СТИМ

ИТС
ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

VIII Научно-технической конференции «КОРРОЗИЯ И УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ В НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»

Трубки витые для теплообменных аппаратов из высоколегированных сталей



ПОТЫЛИЦЫН МАКСИМ – ДИРЕКТОР ООО «СТИМ»
ЧИСТОПОЛЬЦЕВА ЕЛЕНА – РУКОВОДИТЕЛЬ ДСМ ООО «ИТ-СЕРВИС»

Г. САМАРА, 03-04.09.2024

Коротко о компании СТИМ

ООО «СТИМ»

- Образование компании - 2019 год с целью создания на территории России производства технологии ВИТЫХ ТРУБОК для кожухотрубных теплообменных аппаратов.
- Команда СТИМ обладает высокими компетенциями и большим опытом в области расчета и проектирования теплообменного оборудования
- Собственные технологии и собственное производство витых трубок и проволочных интенсификаторов в г. Новосибирске
- Исследовательская деятельность в области: теплогидравлики / свойств материалов / освоение новых продуктов / разработка ПО

Наши ценности:

I. Доверие
II. Ответственность
III. Экспертность
IV. Развитие
V. Созидание
VI. Идти на встречу друг другу



СТИМ

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

Загрузка сегодня

Трубы 25х2,0х6000 мм (08Х22Н6Т) – 13 тонн	Трубы 25х2,5 мм (Ст20; 15Х5М) – 70 тонн	Трубы 20х2,0х6000 мм (08Х18Н10Т) – 40 тонн







СТИМ

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

Предлагаемые технологии

Технология витых трубок



Проволочные интенсификаторы



Сохранение ресурсов - Возврат инвестиций - Шаг к декарбонизации

СТИМ

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

Бенефиты от внедрения технологий СТИМ:

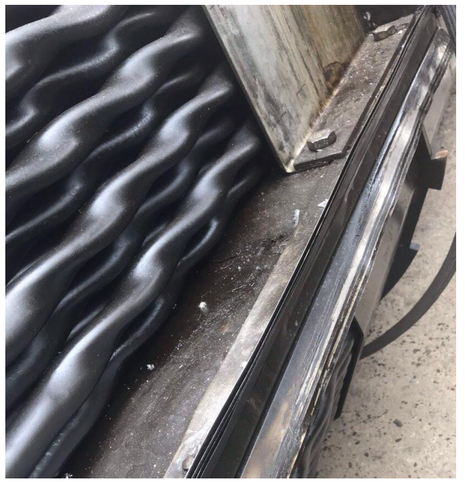
Повышение глубины рекуперации

Снижение загрязнений

Максимальная эффективность на длительном цикле эксплуатации

Эффекты от внедрения, установка АТ (с янв.2018 года):

- ✓ ~ 120 млн рублей в год от увеличения рекуперации (за 6 лет → 720 млн). Окупаемость проекта - 1,5 года.
- ✓ 6 лет работы без чисток без падающего тренда.



Улучшение охлаждения (концевые холодильники, АВО) → Холодильник керосина (с июля 2022 г.)

Снижение потерь от недостаточного охлаждения в летний период.

Увеличение производительности → Ребойлер для ГФУ с 2023 года:

Увеличение производительности на 40%

СТИМ

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

Компетенции в области проектирования и изготовления теплообменников с витыми трубками

- ✓ Собственная методика расчета
- ✓ Собственное конструирование
- ✓ Собственное производство витой трубы
- ❖ Изготовление витой трубы/ теплообменников / пучков



СТИМ

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

Доступные материалы и конструкции

1) Конструктив теплообменных аппаратов с витыми трубками:

Теплообменники или пучки с плавающей головкой / U – образные пучки

Теплообменники жесткотрубные

2) Марки стали труб:

Углеродистая сталь / Жаропрочные стали (ХМ) /Нержавеющие стали/Дуплексные стали.

3) Размер труб

Диаметр: 16, 20, 25 мм / Толщина: 2.0, 2.5, 3.0 мм /Длина до 21 м.



