



ОТЧЕТ №2
о проведенных демонстрационных
ИСПЫТАНИЯХ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ
МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛА
КОНСТРУКЦИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ
МЕТОДОМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ
В РАЗЛИЧНЫХ ЗОНАХ

Объект: Астраханский газоперерабатывающий завод

Подготовил:
Технический директор
ООО «Оптон Инжиниринг»

Яременко О.Б. _____

Дата: 14.10.2022

Содержание

1. Общая информация.....	3
2. Исходные данные.....	4
3. Результаты испытаний.....	5
4. Выводы.....	13
5. Приложение 1 – Свидетельство о поверке системы AIS 3000 HD.....	16
6. Приложение 2 – Свидетельство об утверждении типа СИ	18



1. Общая информация

Система FRONTICS предназначена для определения механических характеристик материалов методом неразрушающего контроля. В течение нескольких минут определяются такие параметры материала, как предел прочности и предел текучести, трещиностойкость (вязкость разрушения), твердость.

Система мобильна и проста в использовании. Полученные результаты сопоставимы с результатами, полученными в лаборатории разрушающего контроля. Не требуется подготовка образцов. Система применима в цеховых условиях и в полевых условиях на действующих объектах.

В основе принципа работы системы лежит метод инструментального индентирования – вдавливание наконечника (индентора) в исследуемый материал. Суть метода инструментального индентирования заключается в определении зависимости усилия на инденторе (усилия вдавливания) от глубины вдавливания (глубины проникновения индентора в материал) на различных глубинах вдавливания при постепенном возрастании усилия.

Глубина отпечатка не превышает 150 мкм, диаметр отпечатка - до 0,5 мм, что не нарушает целостности материала конструкции и не меняет его физические свойства. При вдавливании

в материал под индентором создаются условия напряжения и соответствующей ему деформации. Это позволяет провести действительно местное измерение реакции материала при деформации в широком диапазоне, по которому составляется диаграмма механических параметров материала – диаграмма «напряжение-деформация».

Длительность одного испытания для получения требуемой характеристики составляет всего 3–5 минут и позволяет получить мгновенный результат измерения механических параметров. Прочность на растяжение и трещиностойкость определяются по специальным оценочным кривым из данных испытания вдавливанием, а остаточное напряжение — из диаграммы зависимости глубины погружения индентора от нагрузки, которая позволяет количественно определить остаточное напряжение материала. Эта техника отличается повышенной воспроизводимостью и точностью по сравнению с другими методами испытаний.

Результаты измерения получаются непосредственно после завершения испытания. Система позволяет проводить испытания на малых площадях, сварных соединениях и в ЗТВ (зона термического влияния).



2. Исходные данные

Испытания проведены для:	ООО «Газпром переработка»
Период проведения испытаний:	с 11.10.2022 г. по 13.06.2022 г.
Место проведения испытаний:	Филиал ООО «Газпром переработка» - Астраханский газоперерабатывающий завод, лаборатория.
Оборудование:	FRONTICS AIS 3000 HD зав. № AIS30HD-IH-01-R007
Свидетельство о поверке:	№С-С/03-08-2022/176805358, действительно до 02.08.2023.
Объект испытаний:	<p><u>1. Змеевик печи - Труба \varnothing108x8 мм:</u> Марка материала: W1.9380 Рабочая среда: водородосодержащий газ (внутри), дымовые газы (снаружи); Срок эксплуатации: 39 лет</p> <p><u>2. Линия 30" P72.107DB16:</u> Марка материала: труба – A333Gr6; отвод – A420 WPL6 Рабочая среда: насыщенный амин; Срок эксплуатации: 10 лет</p> <p><u>3. Линия 24" P72.109.0.DB16 (название линии по паспорту):</u> Марка материала: труба 18" – A333Gr6; Рабочая среда: насыщенный амин; Срок эксплуатации: 25 лет</p> <p><u>4. Линия 24" P72.108.0.DB16:</u> Марка материала: труба – A333Gr6; Рабочая среда: насыщенный амин; Срок эксплуатации: 25 лет</p> <p><u>5. Линия 12" P72.315:</u> Марка материала: труба – A333Gr6; отвод – A420GrWPL6 Рабочая среда: раствор диэтанолamina (ДЭА); Срок эксплуатации: 25 лет</p> <p><u>6. Линия л.100.45d.72.00.DB03:</u> Марка материала: сталь 20 Рабочая среда: диэтанолamin (ДЭА) Срок эксплуатации: 3 года</p>
Перечень используемых НТД:	KS B 0950, ISO/TR 29381, ASTM E2546 – 15, ISO 14577-1-2002

3. Результаты испытаний

3.1 Змеевик печи:

Труба $\varnothing 108 \times 8$ мм

Марка материала: W1.7380

Рабочая среда: водородосодержащий газ (внутри), дымовые газы (снаружи);

Срок эксплуатации: 39 лет



Рисунок 1 – Испытание участков (ПЗ.2-1) змеевика печи в лаборатории завода

Таблица 1.1 – Механические характеристики металла змеевика печи (ПЗ.2 -1) - большой кусок, демонтирован в 2022 г.

