

УДК 669.3.004

Т.Н. Белослудцев, ведущий инженер по сварке отдела главного сварщика; **А.Ю. Котоломов**, к.ф.-м.н., главный сварщик – начальник отдела главного сварщика, ООО «Газпром трансгаз Чайковский»; **В.М. Ковех**, к.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории надежности и ресурса ГТС Центра управления техническим состоянием и целостностью ГТС; **Е.Н. Овсянников**, старший научный сотрудник лаборатории надежности и ресурса ГТС Центра управления техническим состоянием и целостностью ГТС, ООО «Газпром ВНИИГАЗ»; **А.В. Чернышов**, коммерческий директор, ООО «НПП «МОНОТЕСТ»

Оценка механических свойств основного металла и металла сварных соединений трубопроводов неразрушающим (безобразцовым) методом по измерению твердости

В статье представлены результаты предварительных испытаний мобильной установки SSM-Mobile-XR, предназначенной для определения неразрушающим методом механических свойств основного металла и металла сварных соединений трубопроводов в трассовых условиях. Для определения механических свойств в данной установке реализована запись в реальном масштабе времени процесса упругопластического контактного деформирования материала при однократном или циклическом вдавливании сферического индентера. По результатам компьютерной постобработки построенных диаграмм определяют условный предел текучести, предел прочности, равномерное относительное удлинение и вязкость разрушения (трещиностойкость при статическом нагружении). При тестировании установки SSM-Mobile-XR в качестве эталонных методов использованы классические разрушающие испытания металла на растяжение, ударную вязкость и трещиностойкость, проводимые в соответствии с требованиями действующих стандартов (ГОСТ 1497-84, ГОСТ 6996-66, ГОСТ 9454-78, DIN EN ISO 15653:2010, ASTM E 1820-09). Использование подобных установок позволит без вырезки образцов определять фактические механические свойства основного металла и металла сварных соединений трубопроводов, что дает возможность оперативно использовать менее консервативные модели и методы оценки работоспособности сварных соединений, приведенные в СТО Газпром 2-2.4-715-2012.

Ключевые слова: сварное соединение, механические свойства, диаграмма деформирования, трещиностойкость, ударная вязкость, безобразцовый метод испытания, твердость по Бринеллю, разрушающий метод испытания, оценка работоспособности, магистральный газопровод.

Ежегодно на объектах ООО «Газпром трансгаз Чайковский» диагностическому обследованию при капитальном и текущем ремонте линейной части и компрессорных станций подвергаются порядка 4,5 тыс. стыков Ду1000-1400 и порядка 500 стыков Ду400-700. Большинство обследуемых стыков (85%) выполнено ручной дуговой сваркой, и по результатам неразрушающего контроля в них выявляется большое количество недопустимых дефектов (смещение кромок, поры, шлаковые включения, непровары и др.), что приводит к 100%-ному ремонту или вырезке указанных стыков. С 17 марта т.г. Распоряжением ОАО «Газпром»

№ 518 от 29.12.2012 вводится в действие СТО Газпром 2-2.4-715-2012 [1]. Данный стандарт регламентирует многоуровневую оценку работоспособности сварных соединений, находящихся в эксплуатации: на основе табличной оценки, оценки работоспособности по номограммам и расчетным формулам, экспертной оценки работоспособности по результатам уточненного расчета. На 2-м уровне оценки в расчете предусмотрено использование фактических данных о механических характеристиках основного металла и металла шва при растяжении и ударном изгибе, а на 3-м уровне – и фактических данных по трещиностойкости.

В связи с этим возникает задача оценки фактических механических свойств основного металла и металла кольцевых сварных соединений трубопроводов, находящихся в эксплуатации, и желательно без вырезки образцов. Наиболее часто такая оценка выполняется на основе корреляционных зависимостей между пределами текучести и прочности металла и величинами его твердости по Бринеллю или Виккерсу [2, 3]. Один из неразрушающих способов получения прочностных, упругих и пластических свойств материала по результатам измерения твердости описан, например, в [4].