Проблематика применения витых трубок в условиях освоения технологии в РФ

Аргументы для внедрения

I. Применение витых труб дает экономический эффект от внедрения (снижение CAPEX и OPEX).

II. Длительный опыт и широкое распространение в мире на различных применениях.

Что лимитирует:

i. Технология подробно не описана в литературе;

ii. Нормативная/справочная документация РФ (ГОСТ, ТУ, РД, РТМ) и международные стандарты (ASME, API, TEMA) ограничено(обобщенно) описывает подходы к работе с витой или профилированной трубой;

iii. Различные подходы и понимание научной школы РФ и других стран к вопросам снижения рисков коррозии после профилирования

Неудачные практика применения витых трубок

Витая трубка трубного пучка парогенератора установки каталитического крекинга (FCC)

Основные технические характеристики парогенератора:

рабочее давление, МПа

- сторона кожуха –4,5
- сторона трубок –0,9;

рабочая температура, °С:

- сторона кожуха –121÷258
- сторона трубок –288÷360;

рабочая среда:

- сторона кожуха –вода/пар;
- сторона трубок –кубовый продукт КК.

Вид поверхности трубки парогенератора





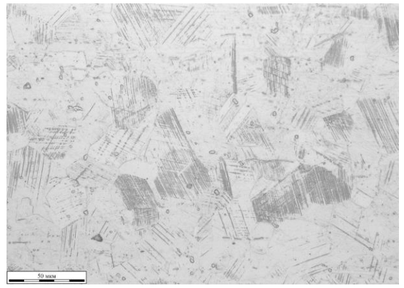
Результаты исследования витой трубы после выхода из строя

Химический состав стали:

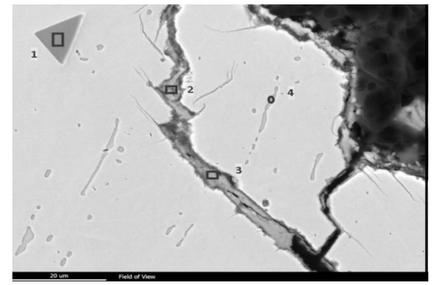
Массовая доля элементов, %														
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Co	Cu	V	Nb	N	Ti
0,039	0,43	1,01	0,035	<0,005	17,6	9,42	0,457	0,013	0,190	0,26	0,085	0,034	0,009	0,33
Требования ASTM A249 для стали TP321, не более														
0,08	1,00	2,00	0,045	0,030	17,0-19,0	9,0-12,0	–	–	–	–	–	–	0,10	5(C+N)-0.70 или 0,24-0,70

Отклонений химического состава металла разрушив-шейся трубки от требований нормативной документации не выявлено.

Микроструктура металла



Вид трещин в металле трубки

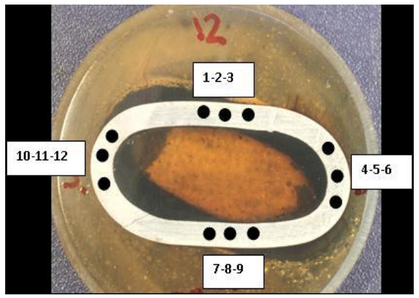




Измерение микротвердости HV (Труба электросварная):

Значение твердости (среднее), HV 100			
на 3 часа	**на 6 часов**	**на 9 часов**	**на 12 часов**
323	**362**	**332**	**349**
Требования ASTM A249, не более 188HV			

Металл поврежденной трубки не соответствует требованиям нормативной документации по твердости.



Выводы:

Разрушение витой трубки трубного пучка парогенератора произошло из-за развития коррозионного растрескивания под напряжением. Вероятными причинами, которые способствовали развитию коррозионного растрескивания являются:

- **наличие щелочной среды**, контактирующей с внешней поверхностью трубки;
- **не соответствие металла трубки** требованиям ASTM A249 а именно: ее холодная деформация в процессе изготовления без последующей термической обработки, и **значения твердости**, существенно **превышающие регламентированные стандартом**.