Инспектируемый элемент / зона испытаний	Файл FRONTICS с данными испытаний	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$	Временное сопротивление, σ_b	Трещиностойкость, $K_{IC} (+20^\circ C)$	Степень упрочнения
		МПа	МПа	МПа·м ^{0,5}	n
ЗОНА - 1 Змеевик (ПЗ.2 -1) - большой кусок	Test 1	296	539	247	0,15
	Test 2	299	541	259	0,17
	Test 3	306	548	279	0,19
Среднее значение		300	542	262	0,17
ЗОНА - 2 Змеевик (ПЗ.2 -1) - большой кусок	Test 1	299	538	266	0,18
	Test 2	298	538	258	0,17
	Test 3	302	541	272	0,19
Среднее значение		300	539	265	0,18
ЗОНА -3 Змеевик (ПЗ.2 -1) - большой кусок	Test 1	303	550	259	0,16
	Test 2	300	551	247	0,15
	Test 3	300	549	245	0,14
Среднее значение		301	550	250	0,15
Среднее значение для участка змеевика ПЗ.2 - 1		300	544	259	0,17



Рисунок 2 – Участок (ПЗ.2 – 2) змеевика печи, демонтирован в 2022 году, имеет повышенное количество выявленных дефектов.

Таблица 1.2 – Механические характеристики металла змеевика печи (ПЗ.2 - 2) - малый кусок. Участок с повышенным количеством выявленных дефектов, демонтирован в 2022 г.

Инспектируемый элемент / зона испытаний	Файл FRONTICS с данными испытаний	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$	Временное сопротивление, σ_b	Трещиностойкость, $K_{Ic}(+20^\circ C)$	Степень упрочнения
		МПа	МПа	МПа·м ^{0,5}	n
ЗОНА - 1 Змеевик (ПЗ.2 - 2) - малый кусок	Test 1	273	502	219	0,14
	Test 2	281	508	240	0,17
	Test 3	275	506	220	0,14
Среднее значение		276	506	226	0,15
ЗОНА - 2 Змеевик (ПЗ.2 - 2) - малый кусок	Test 1	290	522	252	0,18
	Test 2	292	529	251	0,17
	Test 3	289	530	236	0,15
Среднее значение		290	527	246	0,16
Среднее значение для участка змеевика ПЗ.2 - 2		283	516	236	0,16



Рисунок 3 – Участок (ПЗ.1) змеевика печи, участок демонтирован в 2020 году.

Таблица 1.3 – Механические характеристики металла змеевика печи (ПЗ.1 – демонтирован в 2020 г.)

Инспектируемый элемент / зона испытаний	Файл FRONTICS с данными испытаний	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$	Временное сопротивление, σ_b	Трещиностойкость, $K_{Ic}(+20^\circ C)$	Степень упрочнения
		МПа	МПа	МПа·м ^{0,5}	n
ЗОНА - 1 Змеевик (ПЗ.1 – демонтирован в 2020 г.)	Test 1	311	560	277	0,18
	Test 2	310	557	274	0,18
	Test 3	304	552	258	0,16
	Test 4	307	554	265	0,17
Среднее значение		308	556	269	0,17





Рисунок 4 – Участок змеевика печи со сварным соединением после испытаний индентированием.

Таблица 1.4 – Механические характеристики металла змеевика печи (ПЗ.2 - 3) – кусок со св. швом.

