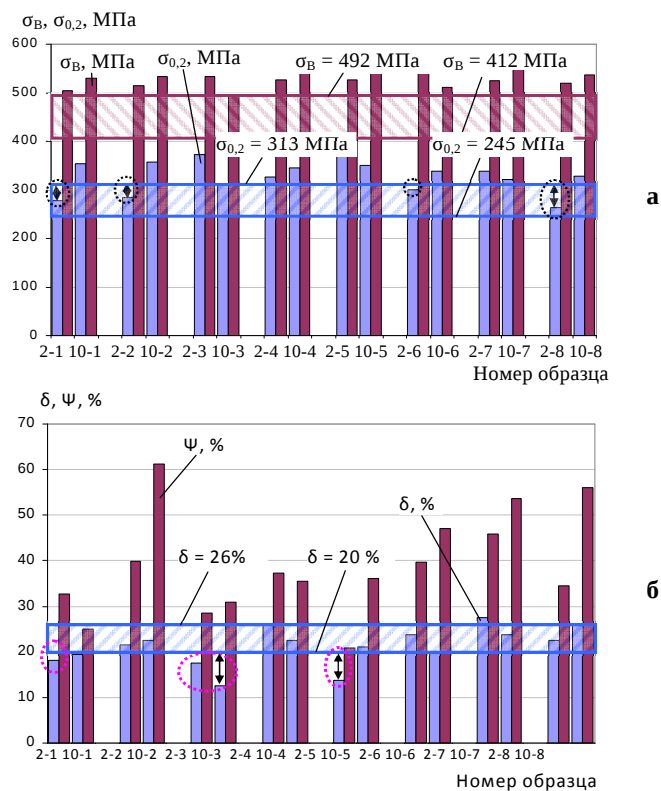


Рис. 1. Характеристики механических свойств образцов металла труб из трубопроводной технологической обвязки ГРС: а — предел прочности и условный предел текучести, б — относительное удлинение и относительное сужение образцов после разрыва

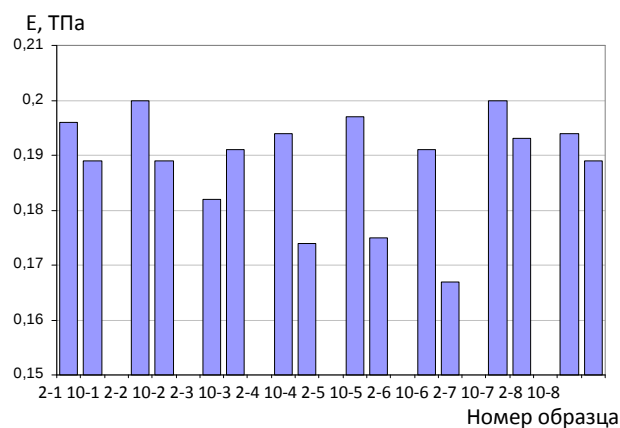


Рис. 2. Модуль упругости первого рода образцов металла из трубопроводной технологической обвязки ГРС

Для трубопровода низкого давления с наружным диаметром $D_H = 426$ мм и толщиной стенки $\delta = 10$ мм внутренний диаметр составит $D_{BH} = D_H - 2\delta = 406$ мм, поэтому при рабочем давлении 1,2 МПа кольцевые напряжения составят

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

Для трубопровода высокого давления с наружным диаметром $D_H = 530$ мм и толщиной стенки трубы $\delta = 7,5$ мм, $D_{BH} = 515$ мм, поэтому при рабочем давлении 2,8 МПа кольцевые напряжения составят

$$\sigma_{кц} = \frac{2,8 \cdot 515}{2 \cdot 7,5} = 96,1 \text{ (МПа)}.$$

Итак, величина кольцевых напряжений, возникающих в металле трубопровода высокого давления (2,8 МПа), в 3,9 раза превышает величину кольцевых напряжений, возникающих в металле трубопровода низкого давления (1,2 МПа). При этом отношение величин внутреннего давления в трубопроводах равно 2,3.

Если воспользоваться относительной величиной напряжений $\frac{\sigma_{кц}}{\sigma_{0,2}}$ (в долях от экспериментально установленного среднего условного предела текучести), то для трубопровода низкого давления $\frac{\sigma_{кц}}{\sigma_{0,2}} = \frac{24,4}{319} = 0,076$, для трубопровода высокого давле-

ния $\frac{\sigma_{кц}}{\sigma_{0,2}} = \frac{96,1}{338} = 0,284$, а их отношение составит величину, сопоставимую с рассчи-

танной ранее $\frac{0,284}{0,076} = 3,74$.