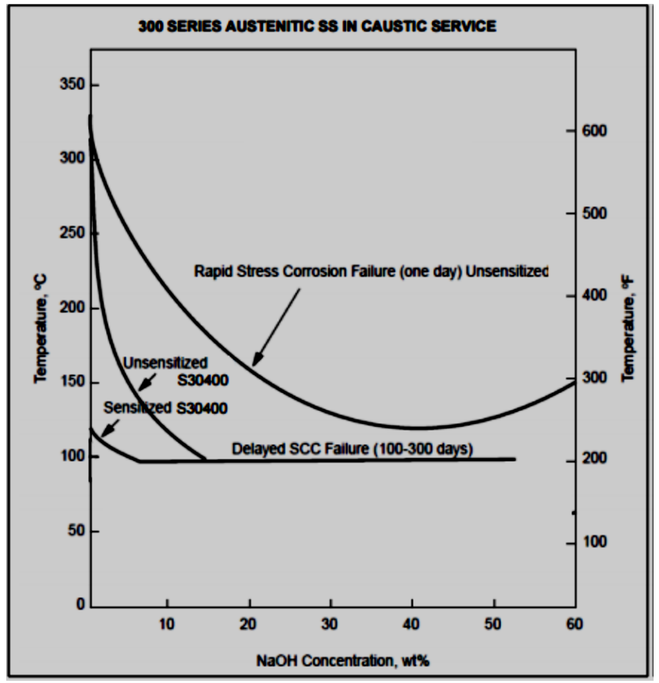


Диаграмма влияния концентрации щелочи и температуры для сталей 300 серии (NACE SP040315)

Следует отметить, что при температурах около 250°C для развития щелочного растрескивания достаточно очень малых концентраций щелочи в рабочей среде.

При этом следует принимать во внимание выявленный наклеп и повышенную твердость стали.

Исследование характеристик витой трубы ООО «СТИМ»

Свойства	Материал стали		Примечание
	08Х18Н10Т	08Х22Н6Т (Дуплекс)	
Вид стали	аустенитная	аустенитно-ферритная	
Твердость HV – Исходная (до профилирования)	188-241	253-277	На основании лабораторных испытаний
Твердость HV – Витая (после профилирования)	235-303 (+25%)	291-332 (+20%)	Металл упрочняется (признак наличия напряжений) Рекомендации по твердости: Для стали 08Х18Н10Т ≤ 250 HV Для стали 08Х22Н6Т ≤ 310 HV
Стойкость к МКК Витая (не термообработанная)	Стойкая	Стойкая	Метод АМУ по ГОСТ 6032
Стойкость к СКРН (не термообработанная)	Стойкая	Стойкая	СКРН ПО СТАНДАРТУ NACE TM0177
Вывод	1. Профилирование приводит к повышению твердости в следствии наклепа (признаки наклепа). 2. Профилирование не влияет на ухудшение стойкости к МКК и КР		

Условия для снятия напряжений после скручивания

Согласно ГОСТ 34347-2014 (п.п. 5.11.4; 5.11.7) термообработка требуется:

- Для аустенитных сталей, предназначеннных для работы в средах, вызывающих КР, а также при температурах выше 350 °С средах, вызывающих МКК
- Элементы выполненные из коррозионно-стойких сталей аустенитного класса методом холодной штамповки или холодным фланжированием, следует подвергать термической обработке, если они предназначены для работы в средах, вызывающих КР.

