ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

Основные механизмы коррозионного разрушения деталей оборудования. Способы повышения коррозионной стойкости материалов. Виды коррозионных испытаний

Докладчик:
Руководитель ДСМ ООО «ИТ-Сервис», к.т.н.
Чистопольцева Елена Александровна

Механизм протекания углекислотной коррозии

Схема развития язвенной CO2 коррозии

Образование угольной кислоты

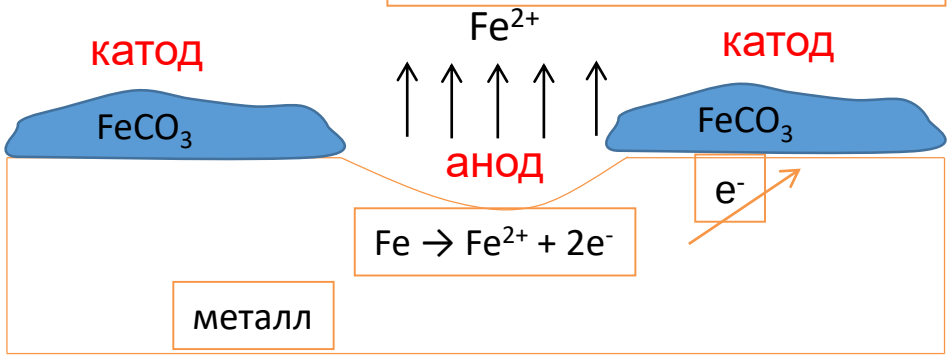
$CO_{2(газ)} + H_2O_{(жидк)} \leftrightarrow H_2CO_{3(жидк.)}$

$Fe^{2+} + CO_2^{3-} \rightarrow FeCO_3$

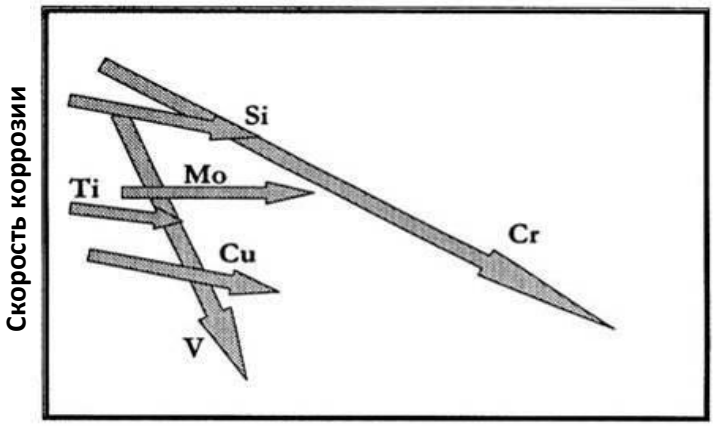
$2H_2CO_3 + 2e^- \rightarrow H_2 + 2HCO_3^-$

$2HCO_3 + 2e^- \rightarrow H_2 + 2CO_3^{2-}$

$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$



Влияние легирующих элементов



(Микро) легирующая добавка

Повышение минерализации увеличивает вероятность протекания язвенной коррозии

pH 5.5-6.5

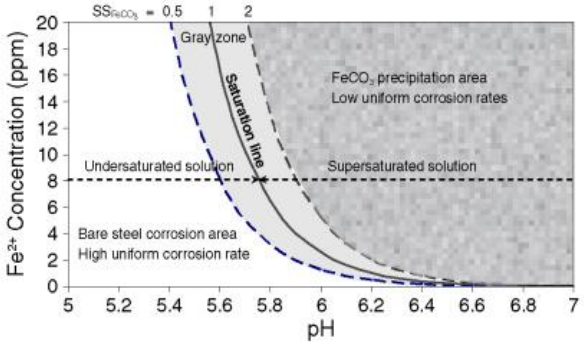


FIGURE 11. *Calculated pH effect on solubility of $FeCO_3$ and the "gray zone" at T = 80°C, p_{CO_2} = 0.53 bar, [NaCl] = 1 wt%.*

pCO2 < 2bar

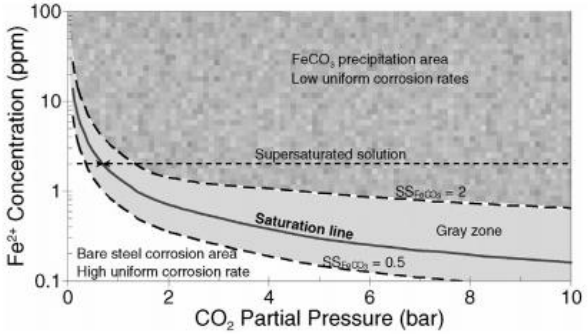


FIGURE 13. *Calculated effect of CO_2 partial pressure on solubility of $FeCO_3$ and the "gray zone" at T = 80°C, pH 6.0, [NaCl] = 1 wt%.*

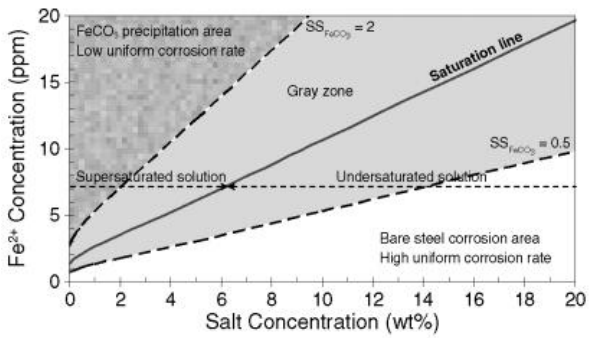


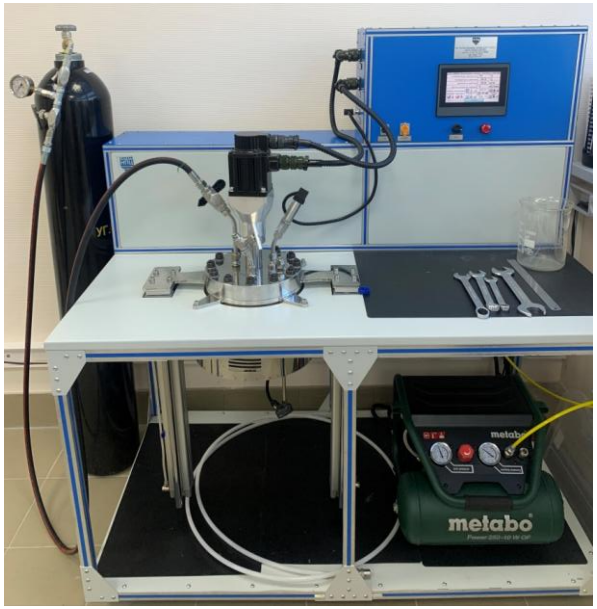
FIGURE 14. *Salt effect on the "gray zone" width at T = 80°C, p_{CO_2} = 0.53 bar, pH 6.0, [NaCl] = 1 wt%.*

Результаты лабораторных испытаний различных марок сталей в CO_2-содержащей среде

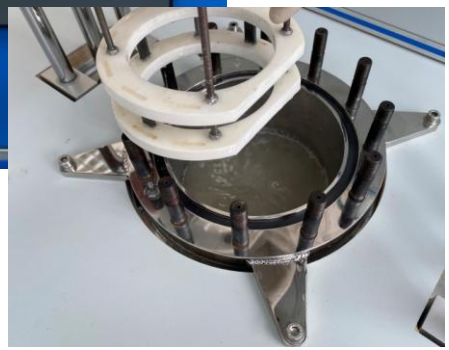
Химический состав исследуемых сталей

Марки стали	Содержание элементов, %										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al	S	P
09Г2С	0,13	0,66	1,36	0,03	0,10	0,16	0,02	<0,01	0,01	0,006	0,011
20	0,20	0,18	0,50	0,06	0,08	0,011	0,03	<0,01	0,029	0,002	0,003
45Г	0,45	0,25	0,97	0,26	0,24	0,23	-	-	0,02	-	-
30ХГМА	0,30	0,21	0,95	0,78	0,096	0,17	0,30	0,004	0,022	0,005	0,007
30ХМА	0,29	0,29	0,51	0,89	0,185	0,20	0,15	<0,01	0,033	0,006	0,012
05ХФА	0,05	0,31	0,66	0,64	0,065	0,14	0,02	0,06	0,034	0,004	0,006
13ХФА	0,15	0,24	0,58	0,58	0,091	0,17	0,02	0,05	0,03	0,004	0,011
18Х1МФБ	0,18	0,28	0,59	1,01	0,14	0,19	0,15	0,07	0,04	0,009	0,007
18Х3МФБ	0,17	0,25	0,57	2,55	0,06	0,01	0,12	0,06	0,029	0,005	0,011
05Х5М	0,07	0,45	0,43	4,46	0,13	0,18	0,25	<0,01	0,04	0,005	0,003
Cr9	0,13	0,57	0,54	8,35	0,11	0,04	0,92	-	-	0,002	0,009
20Х13	0,19	0,33	0,34	12,20	0,25	0,11	-	0,02	-	0,004	0,020
316L	0,06	0,58	1,28	16,6	10,5	0,40	2,12	0,056	<0.01	0,012	0,033

Вид автоклавной установки для проведения испытаний



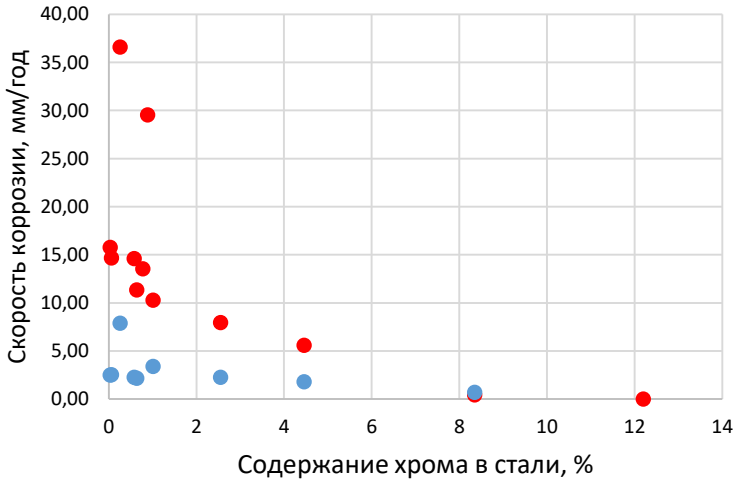


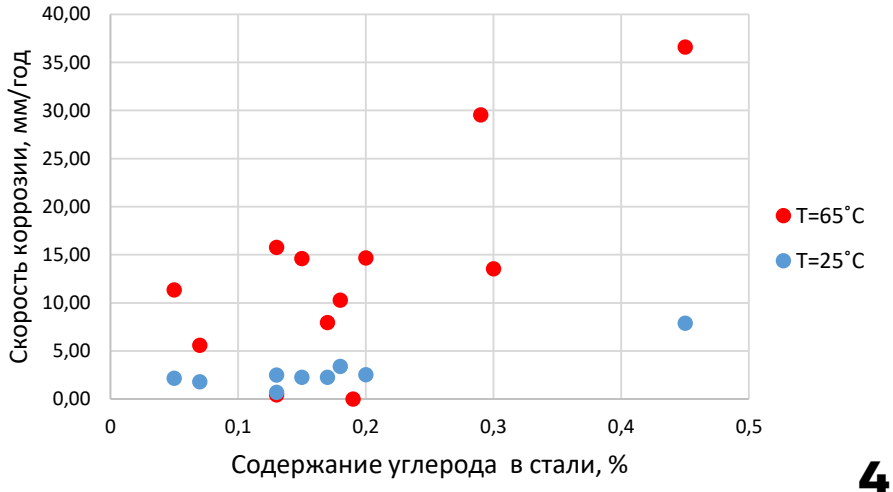


Результаты испытаний различных марок сталей в CO_2-содержащей среде

Объект испытания	P CO_2, атм	25 г/л NaCl+25 г/л $CaCl_2$, 25°C				25 г/л NaCl +25 г/л $CaCl_2$, 65°C				25 г/л NaCl +25 г/л $CaCl_2$+10 мг/л Na_2S, 65°C	
		24ч	48ч	72ч	900 об/мин	24ч.	72ч.	500 об/мин	900 об/мин	24ч	72ч
Материалы для системы добывающих скважин и погружного оборудования											
N80Q (45Г)	40	7,90				36,59					
30ХМА (г/к)						29,55	18,73				
30ХГМА (з+о)						13,55					
18ХМФБ (зав.)		3,41				10,30	7,27				
18Х3МФБ (зав.)		2,27				7,94		13,40			
05Х5М (лаб.)		1,80		1,02		5,58	3,16	6,26			
9Cr1Mo		0,93				0,45					
20Х13				0,06		0	0,02			0,10	0,07
AISI 316L		0				0	0	0	0		
Материалы для трубопроводов											
09Г2С	40	2,48	2,08		8,51	15,77	13,74		38,74	1,75	1,63
20 (зав.)		2,52				14,67					
13ХФА (зав.)		2,27				14,62					
05ХФА (зав)		2,18				11,36	5,93				

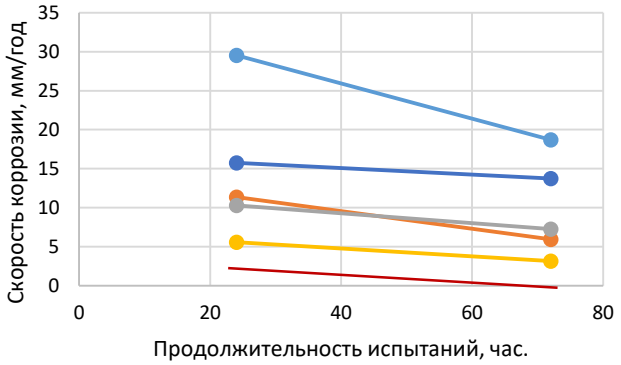
Влияние хрома и углерода на скорость общей коррозии в CO_2-содержащей среде