Таким образом, несмотря на почти четырехкратное превышение величины кольцевых напряжений, возникающих в трубопроводе с более высоким внутренним рабочим давлением, металл трубопровода низкого давления после узла редуцирования претерпевает значительное ухудшение пластических свойств, которое может быть объяснено возникновением динамического характера нагружения (то есть кольцевые напряжения уже не носят квазистатический характер, а характеризуются наложением пульсирующей нагрузки от скоростного потока дросселируемого газа). При этом напряжения в металле труб будут возникать не от статической нагрузки, а от нагрузки с асимметричным циклом нагружения.

Прочие нагрузки, например, от изменения температуры воздуха, одинаковы для трубопроводов надземной прокладки и действуют в одинаковой степени на трубопровод высокого давления и на трубопровод низкого давления.

Практический интерес представляет сопоставление характеристик механических свойств металла трубы по сечению толщины стенки, что достигалось испытаниями соответственно расположенных по сечению образцов. Установлено, что наиболее существенное изменение свойств металла зафиксировано для образцов, отобранных с примыканием к наружной поверхности трубы (образцы №№ 2–3, 2–5, 10–3). Некоторое несоответствие по условному пределу текучести также наблюдается у образца, примыкающего к внутренней поверхности трубы (образец № 2–8).

Эти данные свидетельствуют о том, что напряженное состояние труб по толщине стенки неоднородно. Наиболее существенное изменение свойств металла происходит у наружной поверхности трубы, то есть в той части сечения, в которой кольцевые напряжения имеют максимальную величину. Однако с точки зрения общепринятой расчетной модели напряженно-деформированного состояния трубопроводов считается, что в тонкостенном цилиндре окружные напряжения распределены по толщине стенки трубы почти равномерно, а радиальные — малы по сравнению с осевыми и окружными в той же мере, в какой толщина стенки трубы мала по сравнению с ее радиусом, то есть упрощенно напряженное состояние стенки трубы считается плоским.

Основываясь на экспериментально полученные данные, можно рассматривать трубопровод как цилиндрическую оболочку, поперечное сечение которой по характеру действия энергии деформации можно разделить, как минимум, на две зоны. Приближенная к внутренней поверхности трубопровода статическая зона, в которой действует энергия статической деформации от внутреннего давления перекачиваемого газа, и приближенная к наружной поверхности трубопровода динамическая зона, в которой действует скрытая энергия деформации, возникающая от динамических процессов перекачки газа — скорости и пульсаций потока.

Зависимости параметров прочности от характеристик пластичности образцов не так очевидны. К функционально линейной зависимости с достаточно высоким коэффициентом детерминации $R^2 = 0,83$ можно отнести лишь зависимость напряжения разрушения от относительного удлинения после разрыва образцов (рис. 3 а).