Инспектируемый элемент / зона испытаний	Файл FRONTICS с данными испытаний	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$	Временное сопротивление, σ_b	Трещиностойкость, $K_{IC}(+20^\circ C)$	Степень упрочнения
		МПа	МПа	МПа·м ^{0,5}	n
ОМ-1 + ОШЗ-1 Змеевик (ПЗ.2 - 3)	Test 1	296	545	240	0,14
	Test 2	287	529	231	0,14
	Test 3	292	530	248	0,16
	Test 4	309	546	317	0,26
	Test 5	297	545	246	0,15
	Test 6	355	598	316	0,20
	Test 7	299	572	220	0,1
Среднее значение		302	552	260	0,16
СВАРНОЙ ШОВ Змеевик (ПЗ.2 - 1)	Test 1	352	668	266	0,10
	Test 2	345	675	245	0,08
	Test 3	340	638	266	0,11
Среднее значение		346	660	259	0,09
ОМ-2 + ОШЗ-2 Змеевик (ПЗ.2 - 3)	Test 1	286	539	212	0,11
	Test 2	281	518	222	0,13
	Test 3	295	533	254	0,17
	Test 4	292	536	238	0,14
	Test 5	297	536	255	0,17
	Test 6	284	522	227	0,14
Среднее значение		289	531	235	0,14

Таблица 1.5 – Механические характеристики металла змеевика печи, полученные классическими методами испытаний в соответствии с ГОСТ 1497–84, ГОСТ 9454-78; ГОСТ 9013-59.

№ образца	ГОСТ 1497-84				ГОСТ 9454-78	ГОСТ 9013-59
	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$	Временное сопротивление, σ_b	Относительное удлинение	Относительное сужение	Ударная вязкость KCV (+20° С)	Твердость
	МПа	МПа	%	%	Дж/см ²	НВ
1	354	475	20,5	67,9	106,3	137
2	359	489	18,5	71,6	166,8	139
3	371	501	17,0	71,6	97,3	130
4	359	478	19,0	75,0	101,5	137
5	359	501	20,5	71,6	127,3	137
Среднее	360	489	19,1	71,5	119,8	136

3.2 Линия 30" P72.107DB16:

Марка материала: труба – А333Gr6; отвод – А420 WPL6

Рабочая среда: насыщенный амин;

Срок эксплуатации: 10 лет.

Таблица 2.0.1 – Механические характеристики металла трубы в соответствии с «Стандартные технические условия на стальные трубы бесшовные и сварные для работы при низких температурах - ASTM A333 Grade 6».

ТУ	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$	Временное сопротивление, σ_b	Относительное удлинение (продольн. образцы)	Относительное удлинение (попер. образцы)	Работа удара KV (- 45° С)
	МПа	МПа	%	%	Дж
ASTM A333 Grade 6	> 240	> 415	> 30	> 16,5	> 18

Таблица 2.0.2 – Механические характеристики металла отвода в соответствии с «Стандартные технические условия на трубные фитинги из ковальной углеродистой и легированной стали для работы в условиях низких температур - ASTM A420 Grade WPL6».

ТУ	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$	Временное сопротивление, σ_b	Относительное удлинение (продольн. образцы)	Относительное удлинение (попер. образцы)	Работа удара KV (- 45° С)
	МПа	МПа	%	%	Дж
ASTM A420 Grade WPL6	> 240	415 - 685	> 22	> 12	> 17,6

Таблица 2.0.3 – Химический состав металла трубы и отвода в соответствии со стандартными техническими условиями.

ТУ	Содержание химических элементов, %											
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Va	Nb	Cu	Fe
Труба (ASTM A333 Grade 6)	< 0,3	> 0,1	0,29-1,35	< 0,025	< 0,025	-	-	-	-	-	-	ост.
Отвод (ASTM A420 Gr.WPL6)	< 0,3	0,15-0,40	0,50-1,35	< 0,035	< 0,04	< 0,3	< 0,12	< 0,4	< 0,08	< 0,02	< 0,4	ост.





Рисунок 5 – Испытание металла элементов технологической линии 30" P72.107DB16.

Таблица 2.1 – Механические характеристики металла испытанных элементов технологической линии 30" P72.107DB16.

Инспектируемый элемент / зона испытаний	Файл FRONTICS с данными испытаний	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$	Временное сопротивление, σ_b	Трещиностойкость, $K_{IC}(+15^\circ C)$	Степень упрочнения
		МПа	МПа	МПа·м ^{0,5}	n
<u>ОСНОВНОЙ МЕТАЛЛ</u> Труба 30" – A333Gr6	Test 1	391	552	220	0,11
	Test 2	403	571	229	0,11
	Test 3	426	582	282	0,17
Среднее значение		407	569	244	0,13
<u>ЗТВ</u> Труба 30" – A333Gr6	Test 1	487	667	330	0,17
	Test 2	469	662	280	0,12
	Test 3	453	721	231	0,06
Среднее значение		470	683	281	0,12
<u>СВАРНОЙ ШОВ</u> Труба 30" + Отвод 30"	Test 1	421	593	246	0,12
	Test 2	426	596	254	0,12
	Test 3	421	585	258	0,13
Среднее значение		423	592	252	0,12
<u>ОСНОВНОЙ МЕТАЛЛ</u> Отвод 30" – A420 WPL6	Test 1	370	513	221	0,14
	Test 2	364	510	211	0,13
	Test 3	369	512	220	0,14
Среднее значение		368	512	217	0,13
<u>ЗТВ</u> Отвод 30" – A420 WPL6	Test 1	377	546	200	0,09
	Test 2	388	548	220	0,11
Среднее значение		382	547	210	0,10