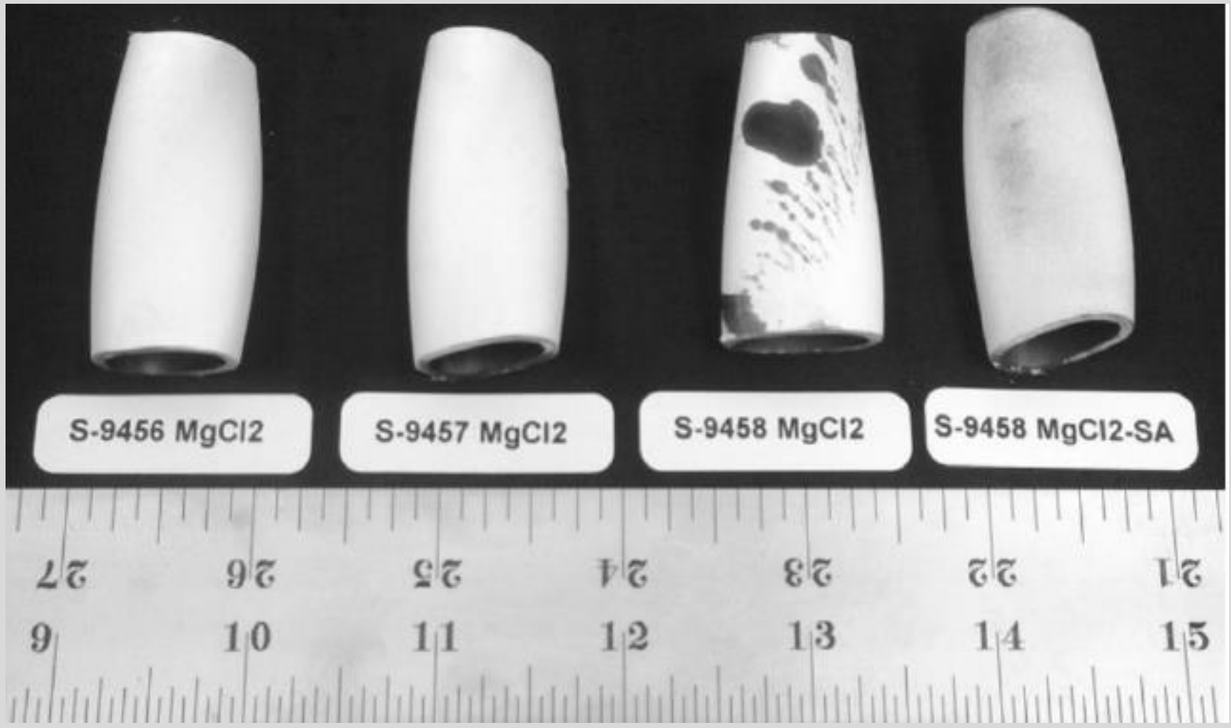
В остальных случаях термообработку допускается не проводить, если относительное удлинение при растяжении в исходном состоянии металла не менее 30 % при степени деформации в холодном состоянии не более 15 %.

Исследование характеристик витой трубы ООО «СТИМ»

- **Международный опыт (Публикация NACE Corrosion 2009 Paper #09338), тезисы:**
- Термообработка не требуется Согласно ASME (2) Code 1, если:
- Расчетная температура не превышает 540°C (1000°F), а деформация материала превышает 15%.
- Сохранялось опасение, что отсутствие термообработки после скручивания увеличит риск образования хлоридного КР в процессе эксплуатации. Отчасти это объяснялось тем, что широко распространены случаи образования КР на нетермообработанных U-образных отводах стали серии 300.

Лабораторные исследования показали:

- **<u>Витые трубки с термообработкой - не подвержены хлоридному КР</u>**
- Витые трубки без термообработки – подвержены хлоридному КР



Образцы скрученных трубок из нержавеющей стали 321 через 5 часов при 155°C, кипящем 42% MgCl2.

<u>Трещины в образце S-9458 (без термообработки) выделены пенетрантом.</u>

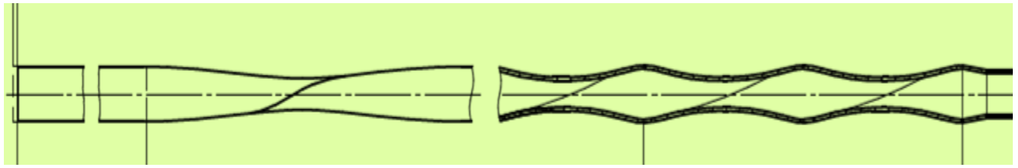
Никаких существенных трещин не наблюдалось в отожженных на раствор образцах S-9456 и S-9458-SA, а также в стабилизированном образце S-9457.