В настоящее время существуют автоматизированные системы, позволяющие регистрировать в реальном масштабе времени процесс упругопластического контактного деформирования материала в координатах «нагрузка – перемещение», «нагрузка – время» и «перемещение – время» при однократном или циклическом вдавливании (с частичной разгрузкой) сферического индентера с контролем глубины вдавливания (микроремещения). Это такие системы, как система Stress-Strain Microprobe – модели SSM-B4000-XR и SSM-Mobile-XR (рис. 1) производства Advanced Technology Corporation (США). В результате компьютерной постобработки построенных диаграмм в этих системах предусмотрена возможность получения некоторого набора механических характеристик материала (условный предел текучести, предел прочности, равномерное относительное удлинение и истинная кривая деформирования при растяжении, вязкость разрушения при статическом нагружении).

В соответствии с Решением VI отраслевого совещания «Состояние и основные направления развития сварочного производства ОАО «Газпром», утвержденным 17.12.2012 заместителем председателя Правления, перед ООО «Газпром трансгаз Чайковский» совместно с ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и ООО «Газпром трансгаз Югорск» была поставлена задача по проведению испытаний оборудования, позволяющего определять механические свойства основного металла и металла сварных



Рис. 1. Применение мобильной установки серии SSM-Mobile-XR в трассовых условиях

соединений неразрушающим (безобразцовым) способом.

Для выполнения поставленной задачи была разработана программа комплекса работ по проведению квалификационных испытаний мобильной установки серии SSM-Mobile-XR, предназначенной для определения неразрушающим методом механических свойств основного металла и металла сварных соединений трубопроводов в трассовых условиях, состоящая из двух этапов.

На 1-м этапе проводится тестирование данной установки на металле кольцевых сварных соединений трех трубных темплетов. Полученные результаты сопоставляются с результатами разру-

шающих механических испытаний на прочность и трещиностойкость.

2-й этап выполняется при условии получения положительных результатов 1-го этапа и состоит в проведении расширенных квалификационных испытаний системы SSM-Mobile-XR в трассовых условиях на трубах разных типоразмеров и различных классов прочности. В данной статье представлены результаты, полученные в результате выполнения 1-го этапа испытаний.

Силами Инженерно-технического центра ООО «Газпром трансгаз Чайковский» в феврале – мае 2013 г. был проведен комплекс подготовительных работ перед испытаниями мобильной установки серии SSM-Mobile-XR. При этом были изготовлены образцы с различными механическими характеристиками металла шва. Для этого была выполнена посекторная (6 секторов) ручная дуговая сварка трубных катушек типоразмера 1420 x 15,7 мм класса прочности К60 по ТУ 1381-012-05757848-2005. Сварка корневого слоя выполнялась электродами LB-52U диаметром 3,2 мм, заполняющих и облицовочных слоев – электродами ОК 74.70 диаметром 3,0 (4,0) мм. Особенности применяемых режимов сварки приведены в таблице 1. Для каждого сектора выполнялись механические испытания на ударную вязкость по Шарпи на образцах типа IX по ГОСТ 6996 при температуре –20 °С. Ориентация надреза LR, расположение надреза – металл шва, линия сплавления, зона термического влияния. Результаты механических испытаний на

Таблица 1. Механические свойства металла сварного шва в зависимости от примененного режима сварки

№ образца (сварного шва)	Режим сварки	Количество слоев шва	Ударная вязкость (KCV, –20 °С), Дж/см ²
1	По СТО Газпром 2-2.2-136-2007, с подогревом	6	118
2	С закладкой в сварочную ванну присадочного материала	3	124
3	С максимальным наплавлением за проход	3	103
4	Без подогрева, на открытой площадке при –23 °С	6	112
5	Без подогрева, на открытой площадке при –23 °С, с принудительным охлаждением в процессе сварки водой/снегом	6	117
6	Многопроходная, узкими (стрингерными) валиками, с подогревом	9	138
7*	Эксплуатационный шов труба/отвод, вырезанный из обвязки пылеуловителей	–	46

По СТО Газпром 2-2.2-136-2007 ударная вязкость по Шарпи основного металла и металла шва при минимальной температуре стенки трубы при эксплуатации должна быть не менее 34,4 Дж/см².
Труба 1420 x 15,7 К60 ТУ 1381-012-05757848-2005.
Стык – труба 1020 x 16,4 К60 ТУ 20-28-40-48-56-79 / отвод 1020 x 28 К52 10ХСНД.