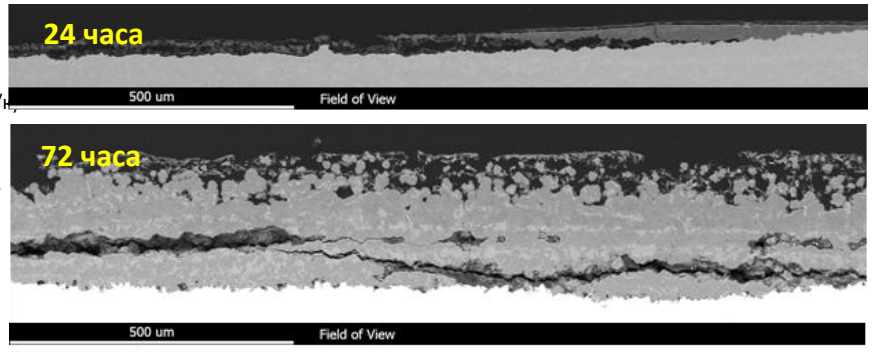




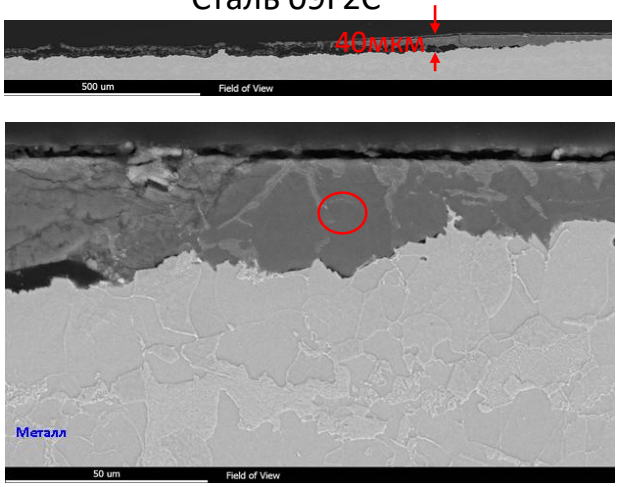
Результаты испытаний различных марок сталей в CO_2-содержащей среде

Влияние продолжительности испытаний на скорость коррозии стали 09Г2С в среде 25 г/л NaCl+25 г/л CaCl2 при T=65˚C, $P_{парц}$ CO_2 = 40 атм

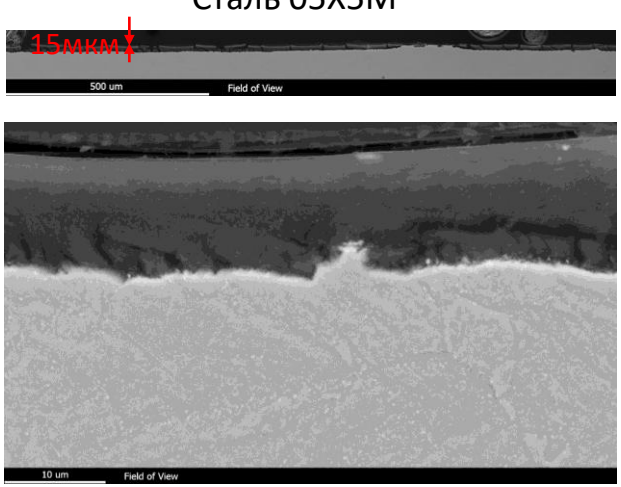




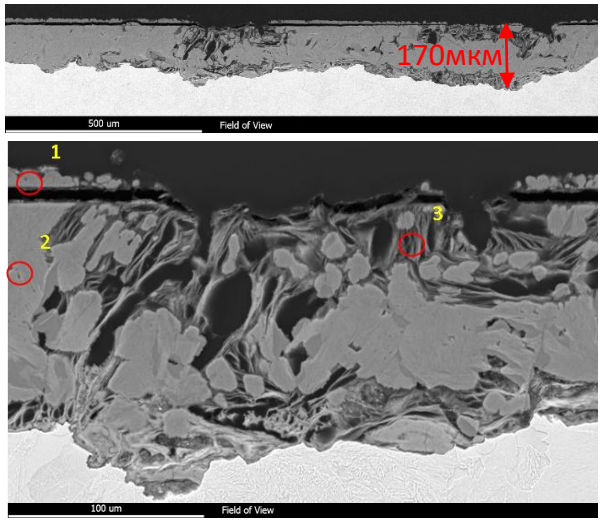
Сталь 09Г2С



Сталь 05Х5М



Сталь 45Г1



Массовая концентрация элементов, %						
C	O	S	Cl	Ca	Mn	Fe
32,28	20,55	00,62	00,90	05,63	01,49	Ост.

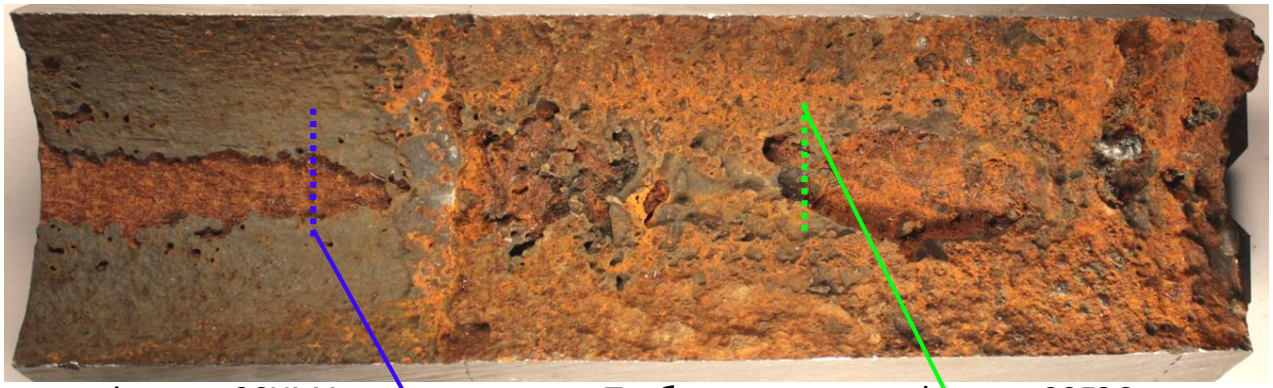
Массовая концентрация элементов, %							
C	O	Al	Mo	Cl	Ca	Cr	Fe
20,78	30,30	00,50	03,64	00,92	04,60	34,63	Ост..

	Массовая концентрация элементов, %							
	C	O	Al	Cl	Ca	Cr	Mn	Fe
1	08,33	35,17	00,33	-	27,67	-	-	Ост.
2	07,55	28,33	00,52	-	15,94	01,14	01,30	Ост.
3	43,53	09,89	00,78	00,79	01,51	02,20	02,48	Ост.

Основные результаты испытаний различных марок сталей в CO_2-содержащей среде

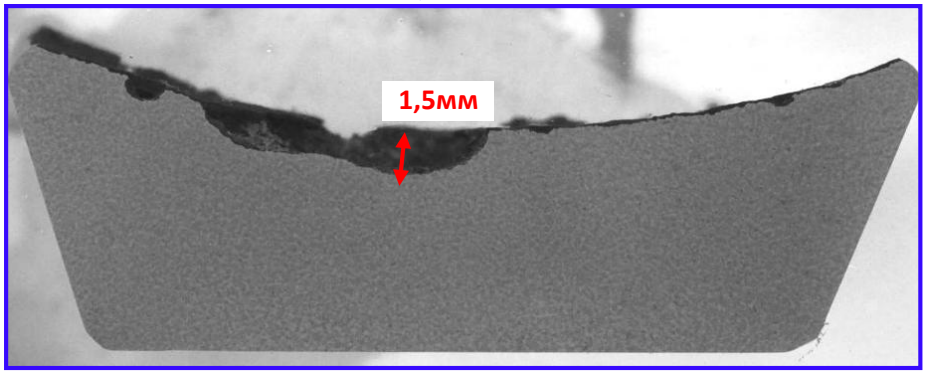
- Увеличение продолжительности экспозиции приводит к снижению скорости коррозии хромистых сталей за счет формирования защитного слоя продуктов коррозии;
- Повышение содержания хрома в стали уменьшает скорость углекислотной коррозии;
- Повышение температуры модельной среды ускоряет коррозионные процессы;
- В ходе испытаний показано, что строение слоя продуктов коррозии зависит от химического состава стали – наличие в составе стали хрома и молибдена оказывает влияние на формирование основного слоя продуктов коррозии и слоя осадочных кристаллов карбоната железа;
- При схожей микроструктуре испытываемых образцов, химический состав стали оказывает гораздо большее влияние на скорость коррозии и характер коррозионного повреждения стали;
- Продукты коррозии, образующиеся на месте растворения стали наследуют его карбидную составляющую;
- При проведении данных испытаний механическое воздействие среды на продукты коррозии и эффекты с этим связанные не моделировались. Вероятно с этим связано образование осадочных слоев карбоната железа;
- При увеличении скорости потока модельной среды повышает скорость общей коррозии. Чем выше содержание хрома в стали, тем меньше влияние потока.

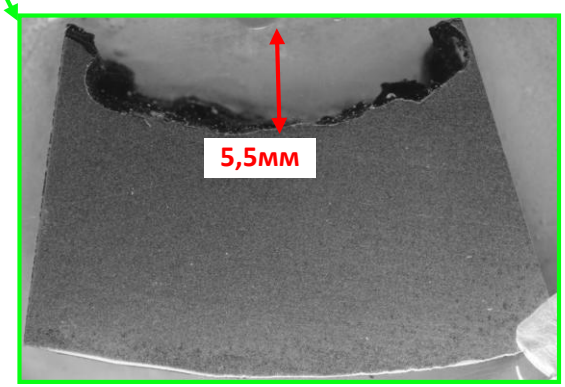
Углекислотная коррозия как основная причина преждевременного разрушения элементов обвязки скважины ОАО «Газпром добыча Уренгой»



Фланец 30ХМА

Трубная вставка на фланец 09Г2С





Условия эксплуатации

P, МПа	55
T раб, °C	105
Обводненность, %	1
Мольное содержание CO2, моль %	0,92

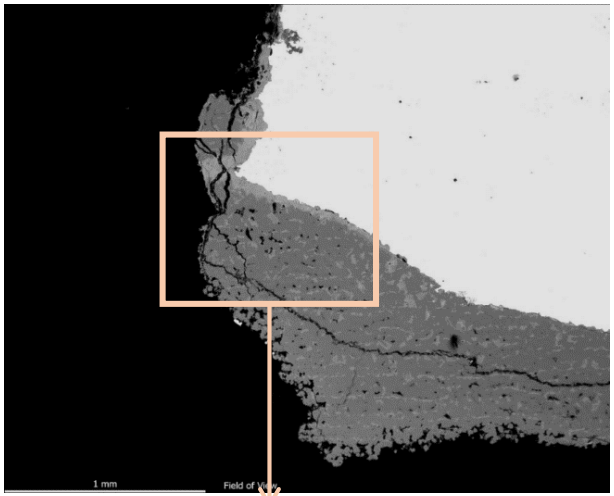
Характеристики металла элементов обвязки

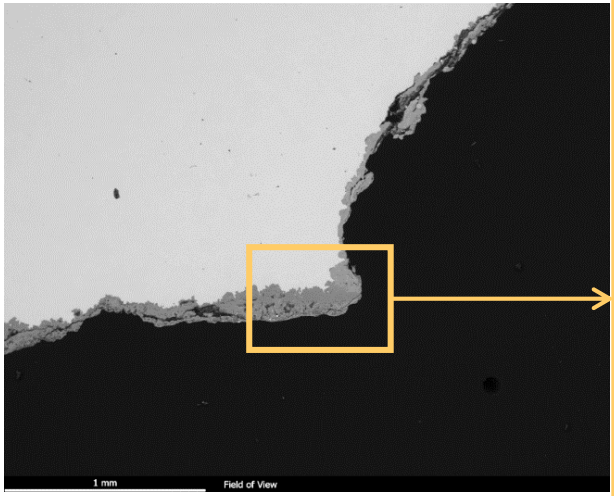
Объект	Химический состав исследованных объектов. Содержание элементов, %													Результаты измерения твердости
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	V	W	Ti	Al	Mo	S	P	HRB, ед.
Трубная вставка, Сталь 09Г2С	0,10	0,70	1,46	0,08	0,03	0,16	0,01	-	0,007	0,02	-	0,012	0,005	78,0-78,5
Фланец, Сталь 30ХМА	0,25	0,27	0,46	0,83	0,11	0,22	0,01	<0,01	0,01	-	0,17	0,014	0,008	88,5-89,0

Углекислотная коррозия как основная причина преждевременного разрушения элементов обвязки скважины ОАО «Газпром добыча Уренгой»

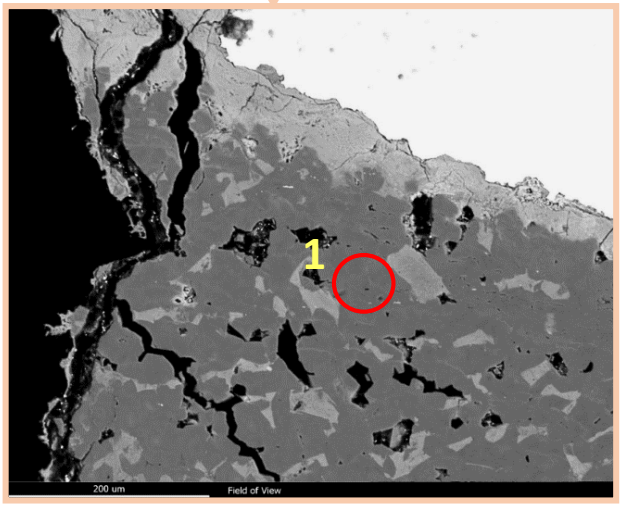
Сечение продуктов коррозии на берегах язвы трубной вставки фланца из стали 09Г2С

