

И.Ю. Пышминцев, В.И. Столяров, В.И. Казачков,
 К.В. Беляев, В.В. Харионовский, Н.Н. Травин, А.О. Струин,
 ОАО «ТМК», ОАО «РосНИТИ», ОАО «ВТЗ»ООО «ВНИИГАЗ», ООО «Севергазпром»

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ТРУБ – ГАРАНТИЯ ОТ ЛАВИНООБРАЗНОГО РАЗРУШЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Удаленность запасов и увеличение объемов транспорта природного газа от мест потребления обуславливает новые требования к газопроводам из высокопрочных труб. Перспективы строительства газопроводов большого диаметра с большими эксплуатационными давлениями становятся все более актуальными.

Наряду с увеличением толщин стенок труб традиционного класса прочности Х70 дальнейший прогресс в развитии технологий будет связан с применением новых поколений трубных сталей, отличающихся высокой металлургической чистотой, с одной стороны, и прецизионным проведением прокатки при пониженных температурах и ускоренным управляемым охлаждением в строго определенном интервале температур. Новые технологии должны обеспечить соответствие труб следующим основным взаимосвязанным требованиям:

- снижение удельной стоимости транспортировки газа;
- обеспечение эффективной и безопасной работы магистральных трубопроводов при повышенных рабочих давлениях;
- обеспечение высоких характеристик свариваемости стали в заводских и полевых условиях;
- обеспечение высокой прочности и вязкости, подразумевая под последним широкий набор характеристик, в том числе и сопротивление протяженным разрушениям.

Последовательное повышение эксплуа-

тационных давлений в магистральных газопроводах до 7.4, 8.4 и 9.8 МПа, а в ближайшей перспективе и выше инициировало проведение Трубной Металлургической компанией и институтами ВНИИГАЗ, ЦНИИЧерМет, РосНИТИ аналитических и экспериментальных исследований по обеспечению надежности труб большого диаметра класса прочности Х70 (К60) с повышенной толщиной стенки до 21,6 мм при работе в сложных климатических условиях.

На Волжском трубном заводе была разработана технология и выпущена опытная партия спиральношовных труб диаметром 1420 мм и толщиной

21,6 мм из листа контролируемой прокатки класса прочности Х70. Требуемый уровень механических свойств металла труб и сварного соединения по разработанному техническим условиям и фактические данные, полученные при применении листа производства австрийской компании «Фест Альпине», приведены в табл. 1.

Высокие прочностные и вязкие свойства основного металла и сварных соединений труб, в том числе при отрицательных температурах, достигнутые благодаря целенаправленному выбору качественного металла и прецизионной технологии изготовления, являют-



Рис. 1. Опытная плеть, сваренная на временном полигоне ООО «Севергазпром»

Таблица 1. Механические свойства труб 1420x21.6мм

	Предел текучести, МПа	Вр. сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость,			ИПГ-20 %
				Осн. металл КСВ-20	Сварное соединение КСУ-60		
					Центр шва	Линия сплавления	
Опытная партия	493-540	627-655	24-25	237-263	36-38	195-338	92-100
Требования ТУ 14-156-61-2006	480	590	20	108	-	50	85

ся свидетельством их высокой надежности. Однако стойкость металла труб против протяженного вязкого разрушения как основного критерия безопасной эксплуатации газопровода высокого давления потребовал дополнительного анализа и экспериментального подтверждения.

Это обусловлено тем, что к настоящему времени многолетний опыт эксплуатации и испытания газопроводов позволил установить корреляционные соотношения между способностью металла останавливать движение трещины и механическими свойствами, прежде всего ударной вязкостью при температуре эксплуатации. Рассчитанные из признанных соотношений минимальные значения ударной вязкости, необходимые для остановки трещины, нашли отражение в требованиях международных и национальных стандартов на трубы (ГОСТ Р 52079-2003, ISO 3183:2007, API

5L) и трубопроводы (ISO13623:2000). В настоящее время наиболее признанными являются универсальные подходы, разработанные Европейской группой по исследованию трубопроводов – European Pipeline Research Group (EPRG), координирующей исследования в этом направлении 9 трубопроводных (энергетических) и 9 металлургических (трубных) компаний.

