

۹- خستگی گرمایی Thermal Fatigue

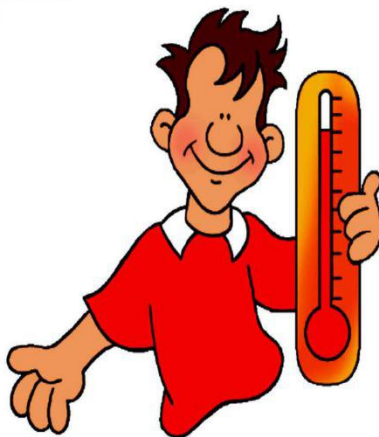
شرح آسیب

- خستگی گرمایی عبارت است از تنش های سیکلی است که در اثر تغییرات دمایی ایجاد می شود. این آسیب به شکل ترک خوردگی در قطعات فلزی تحت حرکات نسبی و تفاوت های انبساط دمایی و خصوصاً تحت تنش های پی در پی سیکلی گرمایی، ظاهر می شود.



مواد مستعد

- تمامی مواد



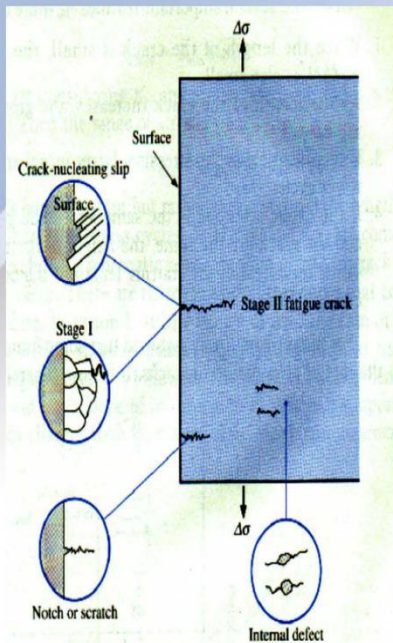
**Thermal Fatigue
Operating Temp.**

Graphitisation	800°F for C Steel	Plain carbon steel
	875°F for C ½ Mo Steel	C- ½ Mo
Spheroidization	850°F ~ 1400°F	Low alloy steel up to 9% Cr
Tempered Embrittlement	650°F~ 1070°F	2 ¼ Cr-1Mo low alloy steel, 3Cr-1Mo (lesser extent), & HSLA Cr-Mo-V rotor steels
Strain Aging	Intermediate temperature	Pre-1980's C-steels with large grain size and C- ½ Mo
885°F embrittlement	600°F~ 1000°F	300, 400 & Duplex SS containing ferrite phases
Sigma-Phase Embrittlement	1000°F~ 1700°F	300, 400 & Duplex SS containing ferrite phases
Brittle Fracture	Below DTBTT	C, C- ½ Mo, 400 SS
Creep & stress rupture	700°F ~ 1000°F	All metals and alloys
Thermal fatigues	Operating temp.	All metals and alloys

فاکتورهای مهم

- میزان نوسان دما¹ و فرکانس دمایی² (تعداد سیکل های دمایی در واحد زمان)
- زمان از کار افتادگی تابع اندازه‌ی تنش و تعداد سیکل است
- خاموشی و راه اندازی های تجهیزات استعداد به خستگی گرمایی را افزایش داده و هیچ حدی هم برای میزان نوسان دمایی وجود ندارد.
- تغییرات سریع در دمای سطح منجر به ایجاد گرادیان حرارتی در ضخامت و یا در راستای طول قطعه گردیده و در نهایت باعث پیشروی این آسیب می شوند. به عنوان مثال میتوان به آب سرد بر روی سطح یک تیوب داغ (شوک حرارتی)، اتصالات صلب با نوسان دمایی کمتر و عدم انعطاف پذیری در تقابل با تفاوت انبساطی اشاره کرد.