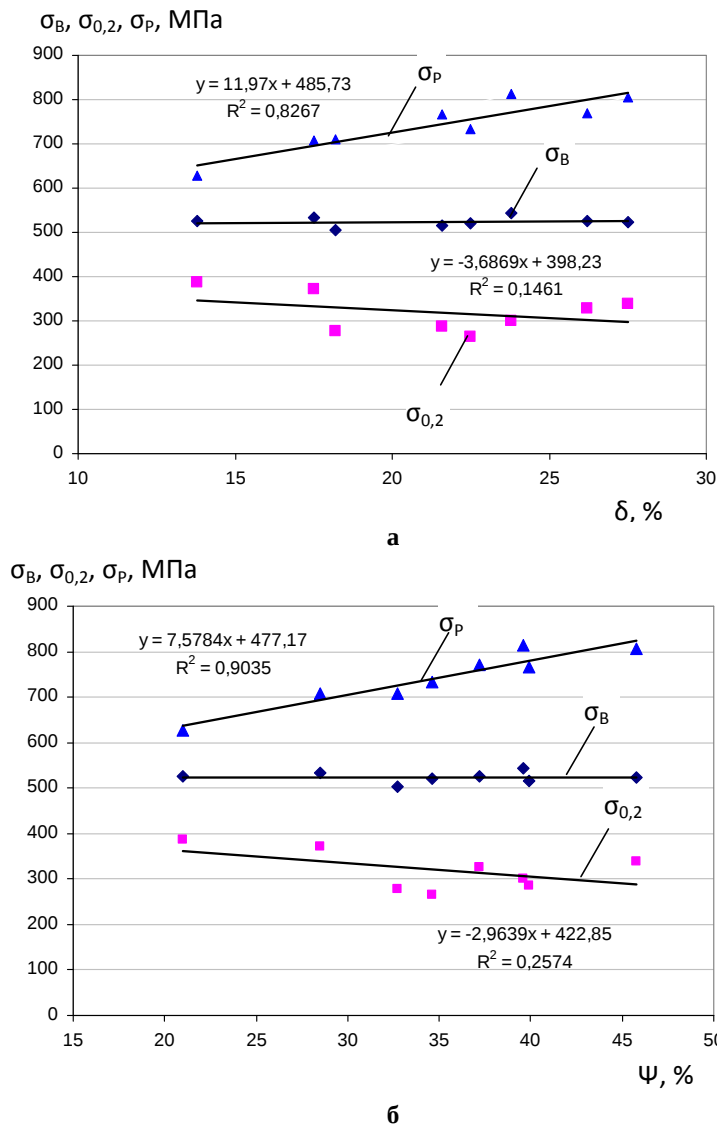


Рис. 3. Зависимости предела прочности, условного предела текучести и напряжения разрушения от относительного удлинения после разрыва (а) и относительного сужения (б) образцов металла из фрагмента № 2 технологических трубопроводов ГРС

При изменении относительного удлинения после разрыва предел прочности остается почти неизменным, а условный предел текучести имеет тенденцию к уменьшению. Полная аналогия зависимостей прослеживается и для относительного сужения образцов (рис. 3 б).

- Таким образом, установлено, что металл трубопровода газораспределительной станции низкого давления (1,2 МПа) после 37 лет эксплуатации на участке за узлом редуцирования претерпевает значительное ухудшение пластических свойств по сравнению с металлом трубопровода с более высоким внутренним рабочим давлением (2,8 МПа). Это может быть вызвано возникновением динамического характера нагружения, при котором кольцевые напряжения не носят квазистатический характер, а характеризуются наложением пульсирующей нагрузки от скоростного потока дросселируемого газа.

- Исследованы зависимости параметров прочности от характеристик пластичности образцов металла трубопроводов ГРС, наиболее представительными из которых являются зависимости напряжения разрушения от относительного удлинения и сужения после разрыва образцов. При этом предел прочности при изменении характеристик пластичности металла остается почти неизменным, а условный предел текучести имеет тенденцию к уменьшению.

Список литературы

1. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: ФГУП «Стандартинформ». – 2005. – 22 с.
2. ГОСТ 8731-74. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Технические требования. – М.: Издательство стандартов. – 1997. – 10 с.
3. Анучкин М. П., Горицкий В. Н., Мирошниченко Б. И. Трубы для магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1986. – 231 с.

Сведения об авторах

Быков Игорь Юрьевич, д. т. н., профессор кафедры «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности», Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта, тел. 8(8216)774492, e-mail: i-bykov@ugtu.net

Бирилло Игорь Николаевич, начальник лаборатории надежности объектов газотранспортной системы, филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Ухта, Россия, тел. 8(8216)752754, i.birillo@sng.vniigaz.gazprom.ru

Кузбожжев Павел Александрович, специалист группы интеллектуальной собственности, Филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Ухта, тел. 8(8216)751577, e-mail: p.kuzbozhev@sng.vniigaz.gazprom.ru

Information about the authors

Bykov I. Yu., Doctor of Engineering, professor of the chair «Machines and equipment of oil and gas industry», Ukhta State Technical University, phone: 8(8216)774492, e-mail: i-bykov@ugtu.net

Birillo I. N., head of laboratory «Safety of gas transport system facilities», affiliate of LLC «GaspromVNIIGAS», phone: 8(8216)752754, e-mail: i.birillo@sng.vniigaz.gazprom.ru

Kuzbozhev P. A., specialist of the group of intellectual property, affiliate of LLC «GaspromVNIIGAS», phone: 8(8216)751577, e-mail: p.kuzbozhev@sng.vniigaz.gazprom.ru