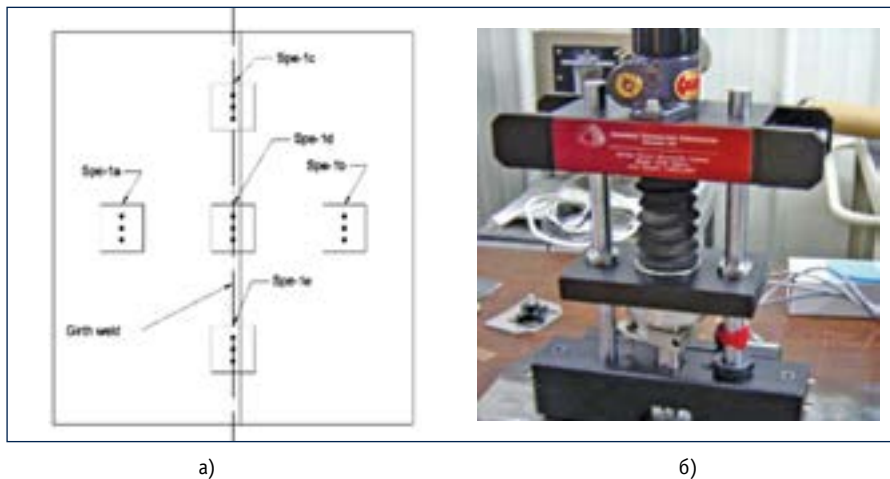


Рис. 2. Расположение зон определения механических свойств (а) безобразцовым способом с применением мобильной установки SSM-Mobile-XR (б)