Следует отметить, что подходы EPRG, нашедшие в полном объеме отражение в современных международных стандартах, предполагают, что минимальный требуемый уровень вязкости обеспечивает, по крайней мере, 50% труб в партии, способных останавливать трещины. Данный подход позволяет оценить вероятность остановки трещин в пределах нескольких труб исходя из фактического уровня среднего значения энергии разрушения относительно требуемого минимума (табл.2).

Очевидно, что 2-2,5-кратное превышение минимума энергии для всех марок, включая X80, обеспечивает надежную остановку трещины в пределах 3-5 труб, что определено как «современные» высоконадежные трубы.

Требования всегда относятся к основному металлу труб и не включают вязкость продольных или спиральных швов, поскольку взаимное расположение швов соседних труб носит случайный характер, определяющий невозможность перехода трещины в другую произвольную плоскость на протяжении нескольких труб.

Тем не менее эти значения и использованные подходы имеют ряд ограничений, прежде всего по величине эксплуатационного давления, ограниченного, как правило, 8,0 МПа (табл.3). Кроме того, данные соотношения достаточно точны, только если расчетный требуемый уровень ударной вязкости

Таблица 2. Признанные соотношения для расчета необходимой вязкости для предотвращения протяженных разрушений

№	Средняя энергия разрушения образцов Шарпи, Дж	Источник
1	$Cv = 1.5 \times 2.38 \cdot 10^{-4} \times \sigma_H^{1.5} \times D^{0.5}$ $\leq L485 (X70), D \leq 1219 \text{ мм}, t \leq 18,3 \text{ мм}$ $P \leq 7.0 \text{ МПа} (P < 11,7 \text{ МПа для фактора } 0.8 \text{ или } 10,5 \text{ МПа для } 0,72)$	AISI
2	$Cv = 1.5 \times 2.38 \cdot 10^{-5} \times \sigma_H^2 \times (Rxt)^{0.33}$ $\leq L555 (X80), P \leq 7.0 \text{ МПа}, 40 < D/t < 115$	Battelle (упрощ.)
3.	$Cv = 1.5 \times (2.08 \times R \times t^{-0.5} - 0.001 \times V_0 \times R^{1.25} \times t^{-0.75}) \times \sigma_H \times 10^{-3}$	British Gas
4.	$T < 25.4 \text{ мм}; D < 1430 \text{ мм}, P < 8.0 \text{ МПа}:$ $< L450 (X65) : Cv = C_1 \sigma_H^{1.5} D^{0.5}; C_1 = 2,67 \cdot 10^{-4}$ $L450-L485 (X65-X70): Cv = C_2 \sigma_H^{1.5} D^{0.5}; C_2 = 3,21 \cdot 10^{-4}$ $L485-L555 (X70-X80): Cv = C_3 \sigma_H^2 (Rt)^{0.33}; C_3 = 3,57 \cdot 10^{-5}$	Рекомендации EPRG
5.	$L245-L450: Cv = 2,67 \cdot 10^{-4} \times \sigma_H^{1.5} \times D^{0.5}$ $L485: Cv = 3,21 \cdot 10^{-4} \times \sigma_H^{1.5} \times D^{0.5}$ $L555: Cv = 3,57 \cdot 10^{-5} \times \sigma_H^2 \times (Rxt)^{0.33}$	ISO13623:2000 Для транспортировки жидкостей категории D (природный газ)

R – радиус в мм, t – толщина стенки в мм, D – диаметр в мм . V₀ скорость звука в м/с, σ_H – окружные напряжения, МПа
 Прим.: 1) Расчетные значения должны быть скорректированы на основе практических данных, если рассчитанная вязкость превышает 100 Дж. 2) Для всех формул необходимо не менее 85% вязкого излома при испытаниях падающим грузом и 100% вязкой составляющей в изломе ударных образцов; 3) Обязательно однофазное поведение при декомпрессии; 4) Минимальный уровень энергии разрушения любого из трех образцов серии не должен быть ниже 0,75 от среднего.



Рис. 2. Установка датчиков скорости трещины, давления газа и температуры трубы



Рис. 3. Плеть после испытания (панорама)

по Шарпи не превышает 100 Дж (125 Дж/см²), что существенно ниже действительной вязкости современных труб, разработанных для эксплуатации в сложных условиях. Ввиду этого возможность применения труб при давлении 9,8 МПа, а в будущем и более высокого требует прямой экспериментальной проверки.