Сечение продуктов коррозии на берегах язвы на фланце из стали 30ХМА









	Массовая концентрация элементов, %									
	O	Si	S	Cl	K	Ca	Cr	Mn	Zn	Fe
1	29,75	0,56	0,32	0,06	0,28	0,12	0,11	0,59	2,20	67,54
2	30,33	-	-	-	1,17	2,54	1,80	0,64	-	63,10

Оценка причин разгерметизации обратного клапана ОК-73





Вид объектов исследования при поступлении

Вид ниппельного конца и тела трубы НКТ





Вид внутренней поверхности муфты НКТ



Вид ниппельного конца ОК







Вид корпуса ОК



Вид ниппельного конца шламоуловителя



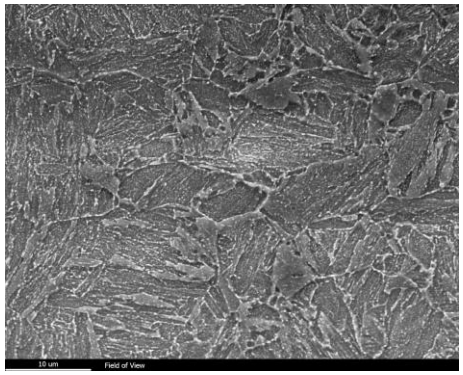


Оценка причин разгерметизации обратного клапана ОК-73

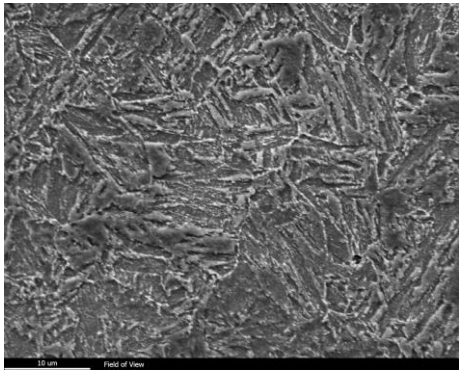
Характеристики металла сборочных единицы колонны

	Массовая доля элементов, %															Твердость
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	V	Nb	Co	Al	S	P	W	
Труба НКТ	0,300	0,19	0,99	0,84	0,161	0,142	0,28	0,003	0,005	<0,001	0,029	0,030	0,0029	0,009	0,009	20-24 HRC
Обратный клапан	0,411	0,25	0,73	0,96	0,029	0,018	0,003	0,0021	0,0036	0,0011	0,0032	0,030	0,012	0,0073	0,006	33-34 HRC
Шламоуловитель	0,392	0,26	0,71	0,98	0,21	0,013	0,0003	0,0014	0,0035	0,0011	0,0022	0,028	0,0067	0,0069	0,011	79-87,5 HRB
Требования ТУ 24.20.12.120-343-00186619-2018																
30ХГМА	0,27 -0,32	0,17-0,37	0,70-1,10	0,80-1,00	≤0,25	≤0,30	0,30-0,40	-	-	-	-	0,020-0,050	≤0,005	≤0,015	-	-
Требования ГОСТ 4543																
40Х	0,36 -0,44	0,17-0,37	0,50-0,80	0,80-1,10	-	-	-	-	-	-	-	-	≤0,035	≤0,035	-	
Требования ГОСТ 4543																
40ХН	0,36 -0,44	0,17-0,37	0,50-0,80	0,45-0,75	1,00-1,40	≤0,30	-	-	-	-	-	-	≤0,035	≤0,035	-	

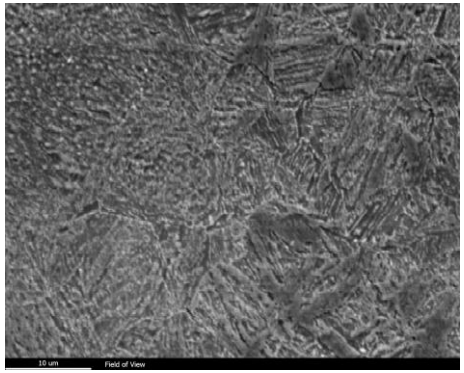
Микроструктура металла НКТ (30ХГМА)



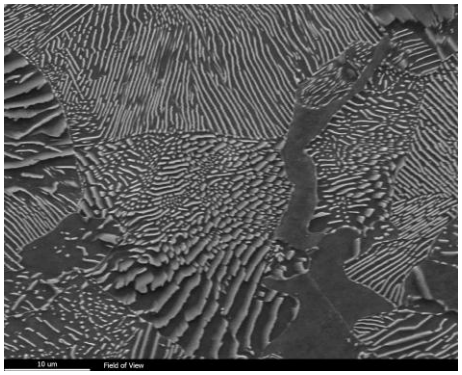
Микроструктура металла муфты НКТ (30ХГМА)



Микроструктура металла обратного клапана (40Х)



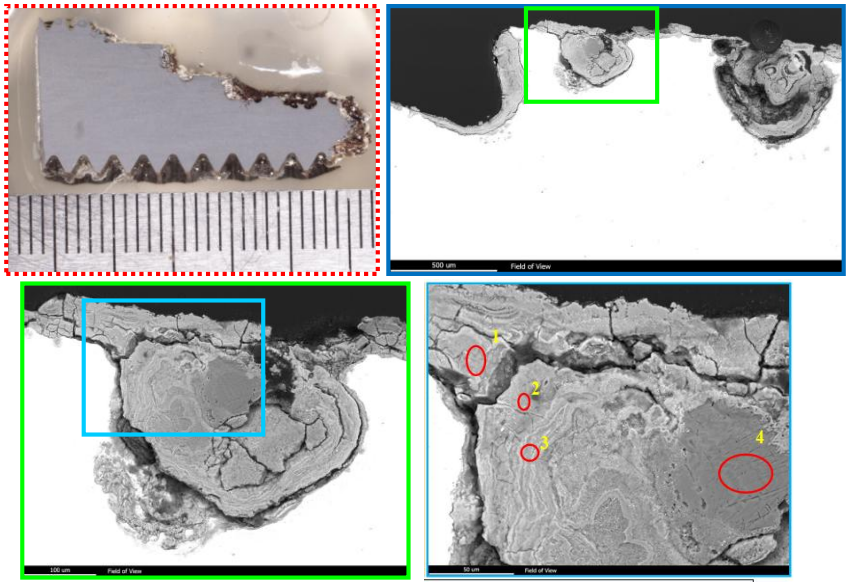
Микроструктура металла Шламоуловителя (40ХН)



Рентгенофазовым анализом установлено, что отложения на внутренней поверхности обратного клапана представлены оксидами (Fe_3O_4), гидроксидами железа ($FeO(OH)_3$, $FeO(OH)$), а также карбоната кальция минерального происхождения ($CaCO_3$)

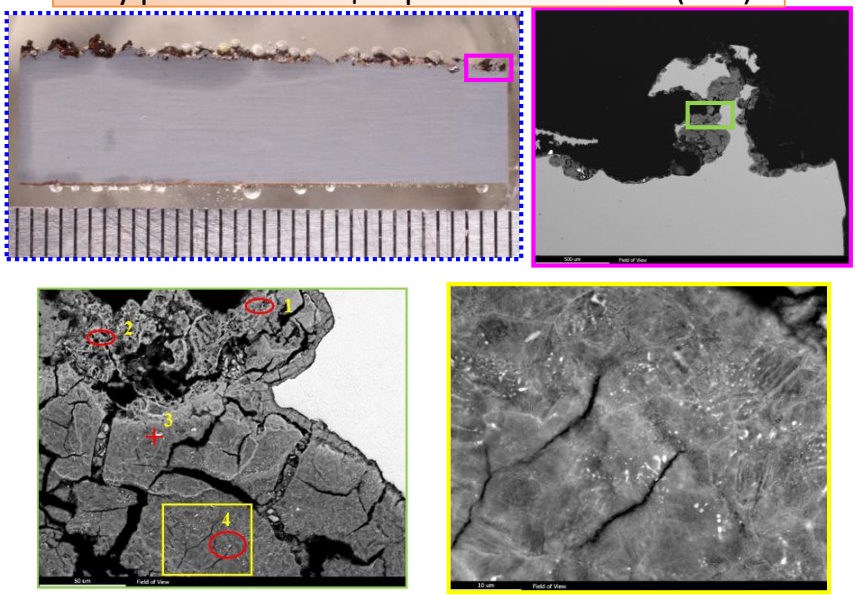
Оценка причин разгерметизации обратного клапана ОК-73

Ниппельный конец обратного клапана (40Х)



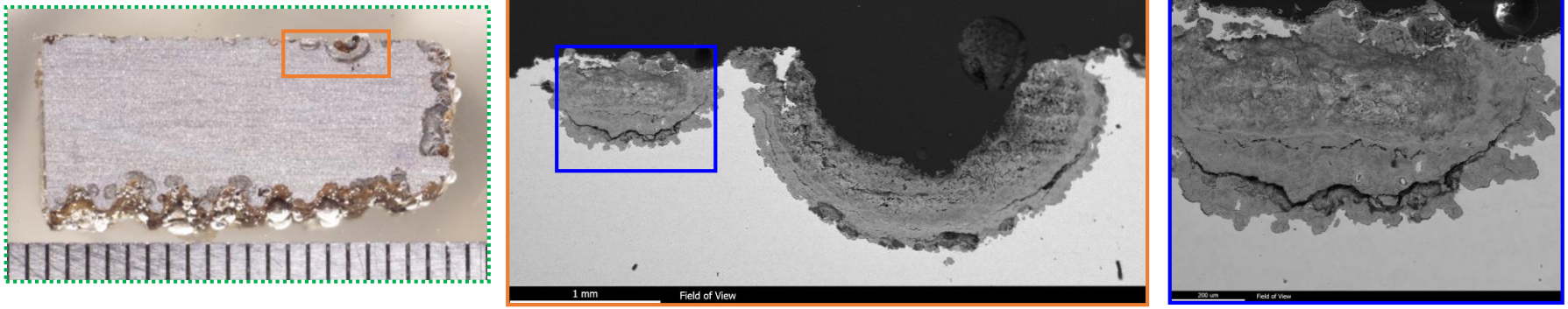
	Массовая концентрация элементов, %									
	C	O	Si	Ca	S	Cl	Mg	Mn	Cr	Fe
1	6,36	23,43	1,12	0,36	0,92	1,95	-	0,29	2,49	Ост.
2	5,81	24,23	1,29	-	1,17	4,08	-	0,21	3,86	Ост.
3	5,97	25,13	1,55	-	1,36	1,52	-	0,26	2,83	Ост.
4	8,51	38,75	-	43,56	-	-	0,86	-	-	Ост.

Муфтовый конец обратного клапана (40Х)



	Массовая концентрация элементов, %											
	C	O	Al	Mg	Si	Ca	S	Cl	Mn	Cr	Cu	Fe
1	8,23	21,88	-	-	0,51	1,27	0,34	1,81	0,32	1,16	-	Ост.
2	14,95	18,61	-	-	-	0,91	0,61	3,55	-	0,31	-	Ост.
3	6,80	12,44	6,23	3,92	-	1,79	0,50	0,58	4,37	1,35	21,39	Ост.
4	16,94	17,13	-	0,96	2,06	3,43	-	1,92	0,71	6,85	-	Ост.

Шламоуловитель (40ХН)

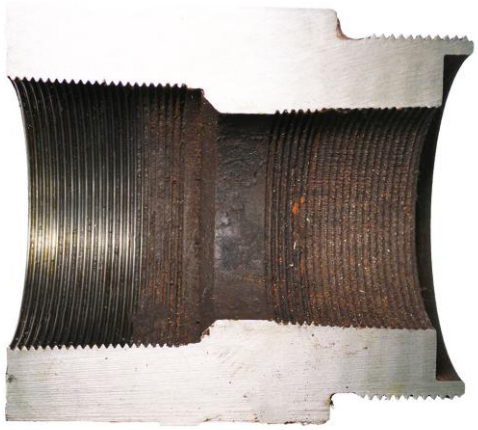


Оценка причин разрушения резьбового соединения пакера

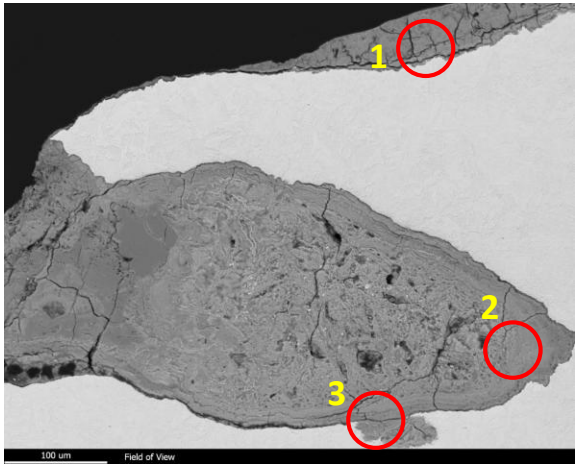
Химический состав пакера

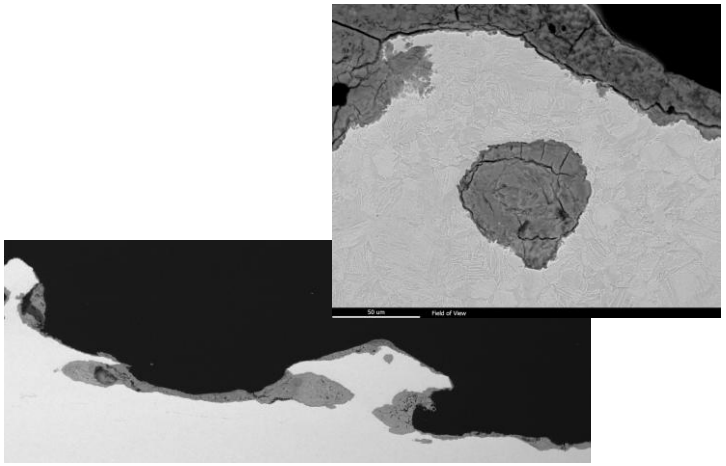
Пакер	Химический состав, %										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	V	P	S
	0,379	0,25	0,58	0,89	0,118	0,013	0,015	0,198	0,004	0,0085	0,0094
Требования ГОСТ 4543-16											
40Х	0,36-0,44	0,17-0,37	0,5-0,8	0,8-1,1	<0,3	-	-	<0,3	-	<0,035	<0,035





Твердость металла находится в диапазоне 29,5 – 32,0 HRC





Область измерения	Содержание химических элементов, вес. %										
	C	Si	O	Mn	Na	Cl	Cr	Fe	Ca	K	S
1	9.05	-	27.81	-	1.05	-	-	61.38	0.71	-	-
2	5.54	0.38	23.97	0.48	-	-	2.47	65.68	0.32	0.22	0.95
3	6.59	0.44	21.76	0.46	-	3.64	1.24	65.03	-	-	-



Локальная коррозия

Преждевременный выход из строя резьбового соединения пакера при эксплуатации произошло по причине коррозионно – эрозионного разрушения резьбы, вследствие низкой герметичности межниппельного пространства и попадания коррозионно-агрессивного флюида в межвитковое пространство с последующим ускоренным разрушением металла резьбы по механизму углекислотной коррозии.