3.3 Линия 24" P72.109.0.DB16 (название линии по паспорту):

Марка материала: труба 18" – А333Gr6;

Рабочая среда: насыщенный амин;

Срок эксплуатации: 25 лет



Рисунок 6 - Испытание металла элементов технологической линии 24" P72.109.0.DB16. Испытываемая труба - 18" (А333Gr.6).

Таблица 3.1 – Механические характеристики металла испытанных элементов технологической линии 24" P72.109.0.DB16 (название линии по паспорту).

Инспектируемый элемент / зона испытаний	Файл FRONTICS с данными испытаний	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$	Временное сопротивление, σ_b	Трещиностойкость, $K_{Ic}(+15^\circ C)$	Степень упрочнения
		МПа	МПа	МПа·м ^{0,5}	n
ОСНОВНОЙ МЕТАЛЛ Труба 18" – А333Gr.6	Test 1	317	445	172	0,11
	Test 2	323	450	182	0,13
	Test 3	330	457	192	0,14
Среднее значение		323	451	182	0,12

3.4 Линия 24" P72.108.0.DB16:

Марка материала: труба – А333Gr.6;

Рабочая среда: насыщенный амин;

Срок эксплуатации: 25 лет

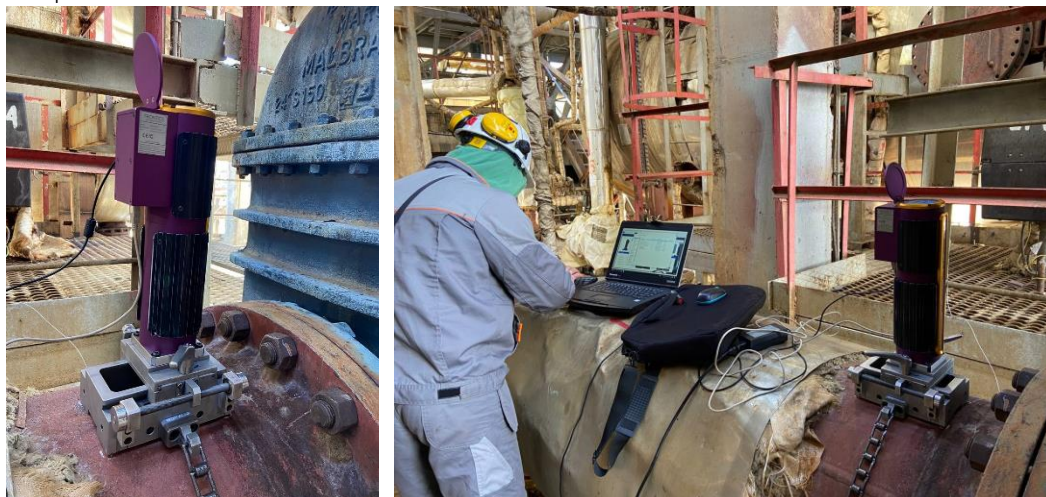


Рисунок 7 - Испытание металла элементов технологической линии 24" P72.108.0.DB16.



Таблица 4.1 – Механические характеристики металла испытанных элементов технологической линии 24” P72.108.0.DB16.

Инспектируемый элемент / зона испытаний	Файл FRONTICS с данными испытаний	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$	Временное сопротивление, σ_b	Трещиностойкость, $K_{Ic}(+15^\circ C)$	Степень упрочнения
		МПа	МПа	МПа·м ^{0,5}	n
<u>ОСНОВНОЙ МЕТАЛЛ</u> Труба 24” – А333Gr.6	Test 1	338	480	183	0,10
	Test 2	353	491	206	0,13
	Test 3	364	502	222	0,15
	Test 4	365	504	222	0,14
	Test 5	367	509	219	0,14
Среднее значение		358	497	211	0,13

3.5 Линия 12” P72.315:

Марка материала: труба – А333Gr.6; отвод – А420Gr.WPL6

Рабочая среда: раствор диэтаноламина (ДЭА);

Срок эксплуатации: 25 лет



Рисунок 8 - Испытание металла элементов технологической линии 12” P72.315.