Как следует из приведенного выше, относительно надежное вероятностное предсказанное поведение материала труб большого диаметра для газопроводов высокого давления ограничено существующими давлениями, категориями прочности и не может быть распространено на перспективные трубы для проектов нового поколения. В равной степени это справедливо для листа и рулонного проката для прямошовных и спиральношовных труб, соответственно, опыт строительства газопроводов класса прочности X80 из которых уже имеется в США, Канаде и Западной Европе.

В связи с повышением рабочего давления в строящихся газопроводах нового поколения до 9,8 МПа впервые с 1983 г. в условиях ООО «Севергазпром» в апреле 2007 г. были проведены уникальные по давлению и размерам используемых труб сравнительные пневматические испытания спиральношовных и прямошовных труб 1420 x 21,6 мм, изготовленных из современных толстолистовых сталей контролируемой прокатки класса прочности X70. Для проведения испытаний в соответствии с разработан-

ным ООО «СеверНИПИгаз» проектом и методикой, был оборудован временный полигон, в котором с участием управления аварийно-восстановительных работ (УАВР ООО «Севергазпром») была смонтирована опытная плетя из труб общей длиной 164 м (Рис.1). Плетя состояла из прямошовной трубы-инициатора разрушения («разгонной трубы») длиной 6 м, испытываемого участка из трех спиральношовных труб, испытываемого участка из трех прямошовных труб, приваренного к разгонной трубе с противоположной от спиральношовных труб стороне, и буферных спиральношовных труб (для имитации работы полноразмерного газопровода). Распространение трещины с высокой скоростью в разгонной трубе инициировалось кумулятивным зарядом. Плетя размещалась в траншее и засыпалась грунтом на всю длину за исключением разгонной трубы.

При проведении эксперимента проводились измерения давления, температуры металла труб и окружающего воздуха, скорости распространения трещины в разгонной трубе и испытываемых участках, деформации в теле труб и сварных соединениях (рис.2). В качестве критерия пригодности труб с точки зрения обеспечения сопротивления протяженному вязкому разрушению была выбрана остановка трещины в пределах трех испытываемых труб за время не более 0,36 с., что полностью соответствует принятым международным концепциям для высоконадежных со-

временных материалов.

Пневматические испытания взрывом были осуществлены 12 апреля 2007 г. после достижения в опытной плети рабочего давления 9,8 МПа и установления стабильной температуры -10°C (Рис. 3). В результате взрыва центральная часть плети, включая трубу-инициатор длиной 6 м и участок прямошовной трубы длиной 6,3 м были развернуты до практически плоского состояния и выброшены из траншеи на расстояние 230 м. Произошел осевой сдвиг двух участков от центра плети в противоположные стороны на 45 м с осевым разворотом на 90° и 180° соответственно спиральношовной и прямошовной частей.

Осмотр плети после взрыва установил, что трещина развивалась в обе стороны от трубы-инициатора. Остановка трещины произошла в пределах первой прямошовной трубы и первой спиральношовной трубы с временем до остановки разрыва 0,210 и 0,179 сек соответственно, что в целом характеризует результат испытаний как положительный.

В прямошовной трубе трещина распространялась по основному металлу с формированием характерного для контролируемой прокатки слоистого рельефа поверхности разрушения. В зоне остановки на расстоянии 9,4 м от центра плети трещина закольцевалась, вышла в околошовную зону, где произошло разрушение на длину около 0,5 м. В спиральношовной трубе на первых 1,4 м разрушение распространялось по

Таблица 3. Рекомендации по безопасности в соответствии с рекомендациями EPRG [5]

Средняя энергия разрушения в партии	Марка труб	95% вероятности остановки в пределах	Вероятность остановки в пределах	
			трех труб	пяти труб
1,0 x EPRG Cv	<X70	10 труб	46%	67%
	X70, X75	18 труб	27%	41%
	X80	11 труб	44%	65%
1,2 x EPRG Cv	<X70	8 труб	59%	81%
	X70, X75	12 труб	40%	60%
	X80	7 труб	63%	84%
1,5 x EPRG Cv	<X70	5 труб	77%	94%
	X70, X75	7 труб	61%	82%
	X80	4 труб	84%	97%
«Современные» трубы (2-2,5) x EPRG Cv		3 труб	97%	99%