Коррозия в H_2S-содержащих средах

НТД на внутрискважинное оборудование

ГОСТ ISO 10432-2014 Нефтяная и газовая промышленность. Оборудование скважинное. Скважинный предохранительный клапан с оснасткой. Общие технические требования

ГОСТ ISO 14310-2014 Нефтяная и газовая промышленность. Оборудование скважинное. Пакеры и мостовые пробки. Общие технические требования

ГОСТ ISO 16070-2015 Нефтяная и газовая промышленность. Оборудование скважинное. Оправки установочные и посадочные ниппели. Общие технические требования

НТД на фонтанное устьевое оборудование

API Spes 6A Технические условия на устьевое и фонтанное оборудование

ГОСТ Р 51365-2009 Нефтяная и газовая промышленность. Оборудование для бурения и добычи. Оборудование устья скважины и фонтанное устьевое оборудование. Общие технические требования

NACE MR01—75/ ISO 15156 Требования к материалам для нефтяного оборудования, стойким к сульфидному растрескиванию. Стандарт устанавливает требования к материалам для оборудования, описывает допустимые пределы содержания элементов в материалах, а также методы испытаний, классификацию материалов и области их применения в зависимости от условий эксплуатации.

Критерии в соответствии с NACE MR0175/ISO 15156-2 (ГОСТ Р 53678-09

В **ISO 15156-2** сероводородсодержащие среды по агрессивности делят на 4 основные зоны, где: **0 зона** – полное отсутствие агрессивности в отношении коррозионного растрескивания, а **3 зона** – высокая опасность растрескивания. Положительные результаты полученные при испытании в одной зоне, распространяются на другие зоны уровнем ниже.

Таким образом, испытание на SSC в **зоне 3** (среда А) является наиболее жестким, но при этом универсальным.

Если материал изделия успешно прошел испытания в среде А (условия согласно таблицы В.1), то данное изделие обладает высокой стойкостью к растрескиванию практически во всех сероводородсодержащих условиях.

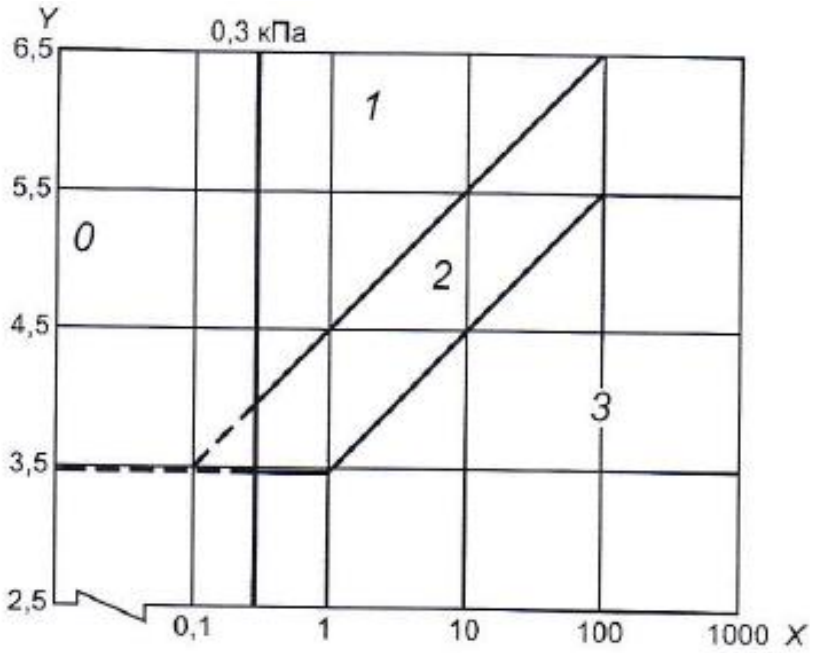


Таблица В.1 — Лабораторные испытания SSC для эксплуатации в среде, содержащей сероводород

Область применения	Тип испытания[a), b), h)]	Приложенное напряжение[c), d)]	Среда	Парциальное давление H_2S	Критерии приемки	Примечание
Специфическое применение или зоны SSC 1 и SSC 2 (рисунок 1)	UT	≥ 90 % AYS	5 % масс. NaCl + 0,4 % масс. CH_3COONa, pH регулируется до требуемого значения с помощью HCl или NaOH[e)]	Соответствует предполагаемому применению или области SSC	Отсутствие трещин SSC в соответствии с методом оценки [18]	Конкретное применение или менее жесткие условия[f)]
	FPB[i)] или CR					Применение в качестве оценки на усмотрение пользователя оборудования и с документальным обоснованием
	DCB[g)]	Не применяется			Оценка должна соответствовать [18]. Критерии приемки должны быть документально оформлены соглашением	
Все области SSC по рисунку 1	UT FPB[i)] или CR	≥ 80 % AYS	Среда А по [18] (5 % масс. NaCl + 0,5 % масс. CH_3COOH)	100 кПа в соответствии с [19]	Отсутствие трещин SSC в соответствии с методом оценки [18]	Применение в качестве оценки на усмотрение пользователя оборудования и с документальным обоснованием
	DCB[g)]	Не применяется			Оценка должна соответствовать [18]. Критерии приемки должны быть документально оформлены соглашением	

[a)] Типы испытаний:
- UT (одноосное растяжение) — испытание в соответствии с [18] (метод A);
- FPB (изгиб в четырех точках) — испытание в соответствии с [19] (приложение 2);
- CR (разрезное кольцо) — испытание в соответствии с [18] (метод C);
- DCB (двухконсольная балка) — испытание в соответствии с [18] (метод D);

Основные виды коррозионного разрушения нефтегазового оборудования в сероводородсодержащих средах

- Сплошная равномерная коррозия. ОК (общая коррозия).

- Растрескивание металла без воздействия приложенных или остаточных растягивающих напряжений. HIC (hydrogen-induced cracking) или ВР (водородное растрескивание);

- Растрескивание металла под воздействием приложенных или остаточных растягивающих напряжений. SSC (sulfide stress cracking) или СКРН (сульфидное коррозионное растрескивание под напряжением);

Основные параметры увеличивающие склонность формирования HIC :

1) С точки зрения материала:
- прочность/твердость стали;
- загрязненность неметаллическими включениями;
- ликвационная неоднородность (осевая ликвация, полосчатость).

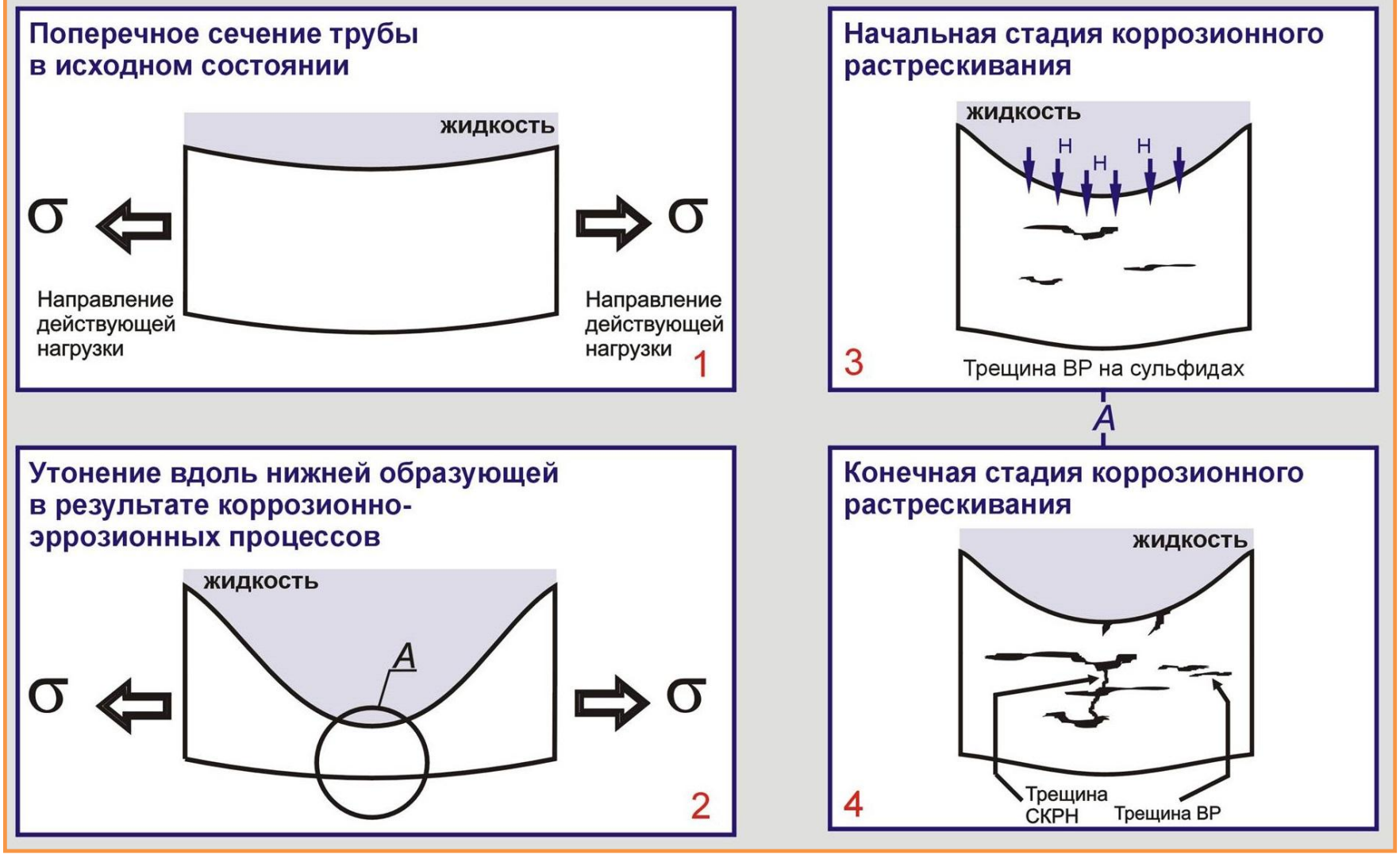
2) С точки зрения среды:
- обводненность;
- pH среды;
- парциальное давление H_2S.

Основные параметры увеличивающие склонность формирования SSC:

1) С точки зрения материала:
- прочность/твердость стали;
- загрязненность неметаллическими включениями;
- наличие в микроструктуре фаз/зерен, выступающих в роли концентраторов напряжений.

2) С точки зрения среды:
- обводненность;
- pH среды;
- парциальное давление H_2S.