Таблица 5.1 – Механические характеристики металла испытанных элементов технологической линии 12” P72.315.

Инспектируемый элемент / зона испытаний	Файл FRONTICS с данными испытаний	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$	Временное сопротивление, σ_b	Трещиностойкость, $K_{Ic}(+20^\circ C)$	Степень упрочнения
		МПа	МПа	МПа·м ^{0,5}	n
<u>ОСНОВНОЙ МЕТАЛЛ</u> Труба 12” – А333Gr.6	Test 1	366	510	210	0,12
	Test 2	380	542	209	0,10
	Test 3	389	562	209	0,09
	Test 4	387	571	193	0,07
	Test 5	378	561	197	0,08
Среднее значение		380	549	203	0,09



СВАРНОЙ ШОВ Труба 12" + Отвод 12"	Test 1	428	590	268	0,14
	Test 2	423	587	260	0,14
	Test 3	421	582	264	0,14
Среднее значение		424	586	264	0,14
ОСНОВНОЙ МЕТАЛЛ Отвод 12" – A420Gr.WPL6	Test 1	420	579	266	0,15
	Test 2	418	572	276	0,17
	Test 3	432	597	274	0,15
	Test 4	414	567	274	0,17
Среднее значение		421	579	273	0,16

3.6 Линия л.100.45d.72.00.DB03:

Марка материала: труба $\varnothing 108$ мм - сталь 20; отвод $\varnothing 108$ мм – сталь 20;

Рабочая среда: диэтаноламин (ДЭА)

Срок эксплуатации: 3 года



Рисунок 9 - Испытание металла элементов технологической линии л.100.45d.72.00.DB03.

Таблица 6.1 – Механические характеристики металла испытанных элементов технологической линии л.100.45d.72.00.DB03.

Инспектируемый элемент / зона испытаний	Файл FRONTICS с данными испытаний	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$	Временное сопротивление, σ_b	Трещиностойкость, $K_{Ic}(+20^\circ C)$	Степень упрочнения
		МПа	МПа	МПа·м ^{0,5}	n
ОСНОВНОЙ МЕТАЛЛ Труба $\varnothing 108$ – Сталь 20	Test 1	310	515	184	0,09
	Test 2	328	549	191	0,08
	Test 3	314	510	198	0,11
	Test 4	320	507	217	0,14
Среднее значение		318	520	197	0,10
ОСНОВНОЙ МЕТАЛЛ Отвод $\varnothing 108$ – Сталь 20	Test 1	317	526	188	0,08
	Test 2	315	515	192	0,10
	Test 3	319	527	191	0,09
Среднее значение		317	523	190	0,09



4. Выводы

В результате проведенной работы, была показана возможность достоверной оценки механических характеристик материала натуральных конструкций действующих технологических трубопроводов неразрушающим способом с помощью системы экспресс-диагностики материалов AIS-3000HD компании Frontics, в основе работы которой лежит метод инструментального индентирования.

Линии технологических трубопроводов, предоставленные для испытаний, в основном не имели исходных данных (физико-механических характеристик) для сравнения, в связи с этим, возможность качественной и количественной оценки степени изменения механических характеристик, под воздействием производственных условий эксплуатации, была показана на примере трубопровода змеевика печи, участки которого были демонтированы в различное время, а на металле одного из участков змеевика силами лаборатории АГПЗ был проведен комплекс классических разрушающих испытаний (испытание на растяжение ГОСТ 1497-84, Испытание на ударный изгиб ГОСТ 9454-78, Испытание твердости ГОСТ 9013-59). Помимо этого, сравнению были подвергнуты механические свойства участка змеевика с повышенным количеством выявленных дефектов. Также характерные изменения механических характеристик были выявлены на трубопроводе технологической линии - 30" P72.107DB16, составные элементы которой имели различный срок эксплуатации в связи с ранее проведенной заменой участка трубы в рамках ремонтных работ.