1. -Temperature Swing
2. Thermal Frequency
3. -Differential Expansion



واحدها و تجهیزات تحت تأثیر

- محلهای ترکیب و ادغام جریانهای سرد و گرم نظیر موضعی که آب کندانس شده و با سیستم های بخار در تماس قرار میگیرد.
- در تجهیزات تولید بخار متداول ترین نقاط خستگی گرمایی در محل اتصالات صلب بر روی تیوب های مابین سوپرهیتر و دی هیتر می باشد. فاصله نگه دار لغزشی هنگامی که بوسیله خاکستر دود مسدود می شوند، این خاکستر ماسیده سبب می گردد به عنوان یک اتصال صلب عمل نماید.
- دوده زدا

انواع ساپورت تیوبها

- Tube Support
- Tube Hanger
- Tube Sheet
- Tube Spacer



دوده زدا Soot Blower



دوره آموزشی مکانیزمهای تخریب تجهیزات فرآیندی بر اساس API 571-2011

سایورت دوده زدا



دی سوپر هیتر Desuperheater

● دی سوپر هیتر به منظور کنترل دمای بخار فوق اشباع به کار می رود زیرا بخار ورودی به توربین یا مصرف کننده بایستی دارای دما- فشار مشخص باشد.

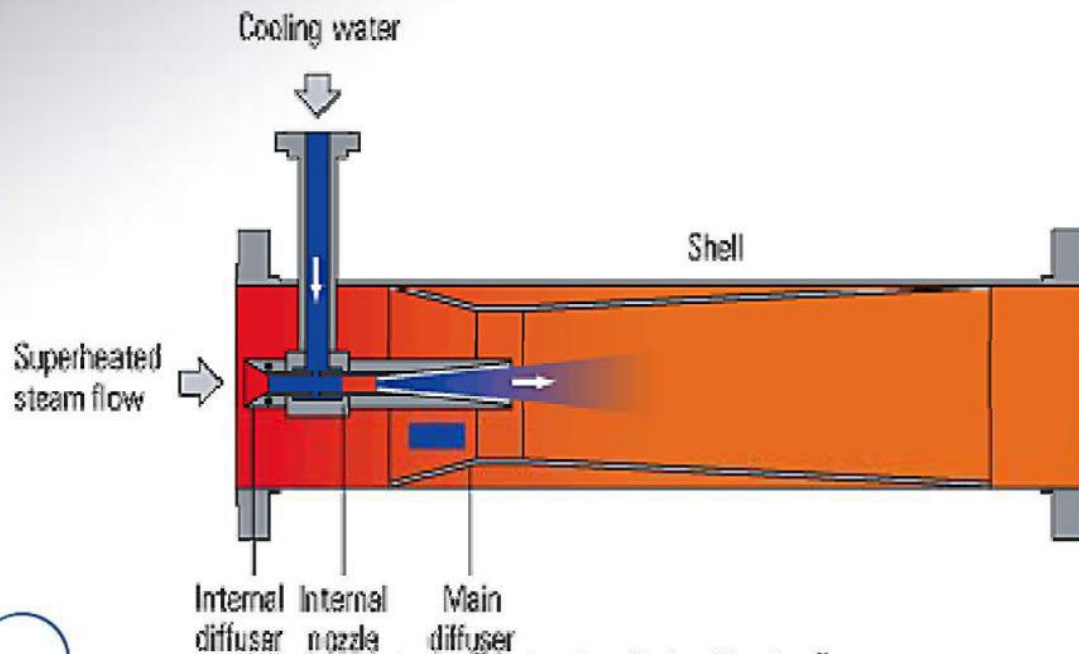
● دی سوپر هیتر انواع متفاوتی دارد که رایج ترین آنها شامل :

- Venturi type desuperheater
- Steam atomising desuperheater
- Reverse flow type axial desuperheater
- Multiple nozzle desuperheater