Исследование характеристик витой трубы ООО «СТИМ»

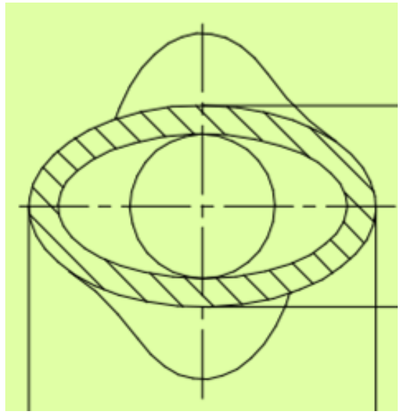
Для исключения рисков возникновения коррозии под напряжением были проведены исследования, в области:

1. Определение и снижения степени деформации

Продольный профиль витой трубы



Поперечное сечение профиля.





2. Разработка режима термической обработки

Внешний вид трубы гладкого профиля



Внешний вид трубы витого профиля



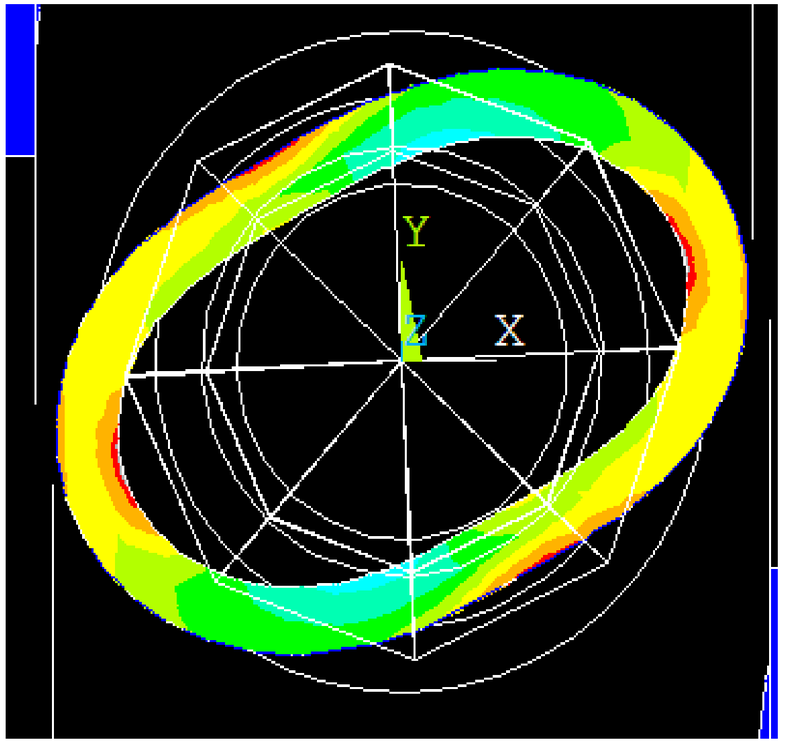
СТИМ

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

Определение и снижения степени деформации

Результат исследования

1. Степень деформации определена математическим моделирование (методом конечных элементов) на программе Ansys на основании существующей геометрии профиля (сумма влияния овализации и кручения)
2. Максимальное значение степени деформации составило 14,58%
3. Разработан новый тип профиля со сниженной степенью деформации до 12,5