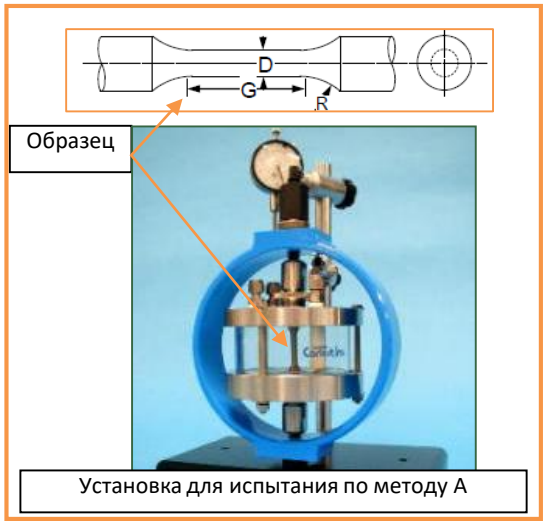
Схема развития трещин в процессе канавочной коррозии

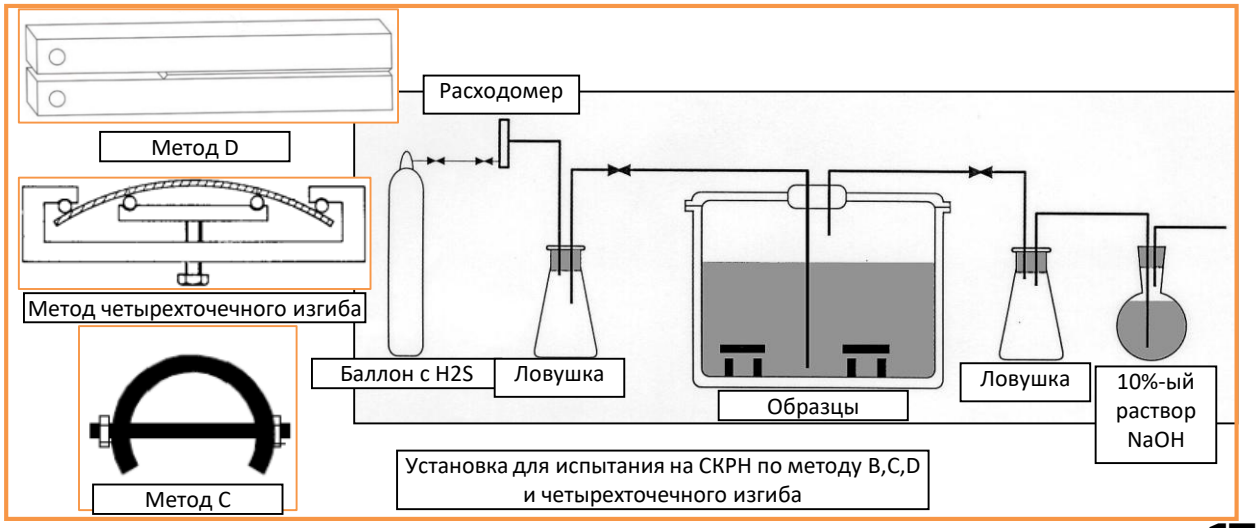


Основные принципы испытания на стойкость к СКРН по NACE TM0177

Испытания по NACE TM0177 характеризуются разнообразием методов испытания, которые заключаются в следующем:

1) Испытания по методу A, C и методу четырехточечного изгиба по ASTM G39 или NACE TM0316 аналогичны и проводятся сл. образом:
   В образце формируются напряжения, которые равняются определенному проценту от минимального или фактического предела текучести изделия. В таком состоянии образцы выдерживается одном из растворов (наиболее применяемый – раствор А, аналогичен NACE TM0284) в течение 720 часов. Если в процессе выдержки образцы не разрушились и после окончания испытания на поверхности образцов нет трещин СКРН, то данное изделие успешно прошло испытание при данном уровне напряжений (основной вид испытаний).
2) Испытания по методу B, при испытании большого количества образцов при разных уровнях деформации, можно получить статистический фактор критического напряжения (SC), при котором образец разрушится с вероятностью 50%.
3) Испытания по методу D предназначены для измерения сопротивления металлов КР, выраженного в виде фактора критической нагрузки, K_{ISSC} для СРН.



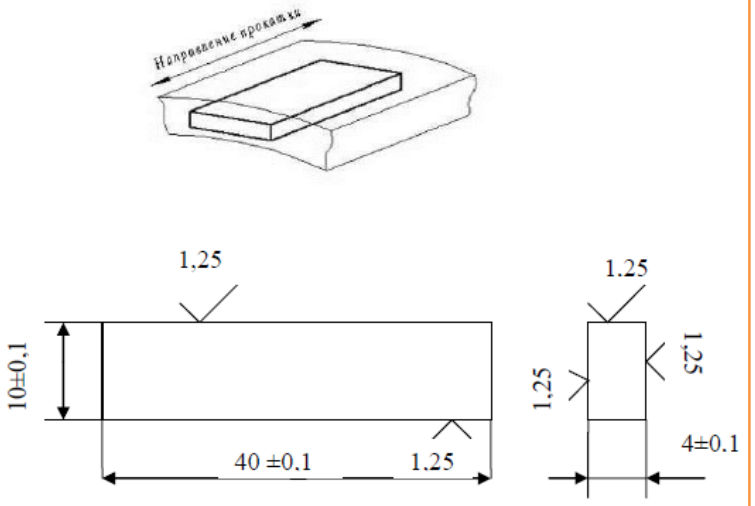


Основные принципы испытаний на стойкость к общей коррозии в H_2S –содержащей среде

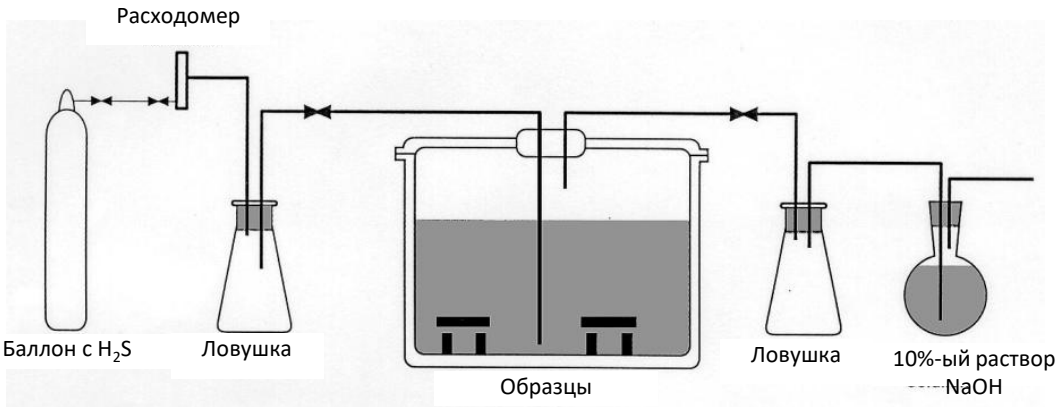
Суть испытания заключается в следующем:

1) Замеряется масса трех образцов прямоугольно сечения с размерами 40х10х4 мм, вырезанных из металла испытываемого оборудования.
2) Затем их помещают в емкость с модельной средой (дист. вода + 5% NaCl). Раствор насыщается сероводородом до необходимой концентрации, например, 350-650 ppm / мг/л и при комнатной температуре (23±2 °С) образцы выдерживаются в растворе в течение 96 часов.
3) Образцы вынимаются, высушиваются, очищаются от продуктов коррозии и взвешиваются.
4) Потеря массы образцов соотносится со временем выдержки в ёмкости и пересчитывается на год. Получаются значения скорости коррозии стали в мм/год.

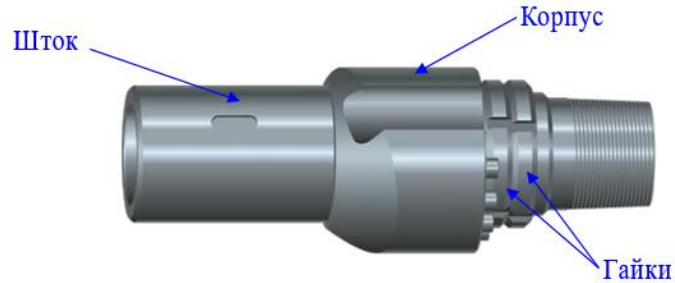
Чертеж образца на ОК и ориентация вырезки



Лабораторная установка для проведения испытаний на ОК



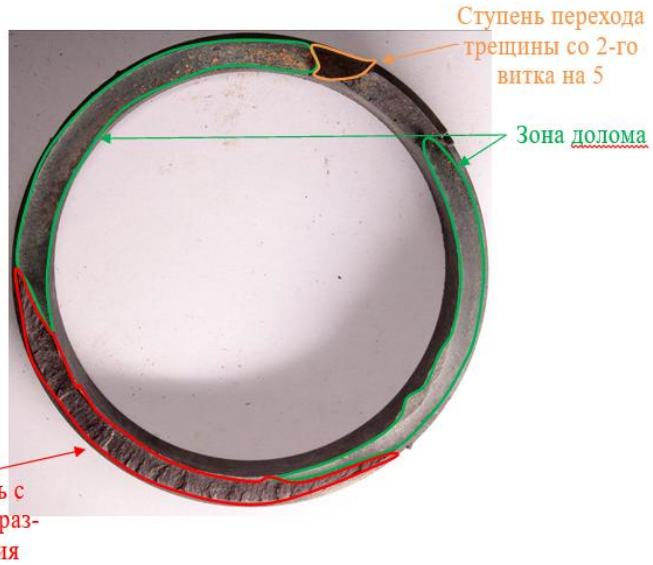
Оценка причин разрушения клапана КПЭ 2



Вид КПЭ2 при поступлении (в разобранном виде)



Шток





Корпус



Гайка

Оценка причин разрушения клапана КПЭ 2

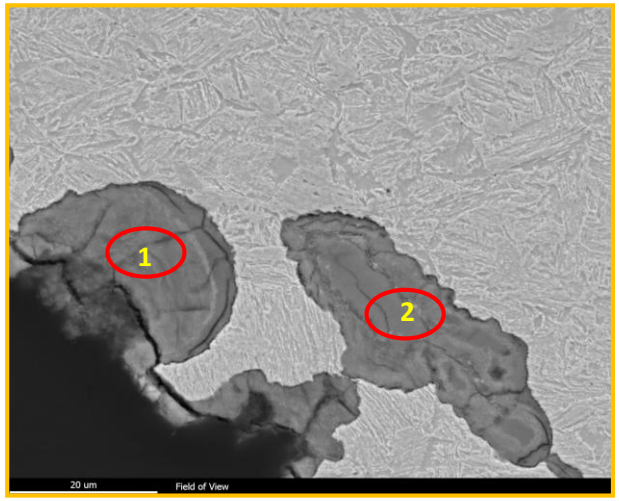
Химический состав штока КПЭ 2

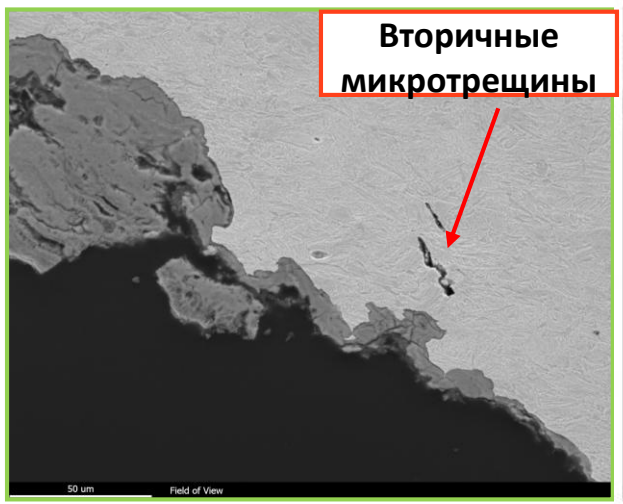
	Массовая доля элементов, %														
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	V	Nb	Co	Al	S	P	W
40Х	0,426	0,24	0,68	1,06	0,086	0,145	0,009	0,002	0,013	0,0012	0,011	0,033	0,0028	0,012	0,005
Требования ГОСТ 4543 для стали 40Х															
40Х	0,36-0,44	0,17-0,37	0,50-0,80	0,80-1,10	-	-	≤0,11	≤0,03	≤0,05	-	-	-	-	-	≤0,20

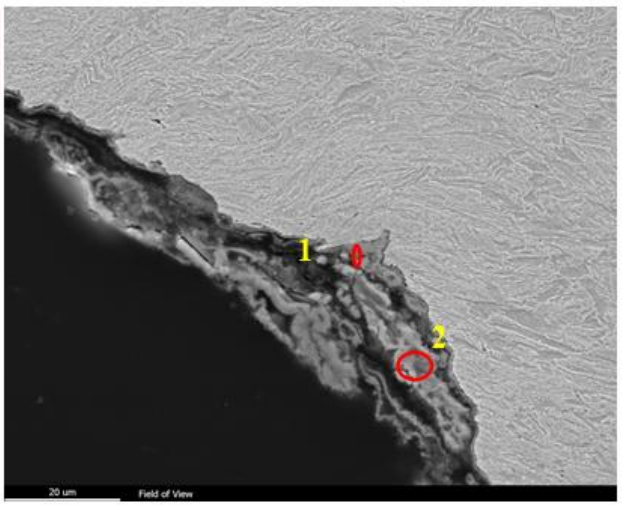
Механические свойства штока КПЭ 2

$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5, %	KCV^{-60}, кгс•м/см^2	ДВС	HV (HRC)
1110/1090	990/990	14,0/12,5	3,0/3,0/2,7	20/20/20	326-401 (33-38)

Металлографический анализ в области очага разрушения





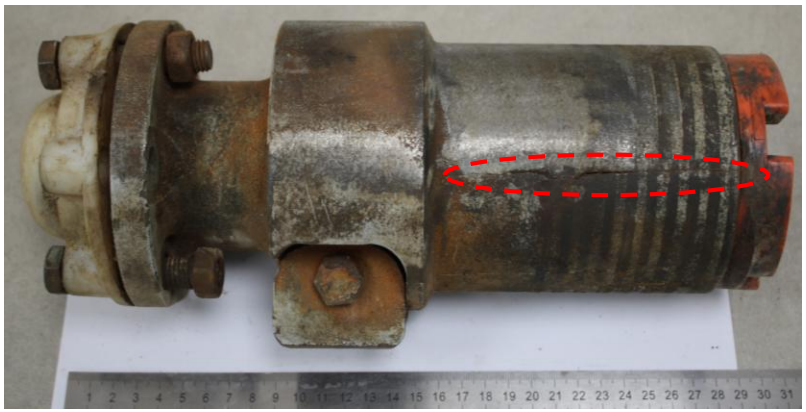


	Массовая концентрация элементов, %									
	C	O	Si	S	Cl	K	Ca	Cr	Mn	Fe
Область 1	5,45	22,34	0,97	-	0,36	0,42	0,48	3,70	0,85	Ост.
Область 2	5,61	21,17	0,53	0,51	0,37	0,46	-	2,69	0,59	Ост.