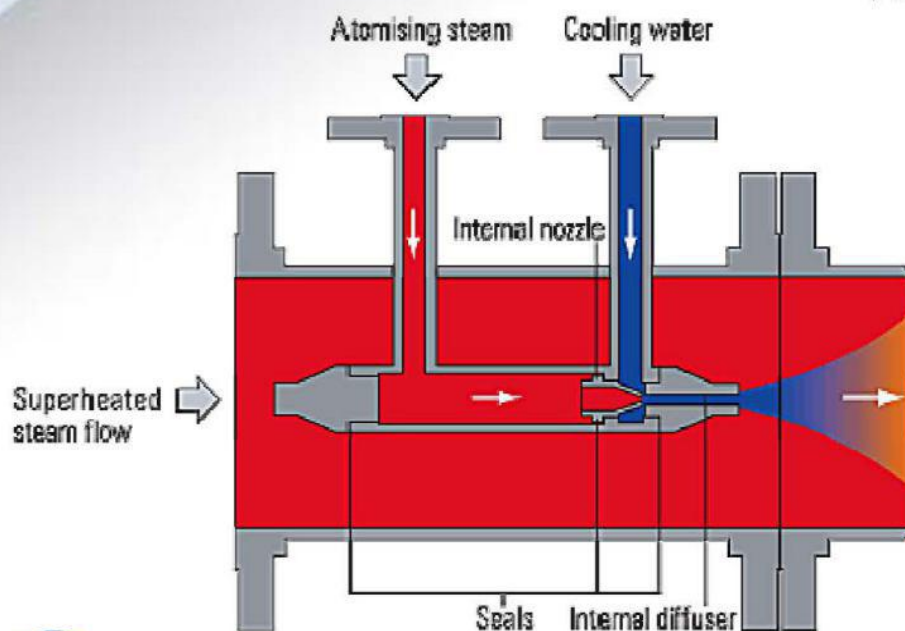
Venturi type desuperheater

در این نوع کنترل دما کمی مشکل می باشد. هم چنین احتمال شوک حرارتی نیز وجود دارد



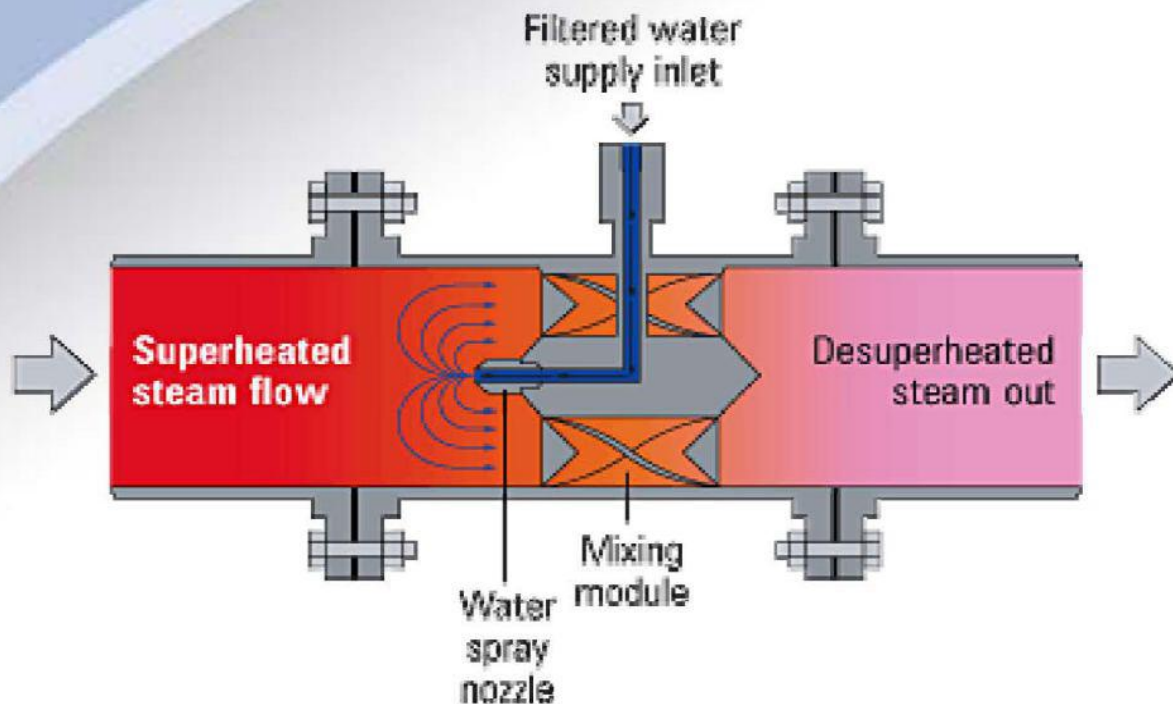
Steam atomising desuperheater

در این نوع کنترل دما بهتر و احتمال شوک حرارتی کاهش می یابد.