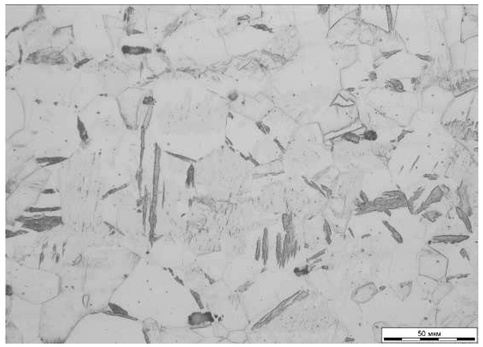




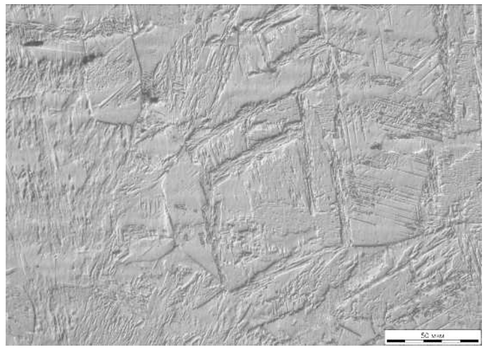
Разработка режима термической обработки

Влияние термической обработки на микроструктуру металла труб из стали 08Х18Н10Т

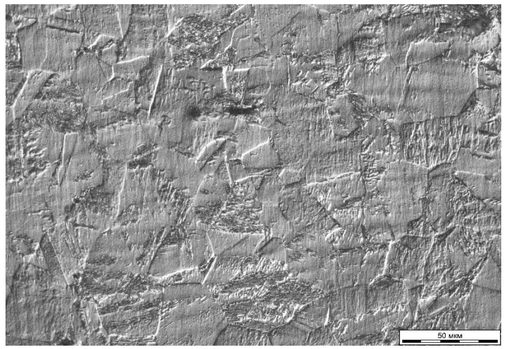
труба до профилирования
159 HV σ_B=686 МПа σ_T=369 МПа



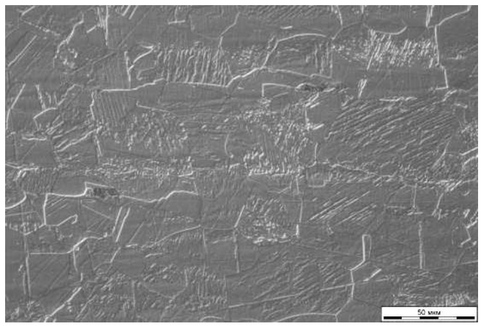
Витая труба после ТО по режиму аустенитизация (Нагрев до 1050°С, выдержка 40 мин., охлаждение в воду)
169 HV σ_B=626 МПа σ_T=330 МПа



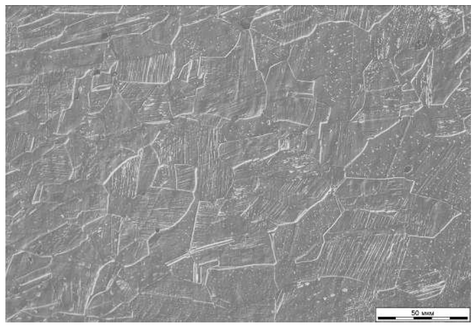
Витая труба после ТО по режиму высокотемпературный отжиг (Нагрев до 900°С, выдержка 4 ч., охлаждение в печи до 300°С, охлаждение на воздухе) 147 HV σ_B=671 МПа σ_T=366 МПа



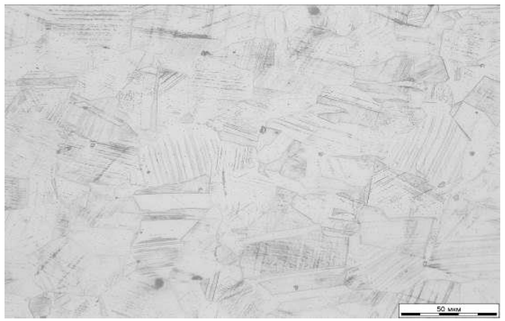
Витая труба без ТО
215 HV σ_B=778 МПа σ_T=587 МПа



Витая труба после ТО по режиму низкотемпературный отпуск (Нагрев до 390°С, выдержка 2ч, охлаждение на воздухе) 194 HV

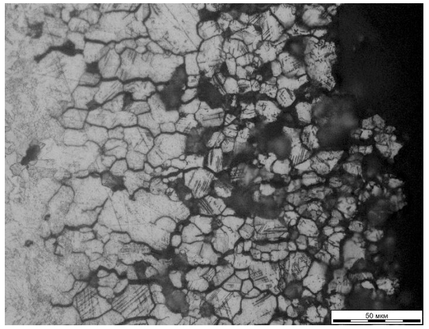


Витая труба после ТО по режиму высокотемпературный отпуск (Нагрев до 600°С, выдержка 1ч, охлаждение на воздухе) 192 HV