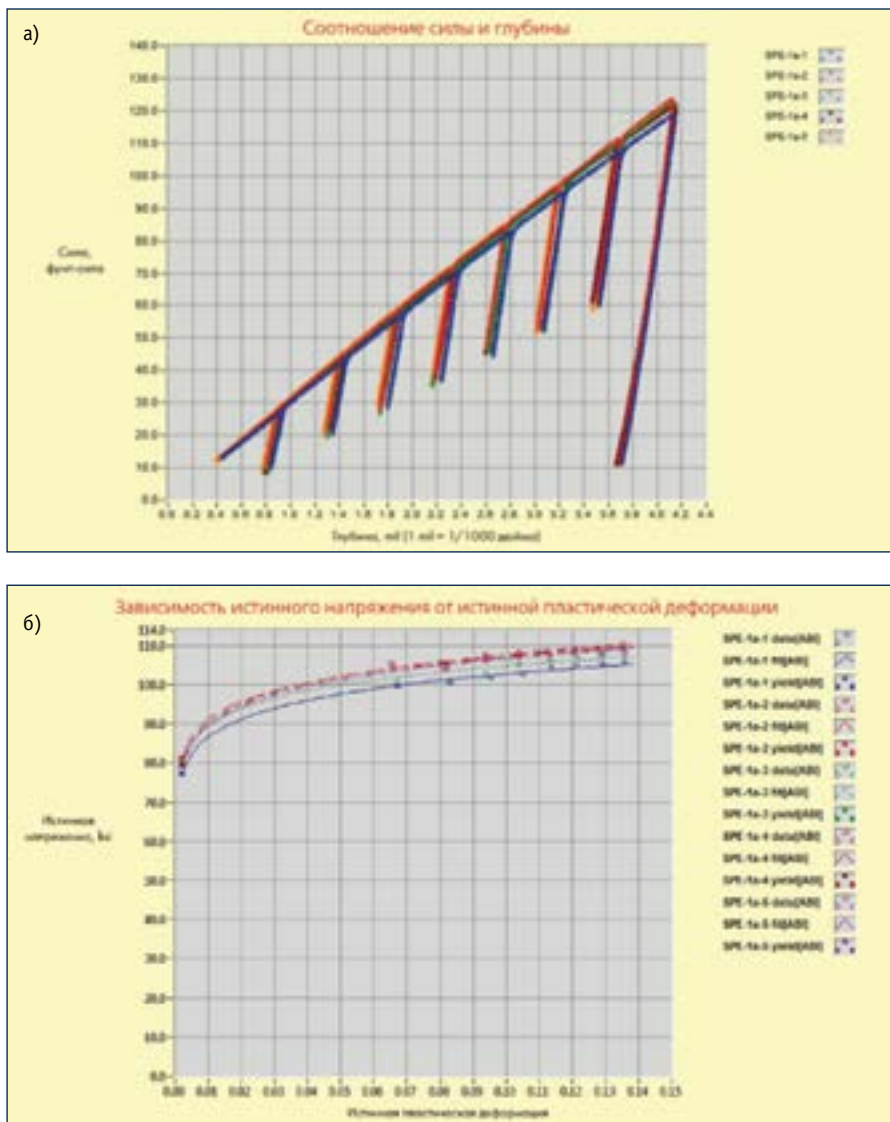


Рис. 3. Типичные диаграммы сила/глубина вдавливания индентора (а) и истинное напряжение/истинная пластическая деформация (б), получаемые при применении мобильной установки SSM-Mobile-XR

ударный изгиб металла шва (среднее по трем испытаниям) приведены в последней колонке таблицы 1. Для линии сплавления и зоны термического влияния получены более высокие значения ударной вязкости.

Следует обратить внимание на то, что металл испытанных сварных соединений, выполненных ручной дуговой сваркой, несмотря на грубые нарушения технологии сварки, обладал достаточно большим запасом по ударной вязкости по отношению к регламентируемому СТО Газпром 2-2.2-136-2007 минимальному нормативному уровню (34,4 Дж/см²). Таким образом, для снижения консервативности оценки в расчет работоспособности сварных соединений целесообразно закладывать именно фактические значения механических свойств основного металла и металла сварных швов.

В период с июня по декабрь 2013 г. был проведен 1-й этап испытаний. Для этого были отобраны три трубных темплета с № 1, 2, 3, содержащие соответственно сварные швы № 3, 7, 6 (нумерация швов по таблице 1). Работа выполнялась в виде последовательности следующих двух типов испытаний.

Первый тип испытаний составили неразрушающие испытания основного металла и металла сварных швов трубных темплетов № 1, 2, 3 с применением мобильной установки SSM-Mobile-XR (рис. 2), реализующей метод испытаний АВИ (автоматизированного вдавливания шариковым индентором) с определением вязкости разрушения на основе алгоритма Хаггага [5]. Данный этап работы выполнен совместно со специалистами ООО «НПП «МОНОТЕСТ» по программе, разработанной специалистами ООО «Газпром ВНИИГАЗ». В программу испытаний входило определение истинных кривых деформирования в координатах деформации – напряжения, параметров $\sigma_{0.05}$, σ_B , δ_p (относительное равномерное удлинение) инженерной кривой деформирования и критического коэффициента интенсивности напряжений K_{JCS} .

Так как на момент проведения испытаний лаборатория не располагала климатической камерой нужных размеров образцов (темплеты размером 300x400 мм), все механические свой-

Таблица 2. Результаты определения критического значения K_{Jc} основного металла (осредненные значения)

Место измерения/ вырезки образцов	K_{Jc1} , МПа*м ^{1/2} (определено SSM-Mobile-XR)	K_{Jc2} , МПа*м ^{1/2} (определено по J-R кривым)	K_{Jc3} , МПа*м ^{1/2} (определено через испытания на ударный изгиб)	Погрешность определения K_{Jc1} относительно J-R кривой, % $(K_{Jc2} - K_{Jc1})/K_{Jc2}$
1a	229,33	389,07	230,45	-41,1
1b	231,75	389,07	234,75	-40,4
2a	223,51	317,14	167,49	-29,5
2b	197,24	337,36	198,78	-41,5
3a	229,66	457,01	230,71	-49,7
3b	230,43	457,01	233,95	-49,6

ства основного металла и металла швов были получены только при температуре испытания 20 °С. Пример компьютерной обработки результатов испытания основного металла в зоне Spc-1a трубного темплета № 1 приведен на рисунке 3. Величины критического значения K_{Jc} основного металла и металла сварного шва (осредненные значения), определенные безобразцовым способом с применением мобильной установки SSM-Mobile-XR, приведены во второй колонке таблиц 2 и 3 соответственно. Второй тип испытаний составили классические разрушающие испытания ос-