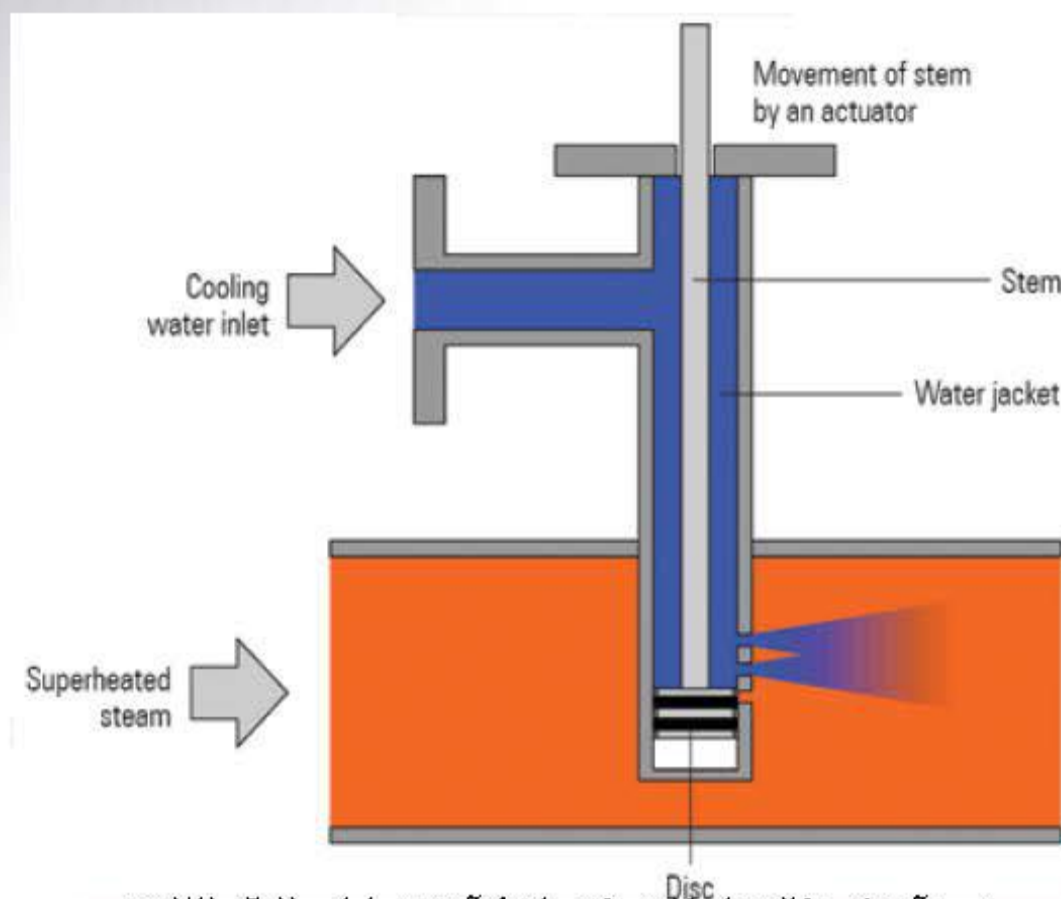
Reverse flow type axial desuperheater

بیشترین کاهش دمایی و راندمان بیشتر



Multiple nozzle desuperheater

کاهش دمایی بیشتر و کنترل دمایی بهتر با انتخاب تعداد نازل‌های فعال



بازرسی دی سوپر هیتر

- فلنج های مربوط به اسپری واتر که در مابین سوپرهیترهای اولیه و ثانویه قرار گرفته است را باز نمایید.
- نازل های اسپری واتر را مورد بازرسی قرار دهید. این نازلها مستعد به شوک حرارتی و خستگی گرمایی می باشند. پس از تمیزکاری مورد آزمایش ترک یابی قرار گیرد.
- در صورت وجود ترک در این نازلها ، امکان تعمیر آنها وجود نداشته و بایستی تعویض گردد

ظاهر و شکل شناسی

- ترکهای ناشی از خستگی گرمایی عمدتاً از سطح شروع می شوند. این ترکها معمولاً پهن بوده و درون آنها به دلیل قرار گرفتن در دمای بالا از اکسیدها پوشیده شده است. ترکها نیز به صورت تکی و یا ترکهای چندتایی رخ می دهند.
- ترک های خستگی گرمایی در راستای عمود بر تنشهای وارده رشد نموده و معمولاً دارای شکل خنجری Dagger shaped، درون دانه‌ای و پوشیده از اکسید می باشند. –
- در تجهیزات تولید بخار ترکها معمولاً در امتداد پنجه‌ی جوشهای گوشه می باشند
- آب در دوده زداها می تواند باعث ایجاد شکل خاصی از ترک خوردگی ها شود. ترکهای اصلی به صورت محیطی و ترکهای جزئی به صورت محوری می باشند.