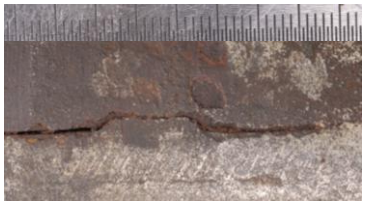
	Массовая концентрация элементов, %									
	C	O	Na	Si	S	Cl	Ca	Cr	Mn	Fe
Область 1	5,39	16,52	1,06	-	1,58	0,51	0,50	1,61	0,59	Ост.
Область 2	7,67	19,12	-	0,36	0,67	0,43	0,44	1,03	0,57	Ост.

Причиной преждевременного разрушения клапана КПЭ2 в области присоединительной резьбы в нижней части является водородное коррозионное растрескивание под напряжением

Оценка причин разрушения модуль-головки ЗМГ5А-73-К1







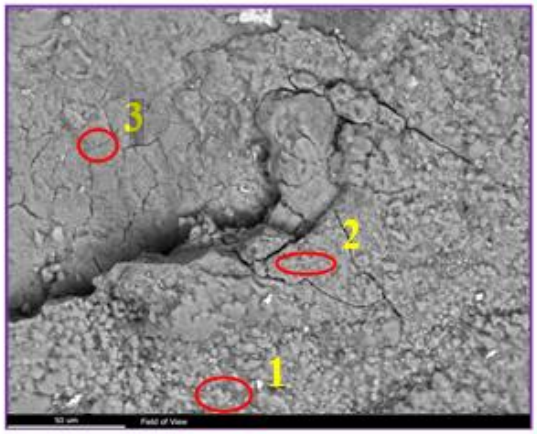


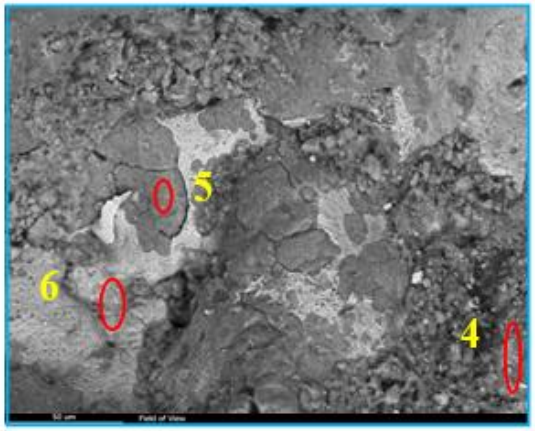
Химический состав модуль-головки

	Массовая доля элементов, %													
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Co	Cu	V	Nb	Ti	P	S
40Х	0,425	0,29	0,74	0,97	0,029	0,0036	0,024	0,003	0,024	0,0038	0,0012	0,004	0,0076	0,0071

Механические свойства модуль-головки

$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5, %	KCV-50, Дж/см^2	Твердость, HRC
1016-1027	927-940	14,7-17,8	68-73	29,0 -33,0

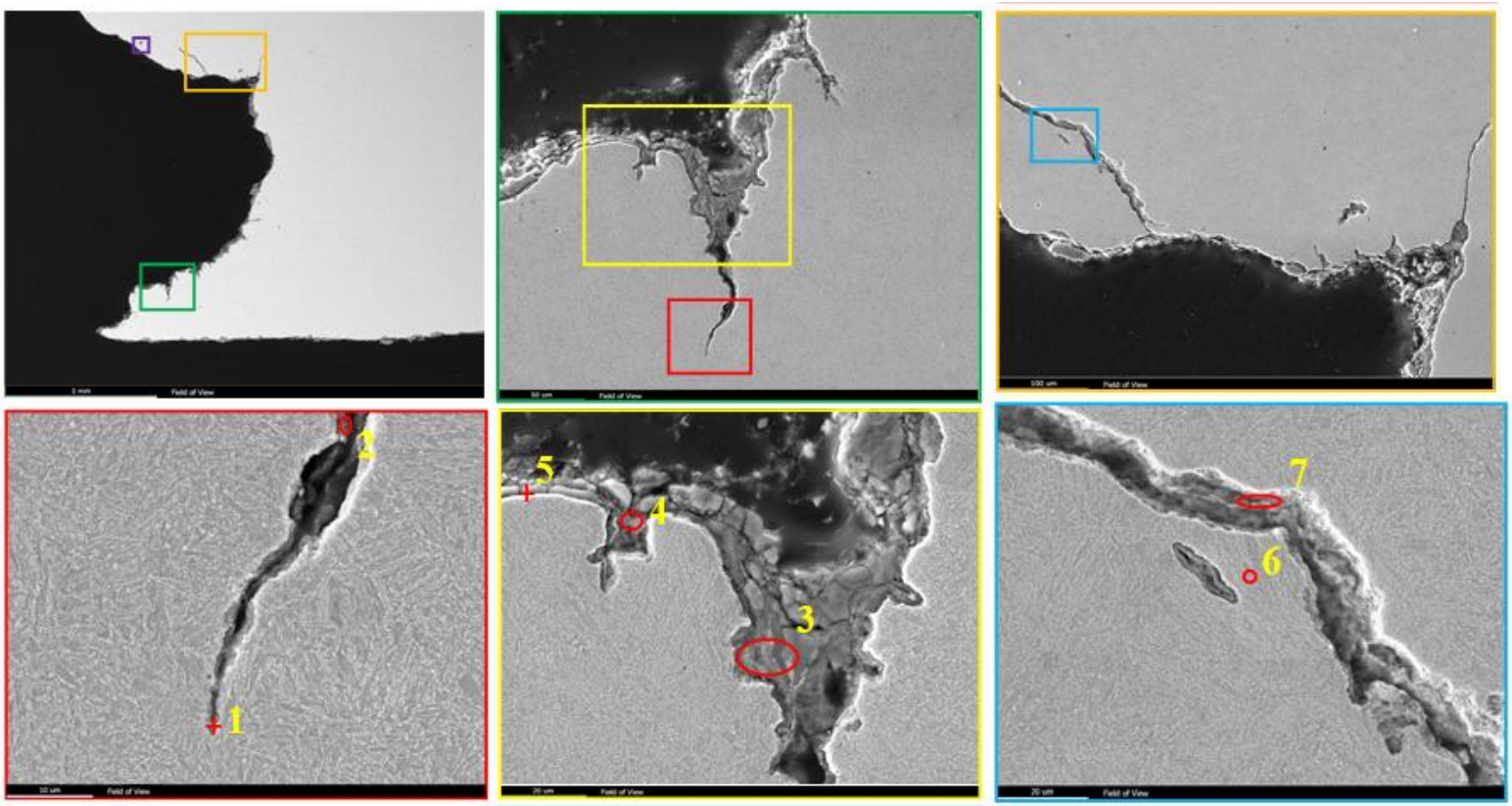




Химический состав продуктов коррозии на поверхности излома

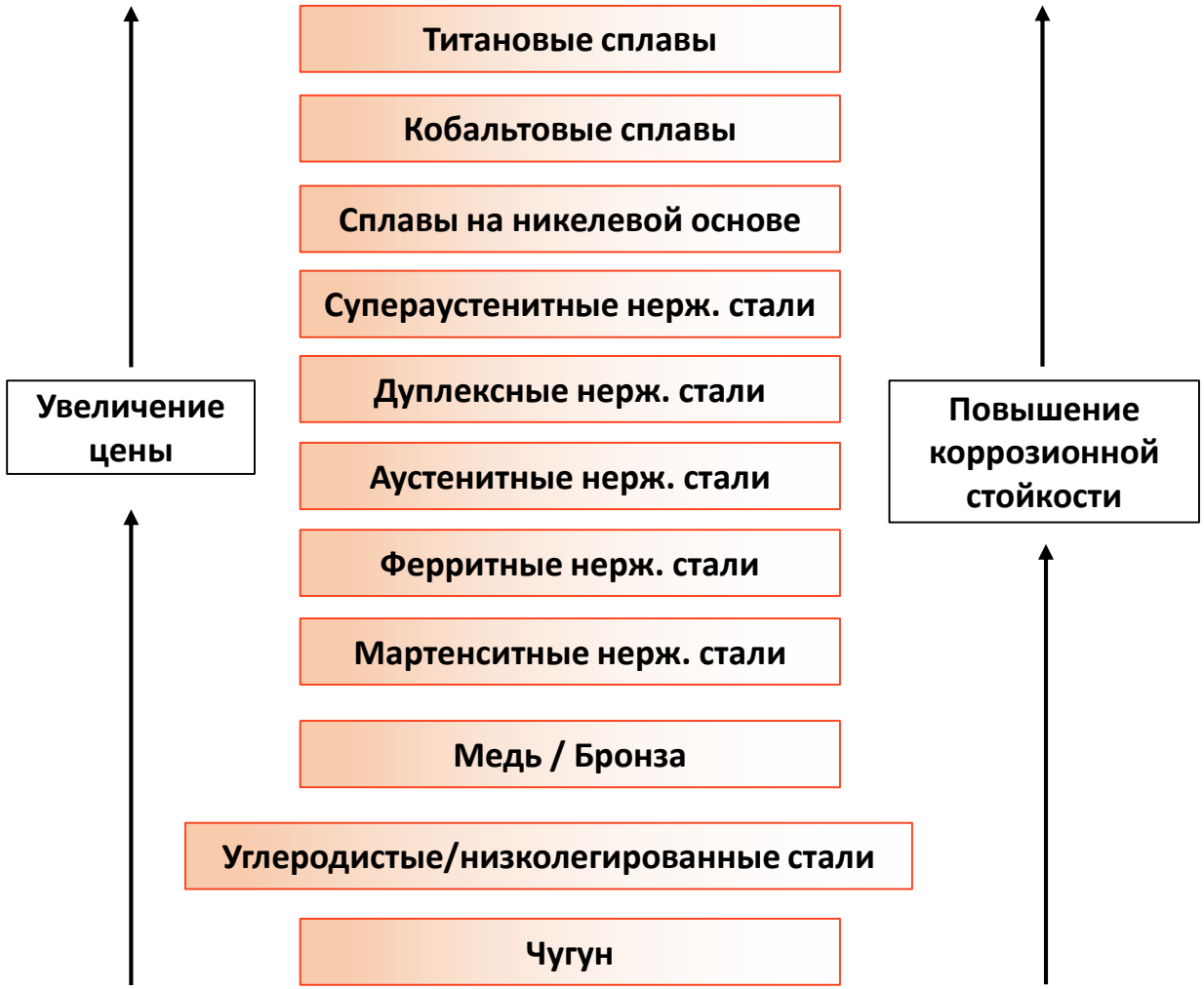
	Массовая концентрация элементов, %								
	C	O	Na	Si	S	Ca	Cr	Mn	Fe
1	15,61	33,57	00,97	00,95	01,45	01,59	01,72	00,97	43,16
2	16,32	28,90	-	00,82	01,39	01,35	03,05	01,43	46,34
3	16,05	33,85	-	00,89	01,38	01,33	02,69	01,11	42,70
4	08,25	32,67	01,47	00,61	01,98	00,98	-	-	54,04
5	04,90	27,95	01,38	00,57	01,58	01,34	-	-	62,28
6	08,15	24,25	01,54	00,68	01,83	00,68	04,66	01,28	56,93

Оценка причин разрушения модуль-головки ЗМГ5А-73-К1



	C	O	Na	Si	S	Cr	Ca	K	Mn	Zn	Fe
1	02,98	-	-	-	06,91	01,17	-	-	00,98	-	Ост.
2	08,99	01,69	-	-	02,71	01,37	-	-	01,25	-	Ост.
3	07,64	20,96	01,56	00,45	01,69	00,99	00,45	00,74	00,54	-	Ост.
4	16,49	14,39	-	-	03,29	00,62	07,83	-	00,84	02,09	Ост.
5	09,40	19,38	-	00,46	01,63	03,55	00,40	00,17	01,01	-	Ост.
6	05,05	05,11	-	-	19,41	01,11	-	-	00,54	-	Ост.
7	07,99	14,46	-	00,17	10,62	00,68	00,33	00,29	00,46	00,84	Ост.

Повышение коррозионной стойкости оборудования при применении коррозионно-стойких материалов



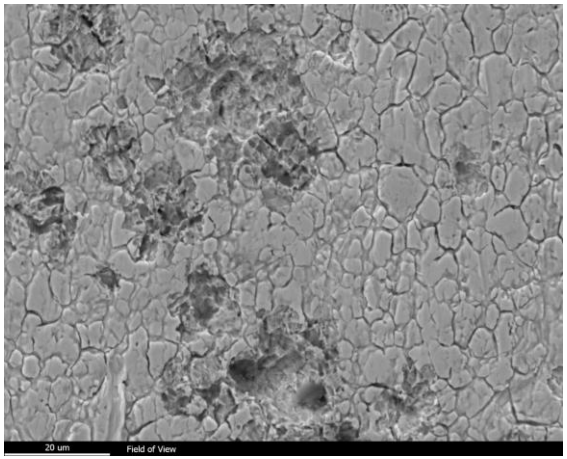
Виды коррозионных повреждений аустенитных нержавеющих сталей

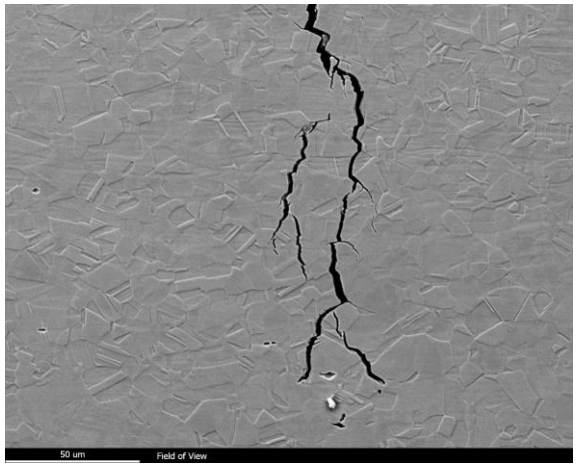
Коррозионностойкие хромоникелевые стали, которые известны как стали типа 18-10. Система Fe-Cr-Ni. Супераустенитные стали с добавлением молибдена, азота, большего количества никеля.