основному металлу, затем продольная трещина при пересечении заводского сварного шва отклонилась от осевого направления и развивалась параллельно спиральному шву по зоне термического влияния, под углом к оси трубы 38 градусов. Остановка произошла на расстоянии 13,2 м от центра плети при выходе трещины на кольцевой стыковой шов, наличие заводского поперечного шва не оказало влияния на ход распространения трещины. Характер излома – вязкий.

Большинство известных натуральных испытаний на сопротивление распространению магистральных трещин проведено к настоящему времени с использованием прямошовных труб. Отличием спиральношовных труб является обязательное пересечение спиральных швов при распространении трещин в плоскости, перпендикулярной максимальному напряжению (окружному). Учитывая, что шов имеет меньшую вязкость, но большую прочность при растяжении, чем основной металл, можно ожидать несколько вариантов распространения вязких трещин в трубопроводе из высокопрочных спиральношовных труб: вдоль оси трубы, вдоль спирального шва, параллельно или даже перпендику-

лярно ему. Отклонение перемещения трещины от прямолинейного распространения приводит к снижению движущей силы (давления в вершине трещины) разрушения, поскольку скорость декомпрессии для спиральношовной и прямошовной трубы одинакова.

Известные натурные полномасштабные эксперименты подтверждают это. Исследования EPRG показали, что в 37 полномасштабных пневматических испытаниях спиральношовных труб классов прочности X60 и X70 трещины рас-

пространялись как вдоль оси трубы, так и в ряде случаев параллельно шву по основному металлу. Отмечен один случай распространения трещины перпендикулярно шву. В целом принципиальных отличий поведения спиральношовных от прямошовных труб, равно, как и достоверности оценки их способности тормозить вязкие трещины по величине ударной вязкости, обнаружено не было.

Проведенный в условиях ООО «Севергазпром» эксперимент показал, что спиральношовные трубы 1420x21.6 мм категории прочности X 70, освоённые на Волжском трубном заводе, отвечают самым высоким требованиям, предъявляемым в современном мире к высокопрочным газопроводным трубам, работающим при высоких давлениях. Для характерных основных технических требований и параметров новых российских газопроводных проектов подтверждено, что спиральношовные трубы, изготовленные из современных высокопрочных сталей контролируемой прокатки, обладают высокой способностью препятствовать распространению протяженно-вязкого разрушения, что является гарантией высокой надежности газопроводов с рабочим давлением 9,8 МПа.



ООО «Мониторинг» г. Санкт-Петербург

Внедренческое предприятие ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»
Комплексное приборное, методическое и метрологическое обеспечение аналитических измерений

Средства градуировки и поверки аналитических измерительных приборов

- Производство газов и газовых смесей в баллонах под давлением
- Стандартные образцы состава веществ
- Источники микропотоков газов и паров
- Парофазные источники газовых смесей
- Генераторы поверочных и калибровочных газовых смесей
- Генераторы нулевого газа



Производство, сервисное обслуживание, диагностика и ремонт аналитических измерительных приборов

- Анализаторы для контроля атмосферного воздуха, воздуха рабочей зоны и промвыбросов
- Приборы для контроля взрывоопасных и горючих газов
- Универсальные аналитические приборы качественного и количественного химического анализа
- Приборы для контроля аэрозолей и пыли в воздухе
- Расходомеры газа
- Вспомогательные и пробоотборные устройства

Метрологические услуги

- Разработка методик выполнения измерений для контроля объектов окружающей среды, методик поверки и технической документации
- Разработка и внедрение систем экологического мониторинга
- Выполнение арбитражных анализов
- Подготовка к аккредитации аналитических, испытательных и стационарных лабораторий
- Обучение и повышение квалификации специалистов



ООО «МОНИТОРИНГ»
198013, Россия,
Санкт-Петербург, а/я 113
Тел.: (812) 315-11-45
Факс: (812) 327-97-76
E-mail: lkonop@b10.vniim.ru
<http://www.ooo-monitoring.ru>