ترک خوردگی و خرابی لانس دوده زدا بویلر کمکی به دلیل خستگی گرمایی



نمای نزدیک از ترک خوردگی خستگی گرمایی لنس دوده زدا در تصویر قبلی



پیشگیری و کاهش اثر

- به حداقل رساندن تنش ها و سیکل های گرمایی به هنگام طراحی و عملیات :
- (i) استفاده از طراحی هایی که منجر به کاهش تمرکز تنش و سنگ زنی و جوشکاری متوالی در پروفیل جوشها می شود و یا ایجاد تغییرات به صورت جزئی به عنوان مثال عدم استفاده از تغییر ناگهانی در ضخامت
- (ii) با کنترل سرعت سرد شدن و گرم شدن در حین خاموشی ها و از راه اندازی ها می توان منجر به کاهش تنش ها گردید.
- (iii) در هنگام اتصال اجزاء غیر هم جنس می بایست تفاوت انبساط دمایی این اجزا را مد نظر قرار داد.
- در دوده زدا ها می بایست خطوط تخلیه ای در نظر گرفته شود تا از کاندنس شدن در قسمت اول جلوگیری نمود.

بازرسی و پایش

- a. از آنجا که ترک خوردگی‌ها معمولاً از سطح شروع می‌شود بازرسی‌های چشمی و آزمایشات PT,MT از روشهای موثر بازرسی می‌باشند.
- b. به منظور بازرسی ترکهای داخلی و یا جاهایی که رینگ‌های تقویتی مانع بازرسی نازل‌ها می‌شوند، می‌توان از آزمون آلتراسونیک با امواج برشی SWUT بهره‌برد.
- c. با به کار بردن شیوه‌های ویژه آلتراسونیک می‌توان اتصالات جوشی داخلی راکتورهای با ضخامت بالا را مورد بازرسی قرار داد.

مکانیزمهای مرتبط

- خوردگی خستگی و ترک خوردگی جوش در فلزات غیرهم جنس از مکانیزم‌های مرتبط با خستگی گرمایی می‌باشند.



۱۲- ترک خوردگی فلزات غیر هم جنس (DMW) جوشکاری شده

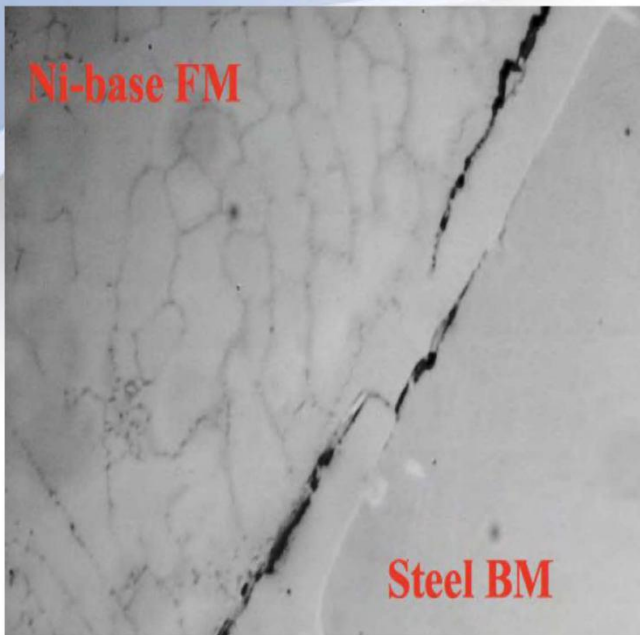
Dissimilar Metal Weld cracking

شرح آسیب

- ترک خوردگی فلزات غیر هم جنس جوشکاری شده بین فلزات آستنیتی (فولادهای زنگ نزن سری ۳۰۰ و یا آلیاژهای پایه نیکل) و فلزات فریتی (فولادهای کربنی و فولادهای کم آلیاژ) در شرایط دمای بالا و ترک خوردگی در سمت فریتی بوجود می‌آید. این ترک خوردگی ناشی از خزش، ترک خستگی، ترک خوردگی تنش سولفیدی و یا ترک هیدروژنی می‌باشد.