Таким образом испытания индентированием были проведены на 4-х участках змеевика печи. Марка стали змеевика по паспорту W 1.7380 10Cr Mo9.10 (отечественный аналог – сталь 1X2M1). Общий срок эксплуатации данной конструкции – 39 лет, среда эксплуатации: водородосодержащий газ (внутри), дымовые газы (снаружи). Конструкция змеевика эксплуатировалась при повышенной температуре в интервале 427–530 °С при рабочем давлении 3,02 МПа. После испытаний участков, демонтированных в различное время (разница во времени демонтажа - 2 года), на участке ПЗ.2-1, который был демонтирован позже участка ПЗ.1, выявлены изменения механических характеристик: снижение предела прочности (σ_b) – на 12 МПа (2,2 %), предела текучести ($\sigma_{0,2}$) – на 8 МПа (2,2%), трещиностойкости (K_{IC}) – на 10 МПа·м^{0,5} (3,7 %), (см. таблицы 1.1 и 1.3). При этом, более значительные изменения механических характеристик получены на участке ПЗ.2-2, имеющем повышенное количество выявленных дефектов: снижение предела прочности (σ_b) – на 40 МПа (7,2 %), предела текучести ($\sigma_{0,2}$) – на 25 МПа (8,1%), трещиностойкости (K_{IC}) – на 33 МПа·м^{0,5} (12,3 %), (см. таблицы 1.2 и 1.3). Данные изменения механических свойств стали змеевика связано со старением, которое происходит при длительной эксплуатации при повышенной температуре и избыточном давлении. При длительной эксплуатации труб в этих условиях активизируются одновременно процессы старения и ползучести. В результате происходит закономерное снижение пластичности, вязкости и трещиностойкости стали. Длительная выдержка при повышенной температуре также приводит к процессам ползучести, включая изменение зеренной структуры феррита с распрямлением границ зерен и укрупнением зерен, в предельном случае может иметь место рекристаллизация зерен феррита. Это приводит к снижению прочностных свойств стали. Поэтому при высокотемпературном старении стали может (в зависимости от условий и длительности эксплуатации) происходить одновременное снижение как вязкопластических, так и прочностных характеристик металла. Таким образом, в случае металла змеевика, вследствие процессов старения и ползучести при длительной эксплуатации, наблюдается деградация структуры стали, что привело к выявленным изменениям. Однако данные процессы изменения свойств имеют нелинейный характер и предельное состояние конструкции, может произойти гораздо раньше нормативного срока эксплуатации конструкции. Этому способствуют скопления внутренних дефектов, микродефекты поверхности, коррозионные дефекты и зоны с повышенной концентрацией напряжений, которые в совокупности с процессами описанными выше приводят критическому состоянию конструкции, предшествующему аварийной ситуации. В связи с этим очень важно производить периодический мониторинг состояния конструкции с оценкой деградации физико-механических характеристик металла.

Краткая справка: для понимания физического смысла параметра трещиностойкости следует рассмотреть распределение напряжений у кромки (вершины) трещины, либо трещиноподобного дефекта, либо иного дефекта-концентратора напряжений, способного стать очагом разрушения, что требует решения нетривиальной задачи механики разрушения и должно быть описано системой уравнений, учитывающей возможное развитие и рост трещиноподобного дефекта в различных направлениях. Однако для решения прикладных инженерных задач, достаточно параметра K , который не описывает распределения поля напряжений, а только определяет его интенсивность. Он зависит от величины приложенного напряжения, размера трещины / трещиноподобного дефекта и конфигурации тела. С физической точки зрения характеристика K отражает концентрацию напряжений в теле вследствие образования в нем



трещины. Или, иначе говоря, параметр K определяет величину усилий, передающихся в область у вершины трещины при воздействии внешней нагрузки (приложенного напряжения). Критическое значение параметра K_{IC} соответствует критической величине внешней нагрузки (P_c), при которой происходит «старт» трещины в тело материала. Чем выше значение параметра K_{IC} , тем при большей P_c и соответствующей интенсивности напряжений у вершины трещины происходит ее «старт» в тело материала. Чем выше K_{IC} , тем больше трещиностойкость материала на стадии инициирования разрушения.

Из этого следует, что параметр трещиностойкости при оценке технического состояния конструкции имеет смысл при наличии дефекта в материале (либо концентратора напряжений) и служит для оценки критичности размеров того или иного дефекта с учётом его ориентации в пространстве при известных условиях нагружения. Т.е. характеризует снижение работоспособности конструкции относительно ее временного сопротивления при наличии в конструкции трещиноподобного дефекта или дефекта способного иницировать развитие трещины. Поэтому очень важно оценивать деградацию параметров трещиностойкости материала конструкции на участках с выявленными дефектами или участках склонных к высокой вероятности их образования.