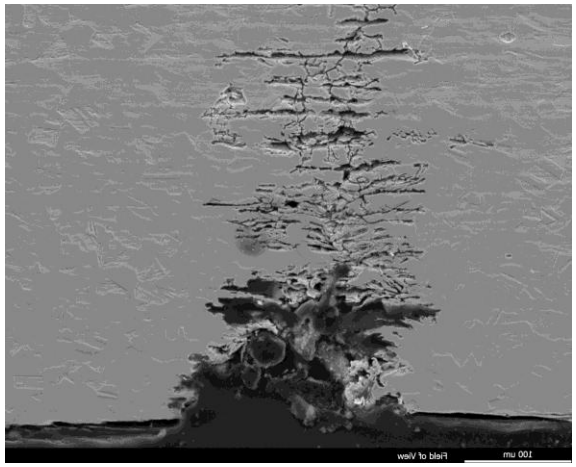
Свойства: высокая коррозионная стойкость, высокая ударная вязкость при низких температурах.

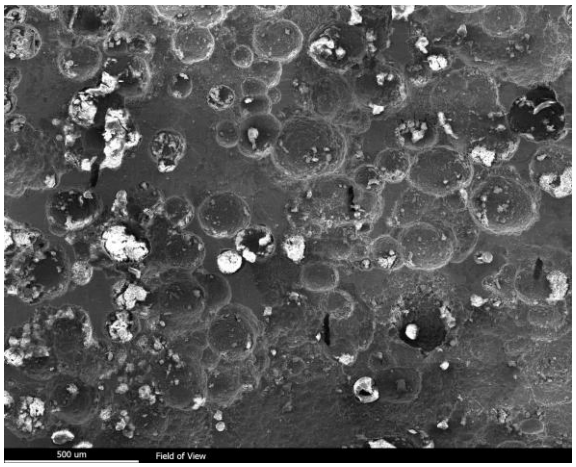
Нержавеющие стали подвержены локальным видам коррозии

- питтинг;
- щелевая коррозия;
- коррозионное растрескивание;
- хлоридное растрескивание;
- межкристаллитное растрескивание.





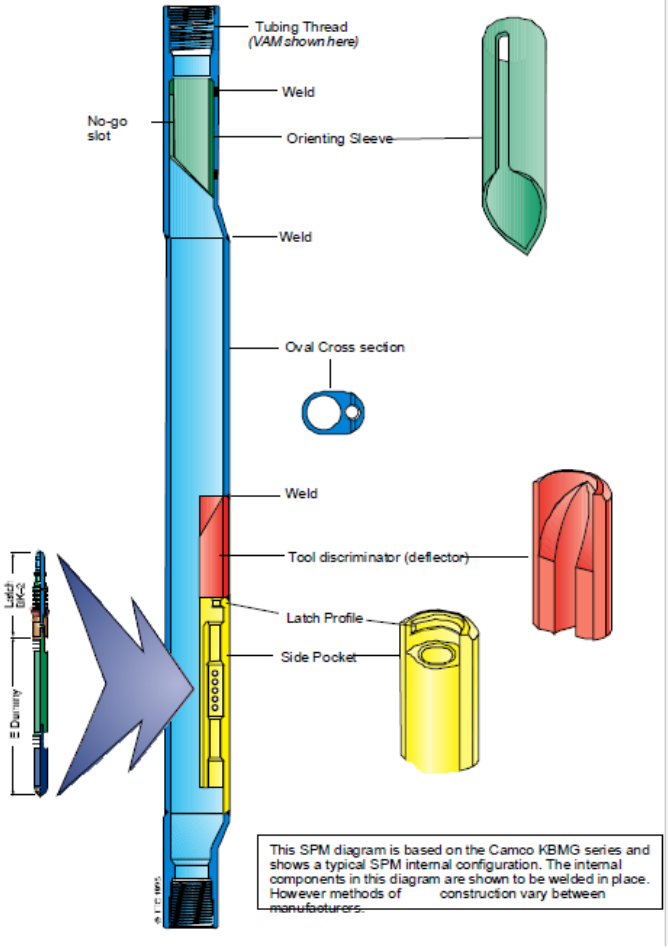




Оценка причин разрушения газлифтного клапана











Трещины перпендикулярно и параллельно приложенным нагрузкам. Продукты коррозии внутри и на внешней поверхности.

Виды коррозионных повреждений мартенситных нержавеющих сталей

Мартенситные стали (13Cr)

•Свойства: необходимые механические характеристик от L80 до Q125, высокая стойкость в CO2 среде.

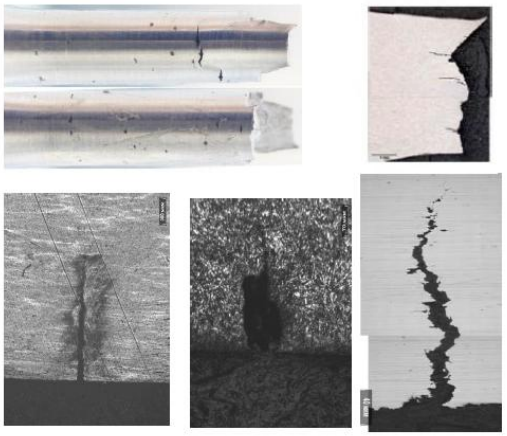
•Проблемы: имеет ограничения в H2S-средах, склонность к СКРН, требования по шероховатости и хранению, ограничения по температуре, pH.

Результаты испытаний на стойкость к SSC

Марка стали	$\sigma_{0,2}$, МПа	Разрушение, час
Super Cr13	758	720 б.р.
20Х13	397	720
Cr13L	758	242
15Х13	552	204

Условия испытаний:

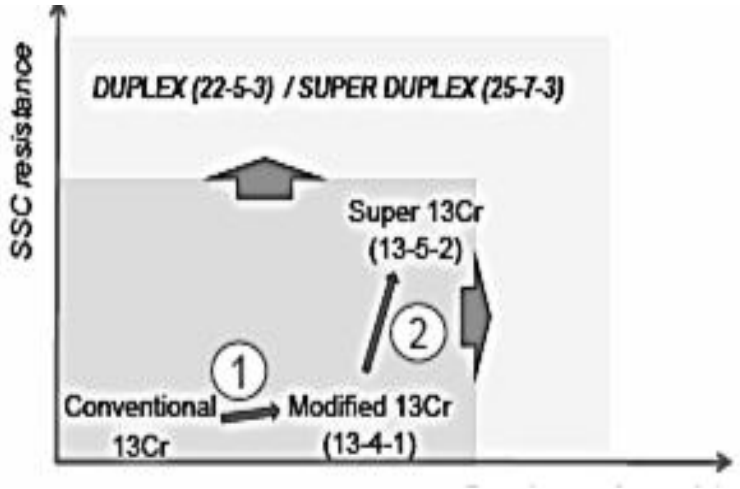
- Парциальное давление H_2S 10 кПа,
- pH 3,5;
- Нагрузка 80% от SMYS.



Мартенситные стали (Супер 13Cr)

•Свойства: необходимые механические характеристик от L80 до Q125, высокая стойкость в CO2 среде.

•Проблемы: имеет меньшие ограничения в H2S-средах по сравнению с 13 Cr, коррозионная стойкость выше , чем у 13 Cr.



Виды коррозионных повреждений высоколегированных нержавеющих сталей

Дуплексные/Супердуплексные стали

Аустенит и феррит в структуре. Система Fe-Cr-Ni-Mo-W-N. Используются в условиях, где важна коррозионная стойкость и прочность одновременно. Дуплексные стали применимы для условий, при которых возможен эрозионный износ, присутствуют сероводород и углекислый газ.

Проблемы: возможность выделения нежелательных фаз.

PREN=Cr+3,3 (Mo+0,5W)+16N.

у супердуплексных PREN больше 40



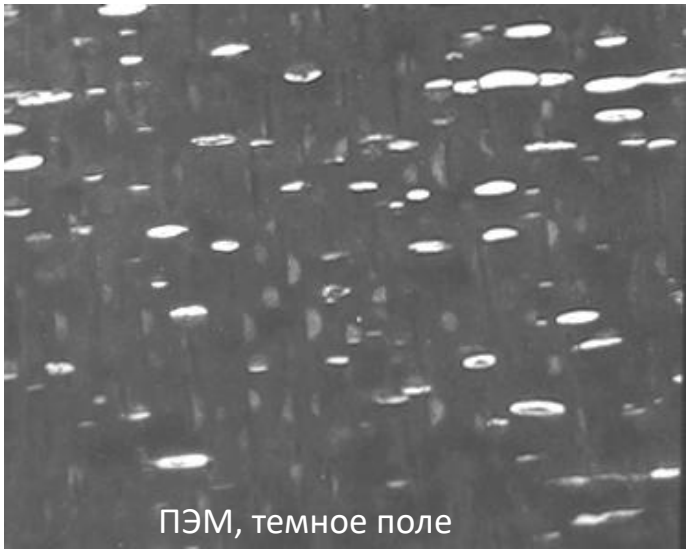
Структура стали 08Х21Н6М2Т

Дисперсионно-твердеющие стали

Упрочнение при термической обработке в результате дисперсионных выделений , за счет титана, меди, алюминия.В аустенитных, полуаустенитных, мартенситных сталях.

Свойства: Высокая прочность и коррозионная стойкость.

Проблемы: склонность к SSC с повышением прочности, сложная обрабатываемость


ПЭМ, темное поле

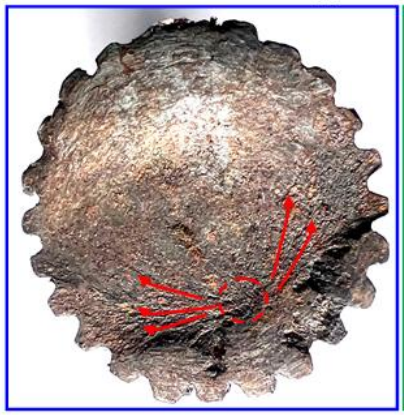
Оценка причин разрушения вала нижней секции насоса УЭЦН



Твердость:
43,5-46,0 HRC

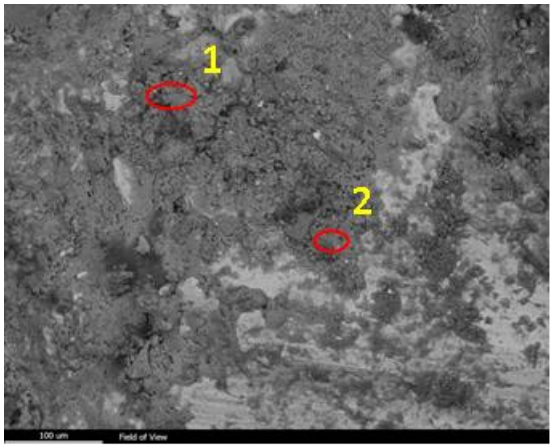
Химический состав вала

	Массовая доля элементов, %													
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo[2]	Ti[1]	V[1]	Nb	Co	Al	S	P
Вал 05Х16Н4Д2Б	0,030	0,20	0,330	14,5	4,29	2,38	0,008	0,006	0,095	0,194	0,150	0,0015	0,0017	0,022





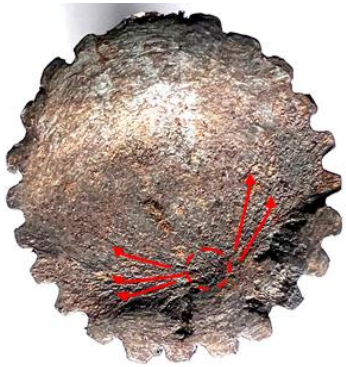




	Массовая концентрация элементов, %											
	C	O	Ni	Na	Si	S	Cl	Ca	Cr	Mn	Zn	Fe
1	05,37	21,66	-	02,10	00,63	03,08	17,42	07,29	-	-	03,22	Ост.
2	06,51	20,69	03,72	01,07	00,38	03,14	18,54	10,88	01,87	00,19	-	Ост.