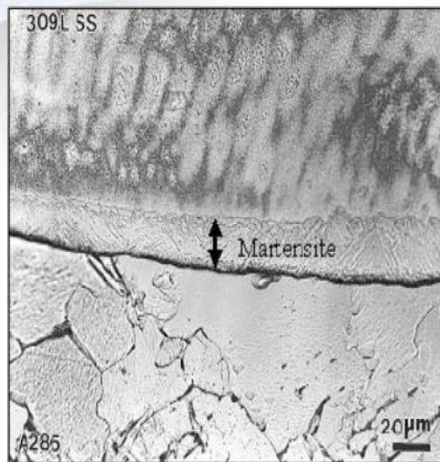
مواد مستعد

- متداول ترین مواد مستعد به این نوع آسیب فولادهای کربنی و فولادهای کم آلیاژ که به فولادهای زنگ نزن آستنیتی جوشکاری شده و یا هر ترکیب دیگری از دو یا چند ماده که دارای تفاوت زیادی در ضریب انبساط گرمایی باشند به این نوع آسیب مستعد خواهند بود.



API ۵۷۱-۲۰۱۱ دوره آموزشی مکانیزمهای تخریب تجهیزات فرآیندی بر اساس

اسفندماه ۱۳۹۳ - آکادمی توف نورد - مدرس ابراهیم خیر



۵۷۱-۲۰۱۱ API دوره آموزشی مکانیزمهای تخریب تجهیزات فرآیندی بر اساس

اسفندماه ۱۳۹۳ - آکادمی توف نورده - مدرس ابراهیم خیر

فاکتورهای مهم

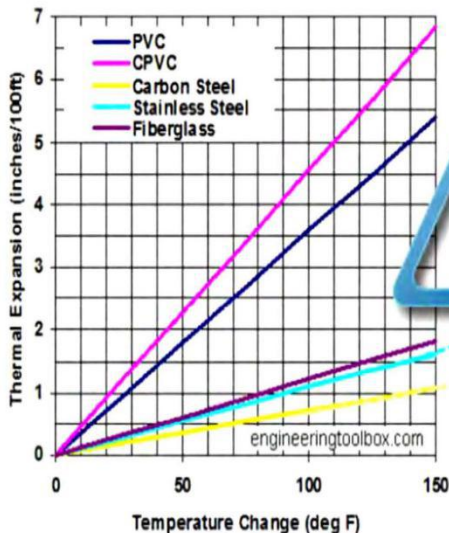
- نوع فلز پرکننده به کار رفته ، سرعت گرم شدن و سرد شدن، دمای فلز، مدت زمان نگه داری در دما، هندسه جوش و سیکل های گرمایی می باشد.
- هنگامی که دما افزایش می یابد تفاوت در انبساط گرمایی فلزات منجر به افزایش تنش در جوش خصوصاً اگر فلز جوش از نوع فولاد زنگ نزن سری ۳۰۰ باشد، می گردد.
- سیکل های گرمایی این پدیده را تشدید می نماید. تنش های وارده در زمان خاموشی و راه اندازی به میزان قابل ملاحظه ای خواهد بود.

فاکتورهای مهم

- استفاده از یک فلزپرکننده پایه نیکل به دلیل اینکه دارای ضریب انبساط گرمایی نزدیک به فولاد کربنی می باشد باعث کاهش قابل ملاحظه تنش ها در دمای بالا می شود.
- فلزات غیرمشابه جوشکاری شده که شامل فلز جوشی از نوع فولاد زنگ نزن سری ۳۰۰ یا فلز پر کننده پایه نیکل بر روی فولاد فریتی می باشند باعث ایجاد منطقه ی باریکی با سختی بالا در پنجه ی جوش نزدیک به خط ذوب در سمت فولاد فریتی می شوند. این منطقه ی با سختی بالا باعث افزایش استعداد فلز به انواع گوناگون ترک خوردگی های محیطی نظیر ترک خوردگی تنش ناشی از گوگرد و ترک خوردگی هیدروژنی میگردد

Coefficients of Thermal Expansion for Common Materials

Material	Coefficient (in/in/F x 10 ⁻⁶) to 800°F (427°C)
CS	7.97
1 Cr-1/2 Mo	7.53
2 ¼ Cr-1 Mo	7.53
300 Series SS	10.05
Alloy 600	8