Разница в механических характеристиках между результатами классических испытаний проведенных силами лаборатории АГПЗ и данными полученными методом индентирования Frontics объясняется следующими основными причинами: 1 – направление растягивающего усилия при классических испытаниях (вдоль образующей трубы) отличалось от направления испытаний индентированием (наружная поверхность трубопровода), что в следствии анизотропии свойств проката повлияло на полученный результат; 2 – забор проб (образцов) для классических разрушающих испытаний выполнен в зоне отличной от участков, где выполнялись испытания методом индентирования Frontics, а механические и термические воздействия при вырезке образцов вносят изменения в структуру и свойства стали, что отражается на конечном результате растягивающих испытаний.

Также, для исследования на предмет деградации механических свойств, была предоставлена технологическая линия 30" P72.107DB16, составные элементы которой имели различный срок эксплуатации. Испытания вдавливанием были проведены на натурной конструкции участка трубопровода со сварным швом в зонах основного металла сваренных элементов, а также в ЗТВ (зона термического влияния) и на сварном шве. Срок эксплуатации данной линии - 10 лет. При этом труба 30 " из стали A333Gr.6 имела меньший срок эксплуатации чем отвод из стали A420 WPL6, т. к. ранее была произведена замена дефектного участка трубы в рамках ремонтных работ. В результате испытаний металла элементов технологической линии выявлена существенная разница в механических характеристиках между металлом трубы и отводом: предел прочности (σ_b) отвода ниже чем у трубы на 57 МПа (10 %), предел текучести ($\sigma_{0,2}$) ниже на 39 МПа (9,6%), трещиностойкость (K_{IC}) ниже на 27 МПа·м^{0,5} (11,1 %), (см. таблицу 2.1). Принимая во внимание, что данные детали в соответствии со стандартными техническими условиями (см. таблицы: 2.0.1, 2.0.2, 2.0.3) имеют близкий химический состав, однако технология производства отводов (ковка стали) и присутствие в хим. составе стали некоторого количества элементов упрочняющих твердый раствор Cr, Si, Mo, Nb, V, что обеспечивает более высокие прочностные и вязко-пластические характеристики, поэтому механические свойства отвода предположительно должны быть несколько выше чем у трубы. Однако после испытаний наблюдается обратная картина, что является свидетельством деградации свойств стали отвода, который эксплуатировался более длительное время. Причины, которые могли вызвать подобные изменения, могут быть обусловлены водородосодержащей средой (насыщенный амин), транспортируемой по линии и влияющей на структуру и свойства стали, а также процессами старения и ползучести, описанными выше, однако это требует более углубленных дополнительных испытаний и исследований. Помимо этого, было выявлено, что характеристики полученные в ЗТВ (около 2 мм от линии сплавления) со стороны трубы значительно превышают значения характеристик для основного металла трубы, а так же металла сварного шва: предел прочности (σ_b) в ЗТВ выше чем в основном металле трубы на 114 МПа (20 %), предел текучести ($\sigma_{0,2}$) в ЗТВ выше на 63 МПа (15,5%), (см. таблицу 2.1). Данная разница может быть обусловлена рядом причин: 1 - нарушена технология выполнения сварочных работ во время выполнения ремонтной замены участка трубы (не выполнялся предварительный подогрев при низкой температуре окружающего воздуха и не обеспечено замедленное охлаждение после сварки либо нарушены режимы сварки); 2 – не проводилась либо проведена с нарушениями после-сварочная термическая обработка, если таковая была предусмотрена технологией производства работ для данной конструкции. Данная разница в прочностных характеристиках свидетельствует о изменении структуры стали в ЗТВ (различная зеренная структура и наличие внутренних сварочных напряжений), что в последствии может стать причиной образования и роста дефектов в околосварочной зоне в процессе эксплуатации.



После проведенных испытаний вдавливанием глубина отпечатков не превысила 150 мкм (0,15 мм), диаметр каждого отпечатка был в пределах 0,5 мм, что не нарушило целостности материала конструкции и не изменило ее физические свойства. Испытание индентированием на системе AIS 3000HD компании Frontics позволило получить мгновенный результат измерения механических параметров. Данный метод ввиду своей локальности воздействия на исследуемый материал и конструкцию позволил провести испытания на малых площадях и в сварном соединении, а также на действующем объекте и натуральных конструкциях, где не предоставляется возможным использование лабораторного метода. Таким образом системы экспресс-диагностики материалов серии AIS способны найти применение в диагностических службах газоперерабатывающей отрасли, а также во многих других направлениях промышленных производств.