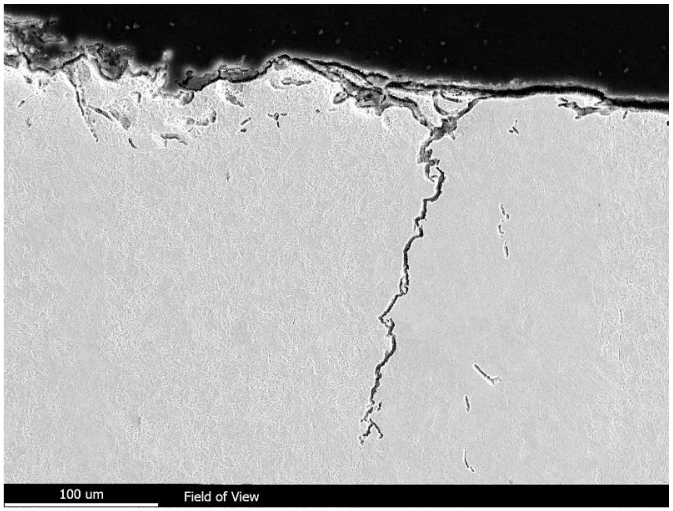
Причиной разрушения вала является коррозионное растрескивание металла по механизму СКРН. Разрушение вала УЭЦН произошло в условиях крутящих нагрузок и водородного охрупчивания металла при эксплуатации в H_2S-содержащей среде

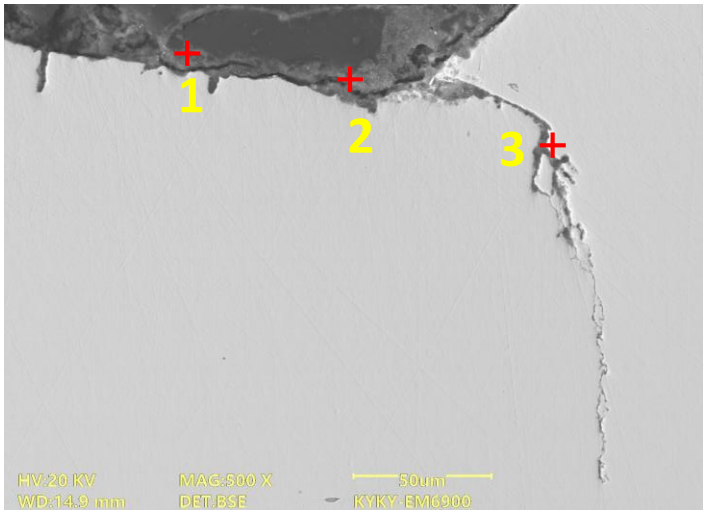
Оценка причин разрушения вала нижней секции насоса УЭЦН











	Массовая концентрация элементов, %								
	C	O	S	Mo	Cr	Ni	Zn	Cu	Fe
1	89,5	2,4	0,2	-	1,3	0,2	-	0,2	Ост.
2	84,1	3,0	1,1	-	1,5	0,2	2,1	0,2	Ост.
3	63,0	5,4	-	0,4	4,5	1,2	-	0,8	Ост.

Причиной разрушения вала является коррозионное растрескивание металла по механизму СКРН. Разрушение вала УЭЦН произошло в условиях крутящих нагрузок и водородного охрупчивания металла при эксплуатации в H_2S-содержащей среде

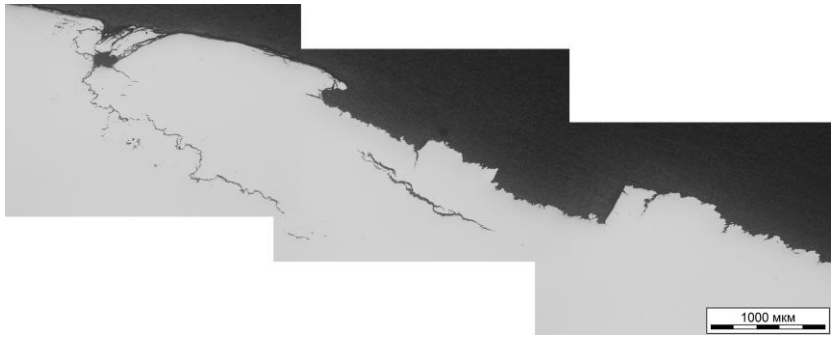
Разрушения вала УЭЦН, изготовленного из дисперсионно-твердеющей нержавеющей стали

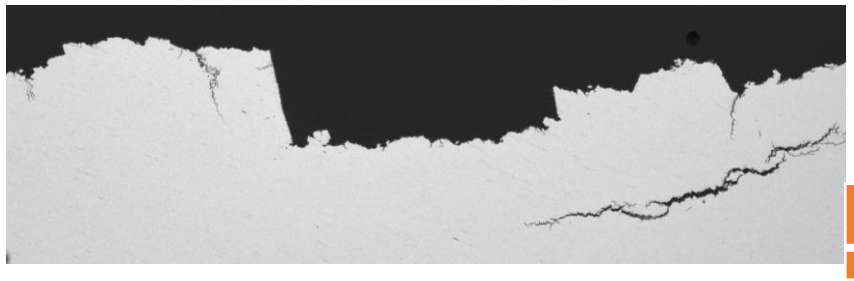


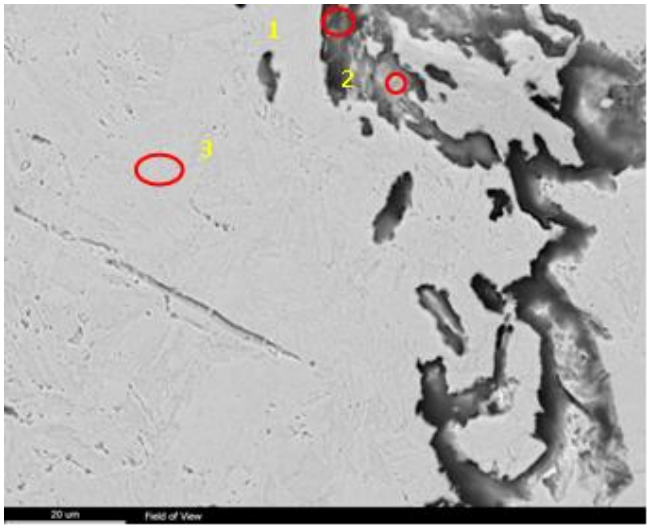
Твердость:
43,5-44,5 HRC

Химический состав вала

Вал 05Х16Н4Д2Б	Массовая доля элементов, %													
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo[2]	Ti[1]	V[1]	Nb	Co	Al	S	P
	0,027	0,15	0,268	16,2	4,77	2,58	0,061	0,006	0,028	0,187	0,027	0,003	0,0025	0,015







	Массовая концентрация элементов, %								
	C	O	Si	S	Cl	Cr	Ni	Cu	Fe
1	35,51	10,90	0,20	3,29	0,20	10,86	3,53	2,27	31,38
2	4,04	3,68	-	2,53	0,98	18,67	6,82	3,78	58,96
3	-	-	0,37	-	-	17,37	4,76	-	77,50

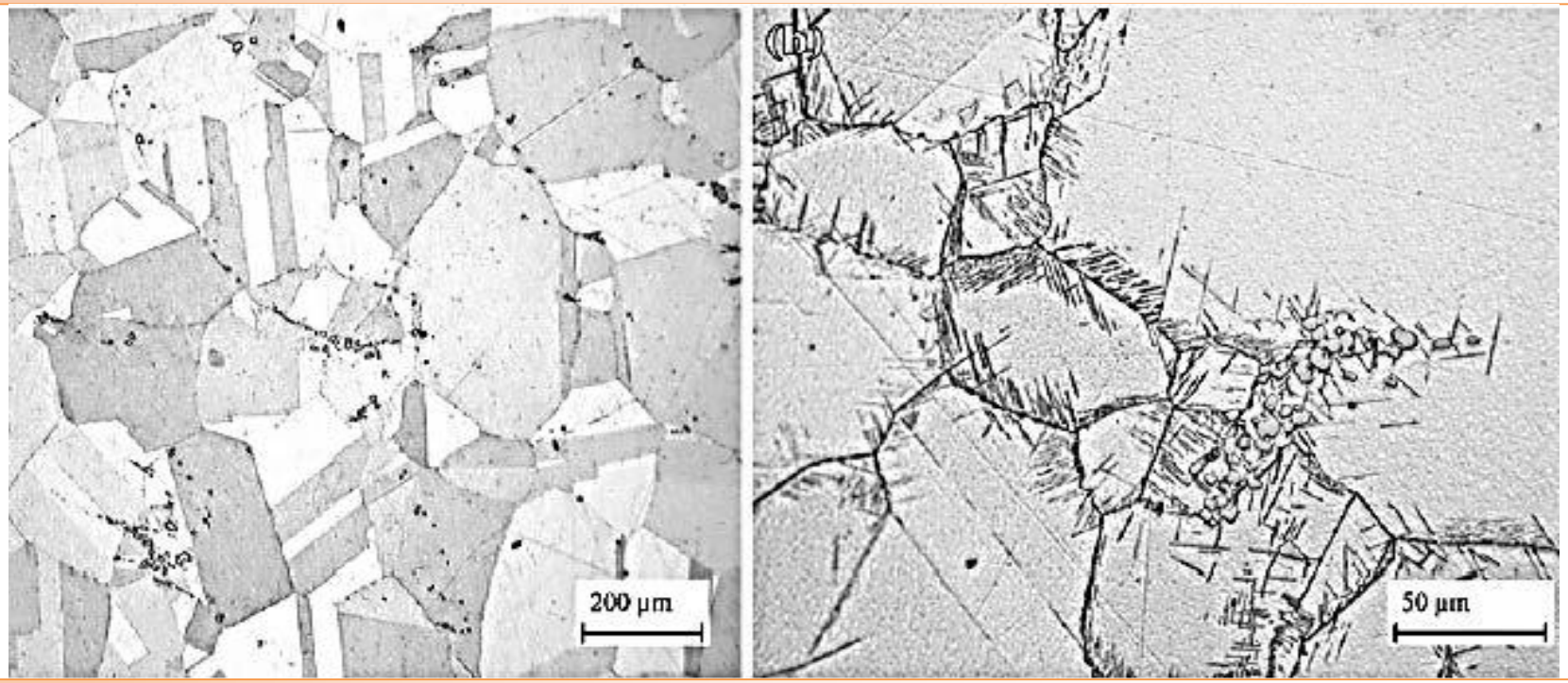
Причиной разрушения вала является коррозионно-механическое растрескивание металла по механизму СКРН. Разрушение вала ЭЦН произошло хрупко под углом 45 градусов к оси вала в условиях крутящих нагрузок и водородного охрупчивания металла при эксплуатации в H_2S-содержащей среде

Сплавы на никелевой основе

Имеют аустенитную структуру, немагнитны. Изначально сплавы на никелевой основе разрабатывались для применения в авиапромышленности, позже стало понятно, что они обладают стойкостью в средах с H2S, CO2, Cl, S.

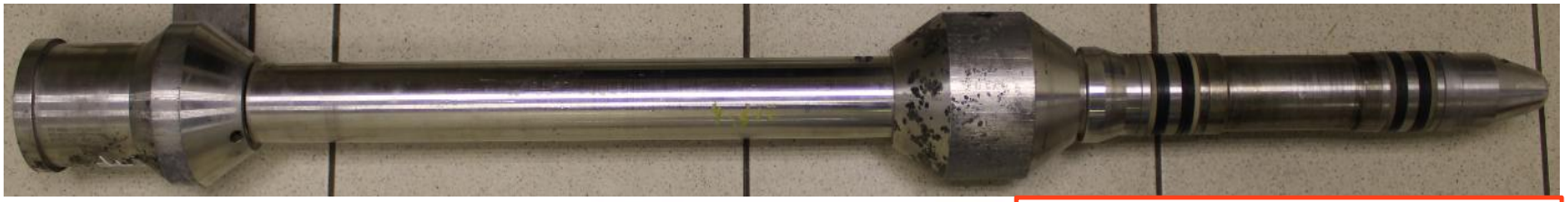
Практически ежегодно появляются все новые сплавы для их более эффективного применения.

Проблемы: возможность образования нежелательных фаз, обрабатываемость, склонность к водородному охрупчиванию



соответствующая и несоответствующая микроструктуры сплава 718 из стандарта API6A 718

Оценка причин разрушения скважинной пробки из сплава 718

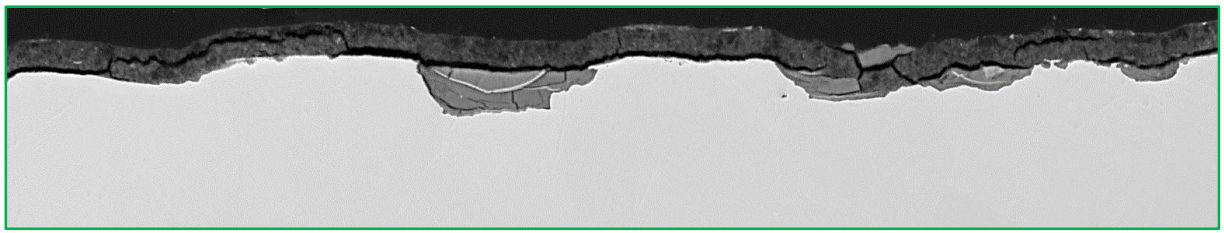


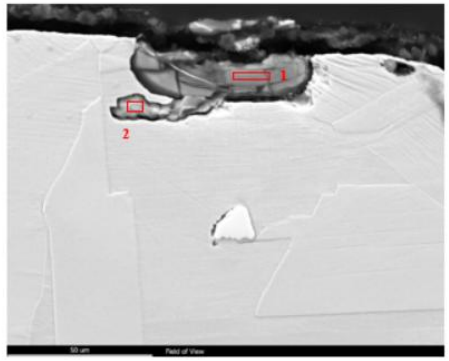






	Elements, %															
	C	O	Na	Al	Si	Nb	Mo	S	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
1	3.59	22.45	0.83	1.26	0.42	13.05	14.13	0	1.13	0.62	0.38	2.29	23.28	0	3.99	12.59
2	10.07	18.13	0	1.06	0.53	9.24	9.65	8.46	0.91	0.91	0.49	1.88	20.67	0	2.96	15.04
3	6.11	3.95	0	0.38	0	0	0	27.63	0.53	0	0	0	3.65	0.18	0.89	56.67





	Elements, %														
	C	O	Al	Si	Nb	Mo	S	Cl	K	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni
1	12.70	22.04	0.43	0.52	16.15	15.12	5.08	1.02	0.87	2.77	0.09	18.94	0.20	0.55	3.52
2	6.12	10.62	0.46	0	4.41	3.22	38.51	2.86	0	2.29	0	9.21	0.07	1.95	20.37