новного металла и металла сварных швов трубных темплетов № 1, 2, 3, проводимые в соответствии с требованиями действующих стандартов и выполняемые с целью контроля результатов, полученных безобразцовым методом. Данный этап работы выполнен совместно со специалистами НИЛ «Политехтест КСМ» ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» и ООО «НПП «МОНОТЕСТ» по программе-методике и при непосредственном участии специалистов ООО «Газпром ВНИИГАЗ». В программу испытаний входило определение ис-

тинных кривых деформирования в координатах деформации – напряжения, параметров $\sigma_{0,2}$, $\sigma_{0,5}$, σ_{Br} , δ_p (относительное удлинение после разрыва), δ_p (равномерное удлинение) инженерной кривой деформирования по ГОСТ 1497-84 [6], критического коэффициента интенсивности напряжений K_{Jc} по DIN EN ISO 15653:2010 [3], J-R кривые по ASTM E 1820-09 [7], ударной вязкости по Шарпи по ГОСТ 6996-66 [8] и ГОСТ 9454-78 [9]. Испытания на трещиностойкость выполнены с применением следующего оборудования: испытательная машина Instron 8801, программное обеспече-

СТАЛЬНЫХ ТРУБ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ

ВНУТРЕННЯЯ И НАРУЖНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ



ООО «ЮКОРТ» ОКАЗЫВАЕТ СЛЕДУЮЩИЕ ВИДЫ УСЛУГ:

- Нанесение внутреннего антикоррозионного покрытия на основе высококачественных материалов на трубы диаметром 114-720 мм;
- Нанесение наружного двух- и трехслойного антикоррозионного покрытия на основе экструдированного полиэтилена на трубы диаметром 89-720 мм;
- Изготовление отводов холодного гнутья диаметром от 114 до 530 мм с внутренним и наружным антикоррозионным покрытием.
- Изготовление гнутых отводов с нагревом ТВЧ диаметром от 89 до 426 мм.
- Изготовление и антикоррозионная изоляция фасонных деталей трубопроводов, сварных узлов.
- Реализация, гидротестирование, антикоррозионная изоляция запорной арматуры Ду 50-800 мм.

Прием трубы и отгрузка готовой продукции может осуществляться по железной дороге или автотранспортом.

Продукция ООО «ЮКОРТ» сертифицирована в системе добровольной сертификации ГОСТ Р.

Система менеджмента качества ООО «ЮКОРТ» в 2009 г. сертифицирована в ЗАО «Бюро Веритас Сертификейшн Русь» на соответствие требованиям стандартов ISO 9001:2008 и ГОСТ Р ИСО 9001-2008.

ООО «ЮКОРТ». Почтовый адрес: 628309, РФ, ХМАО - Югра, г. Нефтеюганск, 6 мкр., д. 28

Тел: +7 (3463) 23-05-17 • Факс: +7 (3463) 25-15-24 • E-mail: yucort@rnservice.ru • www.yucort.ru

Таблица 3. Результаты определения величины K_{Jc} металла сварного шва (осредненные значения)

Место измерения/вырезки образцов	K_{Jc1} , МПа*м ^{3/2} (определено SSM-Mobile-XR)	K_{Jc2} , МПа*м ^{3/2} (определено по J-R кривым)	K_{Jc3} , МПа*м ^{3/2} (определено через испытания на ударный изгиб)	Погрешность определения K_{Jc1} относительно J-R кривой, % ($(K_{Jc1} - K_{Jc2})/K_{Jc2}$)
1с	213,84	253,11	147,83	-15,5
2с	211,97	188,22	115,48	12,6
3с	208,45	301,15	162,23	-30,8

ние Instron DADN, программное обеспечение Instron K1C, программное обеспечение Instron J1C, датчик деформации Instron C.O.D. Gauge 2670-122. Тип образца – квадратный SENB, ориентация надреза – LR для основного металла и NQ для металла шва.

Сводные результаты для критического значения K_{Jc} основного металла и металла сварного шва (осредненные значения), определенные разрушающим образом по J-R-кривым в соответствии с требованиями стандарта ASTM E 1820-09, приведены в третьей колонке таблиц 2 и 3 соответственно.