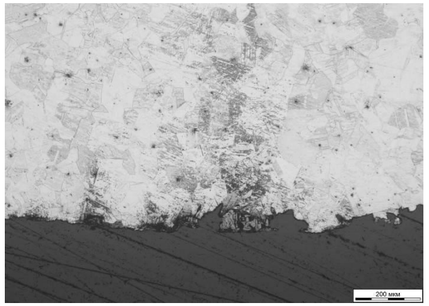


Разработка режима термической обработки

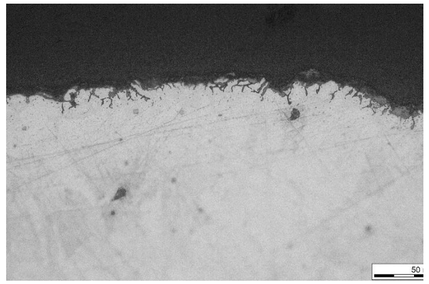
Вид изделия	Режим термообработки	Стойкость металла к МКК по ГОСТ 6032, метод АМУ с последующим сплющиванием, длина трещин	Стойкость к СКРН по NACE 0177, метод С. Пороговое напряжение, % от $\sigma_{T\ min}$	Стойкость к хлоридному растрескиванию по ASTM G36 в среде $MgCl_2 6H_2O$, длина трещин
Труба до профилирования	-	80мкм	>40	25 мкм растрескивание
Витой профиль	-	-	>40	25 мкм растрескивание
	ТО №1: Аустенитизация	25мкм	>40	20 мкм, язвы
	ТО №2. Высокотемпературный отжиг	10мкм	>40	15-25 мкм, растрескивание
	ТО №3: Низкотемпературный отпуск	-	>40	-
	ТО№4. Высокотемпературный отпуск	-	>40	-



Характерный вид межзеренных трещин, после испытаний на МКК. Витая труба после ТО по режиму низкотемпературный отпуск(Нагрев до Т=390˚, выдержка 2часа., охлаждение на воздухе)



Характерный вид поверхности С-колец после испытаний на СКРН. Витая труба после ТО по режиму аустенитизация (Нагрев до Т=1050˚, выдержка 40мин., охлаждение в воде)



Характерный вид поверхности после испытаний на стойкость к коррозионному хлоридному растрескиванию по ASTM G36. Витая труба после ТО по режиму высокотемпературный отжиг. (Нагрев до Т=900˚, выдержка 4часа., охлаждение в печи до 300С)

Выводы

1. Применение витых трубок является перспективным направлением технических улучшений теплообменных аппаратов, т.к. они дают экономический эффект. Данная технология имеет широкое распространение и многолетний опыт эксплуатации. Влияние профилирования на стойкость к коррозии многократно исследовалась.
2. Проведенные лабораторные исследования по влиянию различных режимов термической обработки витых труб из стали 12Х18Н10Т на механические и коррозионные свойства показали:

- -профилирование труб повышает прочностные свойства металла труб, что увеличивает вероятность развития коррозионного растрескивания в агрессивных средах;
- -проведение ТО по всем предложенным режимам понижает прочностные свойства, твердость менее 20 ед. HRC, в результате чего выполняются требования НТД;
- -рекомендуемыми режимами термической обработки для труб из аустенитной стали 08Х18Н10Т является: аустенитизация при 1050°С или высокотемпературный отжиг. В результате термической обработки формируется однородная структура с полиэдрической формой зерен, которая обеспечивает высокий уровень коррозионной стойкости к СКРН, стойкость к МКК и хлоридному растрескиванию.

3. Для снижения рисков эксплуатации нержавеющих аустенитных сталей в условиях коррозионного растрескивания трубы после профилирования необходимо подвергать термической обработки по режиму аустенизации или стаблизирующего отжига.

СТИМ

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

Всегда с вами!!!

e-mail: office@stim-he.ru

сайт: https://stim-he.ru/



Сохранение ресурсов - Возврат инвестиций - Шаг к декарбонизации