Принимая во внимание уникальность и широкую номенклатуру возможностей метода инструментального индентирования реализованного в диагностических системах AIS Frontics, его применение позволило бы производить более качественную диагностику и технологичную оценку работоспособности промышленных конструкций, тем самым снизив консервативность оценки их работоспособности в соответствии с действующей нормативно-технической документацией и более рационально принимать решения о предстоящей замене, капитальном ремонте или продлении ресурса ответственных узлов и компонентов находящихся в эксплуатации без вырезки образцов свидетелей и длительных остановок производственного технологического процесса. Также, периодический мониторинг состояния и физико-механических свойств ответственных узлов технологического оборудования и трубопроводов завода может помочь предотвратить крупные аварии, приводящие к разрушениям дорогостоящего оборудования и влекущие за собой большие финансовые потери.



Приложение 1
Свидетельство о поверке
системы AIS 3000 HD

Уральский научно-исследовательский институт метрологии - филиал
Федерального государственного унитарного предприятия
«Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им.Д.И.Менделеева»
(УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им.Д.И.Менделеева»)

620075, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4
тел: +7(343)350-26-18, факс: +7(343)350-20-39, uniim@uniim.ru, www.uniim.ru
Уникальный номер записи об аккредитации в реестре аккредитованных лиц RA.RU.311473



ВНИИМ
им. Д.И.Менделеева

СВИДЕТЕЛЬСТВО

О ПОВЕРКЕ

№ С-С/03-08-2022/176805358

Действительно до «02» августа 2023 г.

Средство измерений Установка экспресс-диагностики материалов AIS модификация
наименование, тип, модификация средства измерений, регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, присвоенный при утверждении типа

AIS3000HD_78594-20

в составе _____

заводской номер AIS30HD-ИИ-01-R007

поверено _____ **в полном объеме**
наименование единиц величин, диапазонов измерений, на которых поверено средство измерений

в соответствии с МП 01-261-2020 «ГСИ. Установки экспресс-диагностики материалов AIS.
наименование или обозначение документа, на основании которого выполнялась поверка

Методика поверки _____

с применением эталонов Меры длины концевые плоскопараллельные до 100 мм, зав. №
регистрационный номер (или) наименование, тип, заводской номер, разряд, класс или погрешность эталонов, применяемых при поверке

828115 (рег.№38376.08.4P.00113548), разряд 4; Динамометр электронный переносной

ДЭП/6-1Д-2У-0,5, зав. № 080934 (рег.№66698.17.2P.00245322), разряд 2 ; Весы


неавтоматического действия GP-61KS № 14718811

при следующих значениях влияющих факторов относительная влажность воздуха 48,8 %;
перечень влияющих факторов,

температура окружающего воздуха 24,2 °С
нормированных в документе на методику поверки, с указанием их значений

и на основании результатов первичной (периодической) поверки признано
неуказанное зачеркнуть

пригодным к применению.

Знак поверки 

Постоянный адрес записи сведений о результатах поверки в ФИФ:
<https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/results/1-176805358>

Поверитель _____ Замятин Д.С.
фамилия, инициалы

И.о. заведующего лабораторией 261 _____ Цай И.С.
должность руководителя или другого уполномоченного лица подпись фамилия, инициалы


Дата поверки
«03» августа 2022 г.



Метрологические характеристики и (или) протокол поверки

Протокол поверки № 29070 от 03 августа 2022 года.

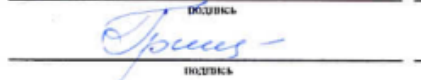
Поверитель


ПОДПИСЬ

Замятин Д.С.

фамилия, инициалы

Менеджер по качеству


ПОДПИСЬ

Грищенко В.Ю.

фамилия, инициалы

серия E № 017781



Приложение 2
Свидетельство об утверждении
типа СИ



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

об утверждении типа средств измерений

ОС.С.28.005.А № 77639

Срок действия до 29 июня 2025 г.

НАИМЕНОВАНИЕ ТИПА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ
Установки экспресс-диагностики материалов AIS

ИЗГОТОВИТЕЛЬ
FRONTICS, Inc., Южная Корея

РЕГИСТРАЦИОННЫЙ № 78594-20

ДОКУМЕНТ НА ПОВЕРКУ
МП 01-261-2020

ИНТЕРВАЛ МЕЖДУ ПОВЕРКАМИ 1 год

Тип средств измерений утвержден приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от **29 июня 2020 г. № 1105**

Описание типа средств измерений является обязательным приложением к настоящему свидетельству.

Заместитель Руководителя
Федерального агентства

А.В.Кулешов

"06." 07 2020 г.

Серия СИ

№ 044834