Для сравнения в четвертой колонке таблиц 2 и 3 приведены значения K_{Jc} определенные методом пересчета с ударной вязкости по Шарпи в соответствии с рекомендациями СТО Газпром 2-2.4-715-2012.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что применение мобильной установки SSM-Mobile-XR при положительных температурах, вообще говоря, дает возможность приближенно определять параметр трещиностойкости K_{Jc} без вырезки образцов. Погрешность определения K_{Jc} при $T = 20$ °C для основного металла трубы класса прочности от К52 до К60 достаточно велика и лежит в диапазоне от -29,5% до -49,7%, но является консервативной. По степени консерватизма рассмотренный безобразцовый метод для трубных сталей класса прочности К60 сопоставим с методом оценки K_{Jc} по испытаниям на ударный изгиб по Шарпи [1].

Погрешность определения K_{Jc} при $T = 20$ °C для металла шва лежит в диапазоне от -30,8% до 12,6%. Неконсервативная оценка получена безобразцовым

методом в одном случае – на металле сварного шва трубного темплета № 2 (эксплуатационный сварной шов – труба 1020 x 16,4 К60 ТУ 20-28-40-48-56-79 / отвод 1020 x 28 К52 10ХСНД). Характерно, что метод оценки K_{Jc} по испытаниям на ударный изгиб по формулам [1] дает консервативную оценку и в этом случае. Отметим, что все характеристики трещиностойкости, рассмотренные на 1-м этапе квалификационных испытаний, получены при положительных температурах. Ситуация может измениться со снижением температуры испытаний при приближении к критической температуре хрупкости, что должно быть исследовано дополнительно.

Погрешности определения характеристик трещиностойкости при отрицательных температурах предстоит выявить при проведении 2-го этапа

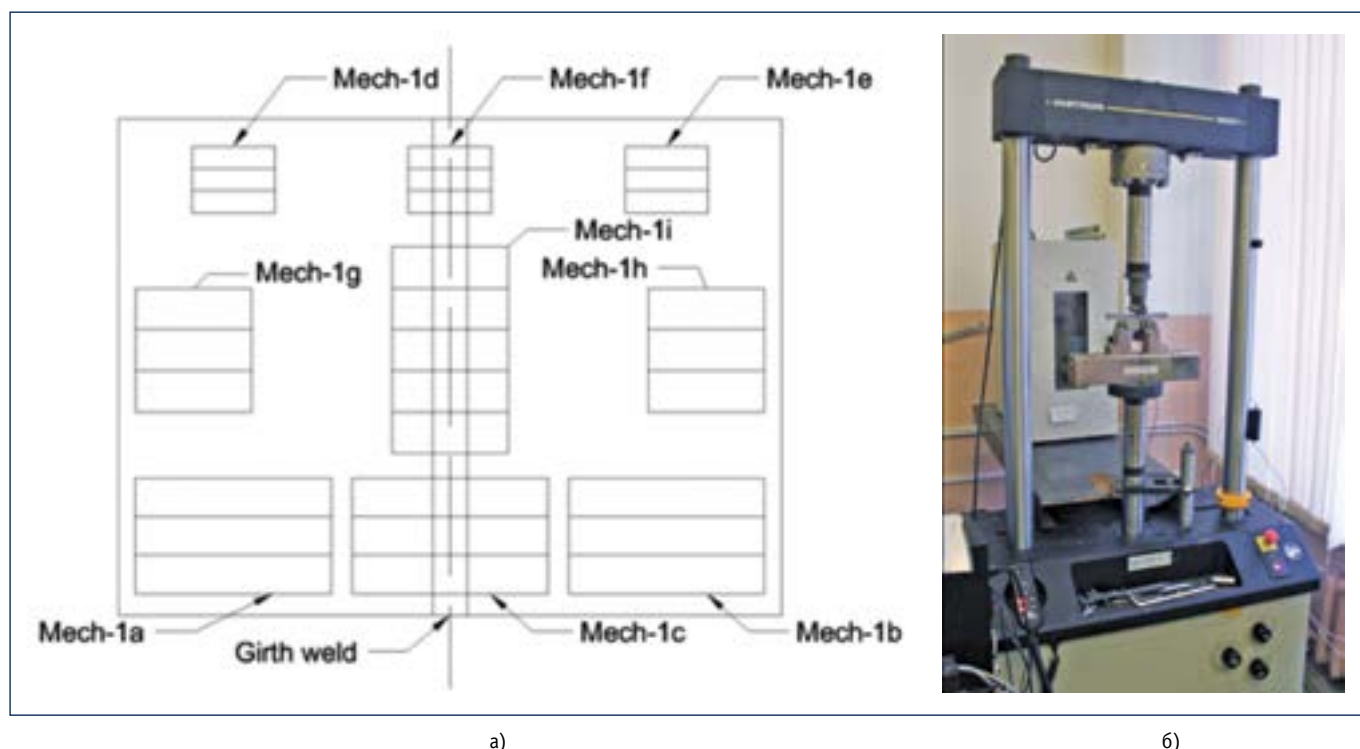


Рис. 4. Расположение зон вырезки образцов (а) для определения механических свойств классическим способом с применением испытательной машины Instron 8801 (б)