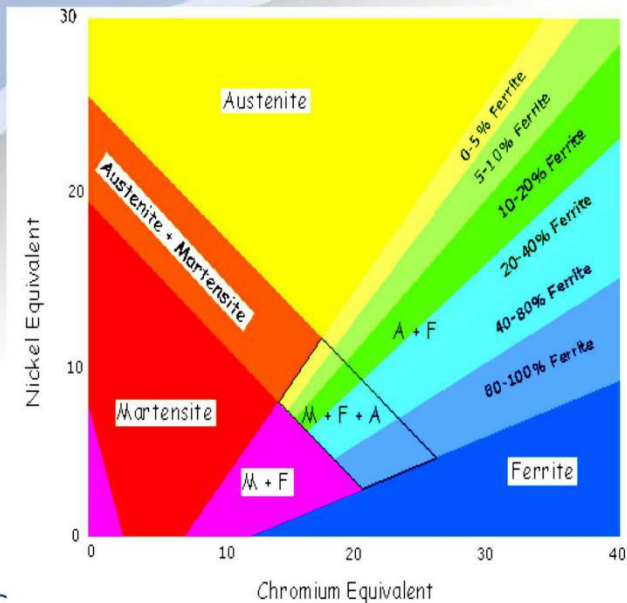
با افزایش دما میزان تفاوت انبساط حرارتی نیز زیاد می شود.



> 510°F

Ferritic/austenitic joints can generate significant thermal expansion/thermal fatigue stresses at temperatures greater than 510°F (260°C).

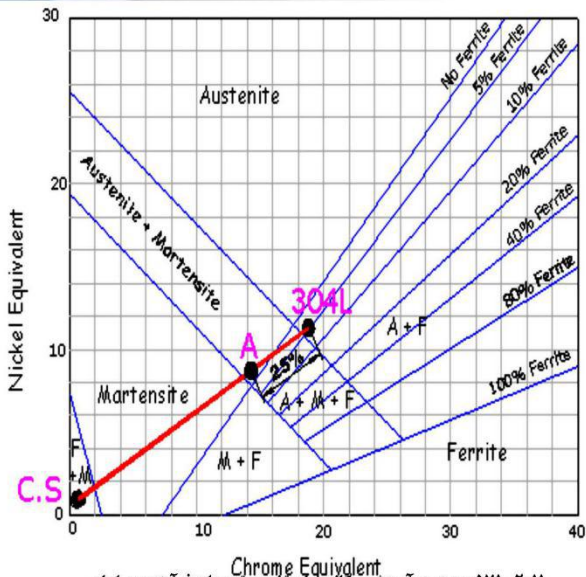
طراحی جوش – نمودار شفلر



API ۵۷۱-۲۰۱۱ دوره آموزشی مکانیزمهای تخریب تجهیزات فرآیندی بر اساس

استفاده ۱۳۹۳ - آکادمی توف نورده - مدرس ابراهیم خیر

- Nickel Equivalent = %Ni + 30%C + 0.5%Mn
- Chrome Equivalent = %Cr + Mo + 1.5%Si + 0.5%Nb



API 571-2011 دوره آموزشی مکانیزمهای تخریب تجهیزات فرآیندی بر اساس

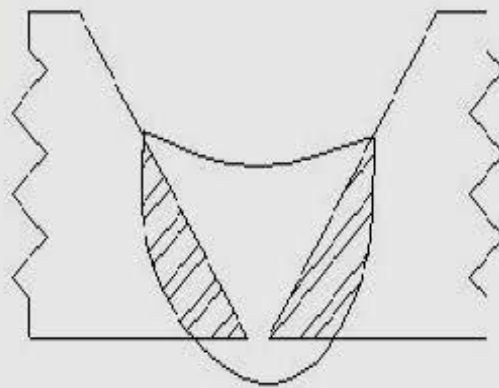
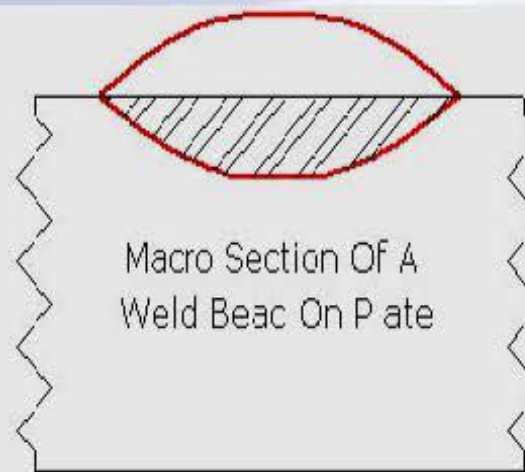
اسفندماه ۱۳۹۳ - آکادمی توف نور - مدرس ابراهیم خیر