Промышленный газовый хроматограф «Петрохром-4000»



ЗАО «Росшельф» совместно с ООО НПФ «Мета-хром» разработан промышленный газовый хроматограф во взрывозащищенном корпусе для анализа состава и качества природного газа. Определение состава природного горючего газа осуществляется согласно требованиям ГОСТ 31371.7-2008 с расчетом теплоты сгорания, числа Воббе, относительной и абсолютной плотности по ГОСТ 31369-2008.

Хроматограф может быть использован в различных отраслях промышленности, в том числе на предприятиях Группы Газпром для коммерческого учета природного газа.

Хроматограф зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под № 45170-10. Конструкция и аналитическая схема хроматографа защищены патентами на изобретение. Хроматограф включен в реестр разрешенных к применению средств измерения на объектах ОАО «Газпром»;

Разработана и аттестована «Методикой измерения молярной доли компонентов газа горючего природного переменного состава» М-МВИ-268-13.

Реализована возможность передачи данных в центральный пульт автоматической системы управления технологическими процессами.

Обработка хроматографического сигнала и расчеты теплоты сгорания, числа Воббе, относительной и абсолютной плотности осуществляется с помощью программ «NetChrom» и «NetChromGas».

На базе промышленного газового хроматографа «Петрохром-4000» ведется разработка аналитического комплекса для определения физико-химических характеристик природного газа.



Полученные сертификаты, разрешения и патенты:

- свидетельство об утверждении типа средств измерений № 40738;
- разрешение на применение «Петрохром-4000» № РРС 00-043561;
- сертификат соответствия таможенного союза № TC RU C-RU.ГБ04. В.00049 Серия RU № 0038178;
- свидетельство № 242/ПО-6-2010 о метрологической аттестации программного обеспечения «NetChrom»;
- патент на изобретение № 2468363 от 20.07.2011 года выданный на ПГХ «Петрохром-4000»;
- патент на изобретение № 2439553 от 10.01.2012 года выданный на ПГХ «Петрохром-4000».

Технические характеристики

Показатель	Значение
Предел детектирования ДТД	не более 0,0005 мол. доли % по пропану
Линейный динамический диапазон	не менее $0,5 \times 10^6$
Продолжительность анализа	не более 20 минут
Время выхода на режим	не более 1 часа
Напряжение питания	24 В (+10, -15 %)
Потребляемая мощность	не более 50 ВА
Расход газа-носителя (гелий)	не более 1,8 л/час
Исполнение взрывозащиты	1ExdII BT4X
Габариты (диаметр, длина)	не более 290x620 мм
Масса	не более 22 кг

ЗАО «Росшельф»

197342, Россия, г. Санкт-Петербург
ул. Фурштатская, д. 10
Тел.: (812) 702-50-92; (495) 194-13-04
Факс: (812) 702-50-93
E-mail: liep@rosshelf-spb.ru
Web: www.petrochrom.ru



квалификационных испытаний. В рамках этого этапа при апробировании данного метода испытаний планируется расширить испытательную базу как по типоразмерам труб, так и по классам прочности трубных сталей и сварочных материалов и температурам испытаний. В заключение отметим, что внедрение

оборудования, позволяющего определять механические свойства основного металла труб и металла сварных соединений безобразцовым (неразрушающим) способом, дает возможность получить дополнительные фактические данные, необходимые для использования менее консервативных моделей

и методов оценки прочности сварных соединений с дефектами, приведенных в СТО Газпром 2-2.4-715-2012 (уровни 2в и 3а, 3б). Применение такого подхода позволяет обоснованно и без снижения надежности сократить объемы ремонта и вырезки на стадии эксплуатации и капитального ремонта.

Литература:

1. СТО Газпром 2-2.4-715-2012 «Методика оценки работоспособности кольцевых сварных соединений магистральных газопроводов».
2. ГОСТ 9012-59 «Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю».
3. DIN EN ISO 15653:2010 Metallic materials – Method of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds.
4. Марковец М.П. Определение механических свойств по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
5. Haggag, Fahmy M. In-Service Nondestructive Measurements of Stress-Strain Curves and Fracture Toughness of Oil and Gas Pipelines: Examples of Fitness-for-Purpose Applications, Proceedings of the 5th International Conference on Pipeline Rehabilitation & Maintenance, Det Norske Veritas, Bahrain, Paper 7, 2002.
6. ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение».
7. ASTM E 1820-09 Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.
8. ГОСТ 6996-66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств».
9. ГОСТ 9454-78 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах».

UDC 669.3.004

T.N. Belosludtsev, Lead Engineer, Welding, Department of Chief Welder; **A.Yu. Kotolomov**, Candidate of Physical and Mathematical Science, Chief Welder – Head of Department of Chief Welder, Gazprom Transgaz Tchaikovsky LLC; **V.M. Kovekh**, Candidate of Technical Science, Lead Research Associate of the Gas Transportation System (GTS) Reliability and Resource Laboratory, GTS Technical Condition and Integrity Management Center; **Ye.N. Ovsyannikov**, Senior Research Associate of the Gas Transportation System Reliability and Resource Laboratory, GTS Technical Condition and Integrity Management Center of Gazprom VNIIGAZ LLC; **A.V. Chernyshov**, Commercial Director of MONOTEST Scientific Production Enterprise LLC

Evaluation of the parent metal and pipeline welded joints metal mechanical properties using non-destructive (sample-free) tests to measure hardness

The article describes results of preliminary tests of SSM-Mobile-XR mobile plant designed for determining the parent metal and pipeline welded joints metal mechanical properties in route conditions using non-destructive tests. To identify mechanical properties, this plant implements on-line recording of the elastic-plastic contact deformation of the material subjected to one-time or cyclic imprint of a spherical indenter. Following the results of the plotted diagrams computer post-processing, conventional yield limit, strength limit, uniform relative elongation and fracture toughness (cracking resistance under static load) are determined. When testing SSM-Mobile-XR plant, classic destructive metal tests for tension, impact toughness and cracking resistance, performed in accordance with the requirements of the effective standards (GOST 1497-84, GOST 6996-66, GOST 9454-78, DIN EN ISO 15653:2010, ASTM E 1820-09), were used as benchmark methods.

Use of similar plants allows determination of actual mechanical properties of parent metal and pipeline welded joints metal without samples cutting out, which facilitates operational use of less conservative models and methods for evaluation of the welded joints metal operability, provided for in SТО Gazprom 2-2.4-715-2012.

Keywords: welded joint, mechanical properties, deformation diagram, cracking resistance, impact toughness, sample-free testing method, Brinell hardness, destructive testing, operability evaluation, main gas pipeline.

References:

1. СТО Газпром 2-2.4-715-2012 «Методика оценки работоспособности кольцевых сварных соединений магистральных газопроводов» («Methods for operability evaluation of the main gas pipelines ring type welded joints»).
2. ГОСТ 9012-59 «Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю» («Metals. Method of Brinell hardness measurement»).
3. DIN EN ISO 15653:2010 Metallic materials – Method of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds.
4. Markovets M.P. opredelenie mekhanicheskikh svoystv po tverdosti (Mechanical properties determination by hardness). – Moscow: Mashinostroyeniye, 1979. – 191 p.
5. Haggag, Fahmy M. In-Service Nondestructive Measurements of Stress-Strain Curves and Fracture Toughness of Oil and Gas Pipelines: Examples of Fitness-for-Purpose Applications, Proceedings of the 5th International Conference on Pipeline Rehabilitation & Maintenance, Det Norske Veritas, Bahrain, Paper 7, 2002.
6. GOST 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» («Metals. Methods of tension tests»).
7. ASTM E 1820-09 Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.
8. GOST 6996-66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств» («Welded joints. Methods of mechanical properties determination»).
9. GOST 9454-78 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах» («Metals. Method for testing the impact strength at low, room and higher temperature»).