Dilution

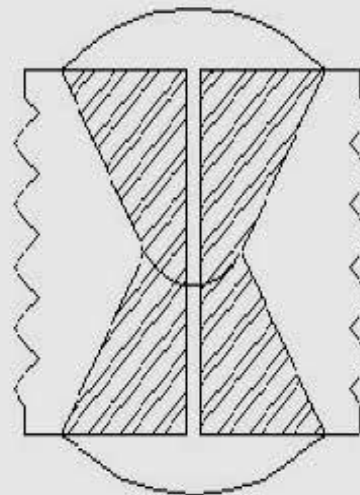
$$\% \text{ Dilution} = \frac{s}{s + S} \times 100$$

s = Area Of Molten Parent Plate
(Shown hatched)

S = Total Area Of Molten Pool
(Area Enclosed by Red Line)

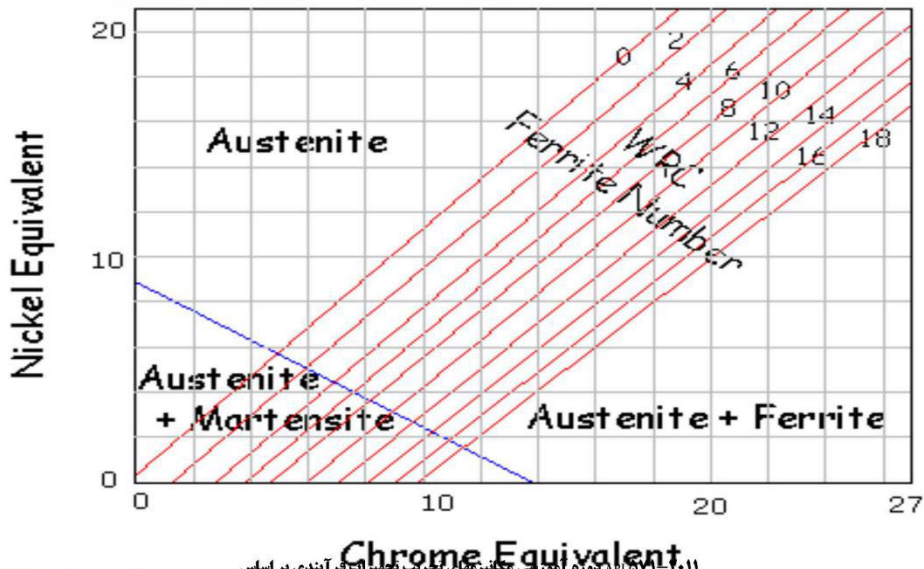


Root Run In A Typical Butt Weld.
Approx 25% Dilution



Square Butt Showing Very High
Dilution

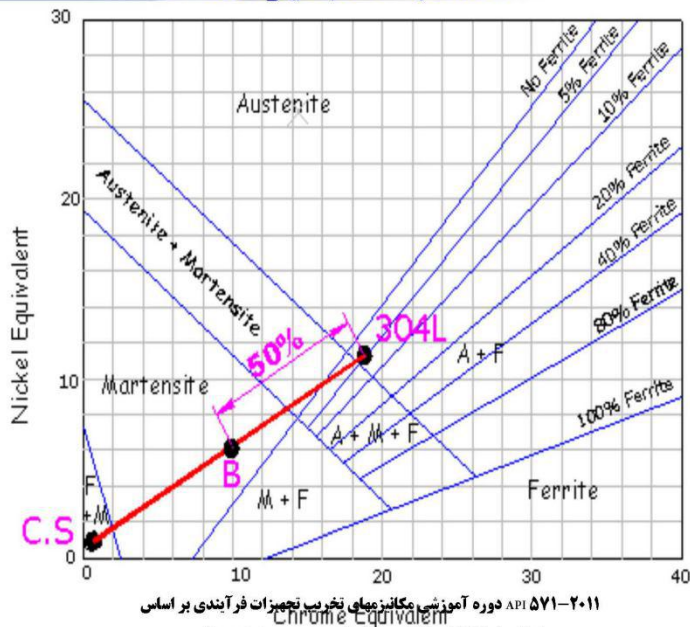
Ferrite Number



۱۰۱۱-۸۸۵۷۱ دوره آموزشی مکانیزمهای تخریب فسیلرک فرآیندی بر اساس

اسفندماه ۱۳۹۳ - آکادمی توف نورده - مدرس ابراهیم خیر

جوشکاری فلزات غیر هم جنس و نمودار شفلر 304L به CS با فیلر 309



دوره آموزشی مکانیزمهای تخریب تجهیزات فرآیندی بر اساس API 571-2011

Chromium Equivalent

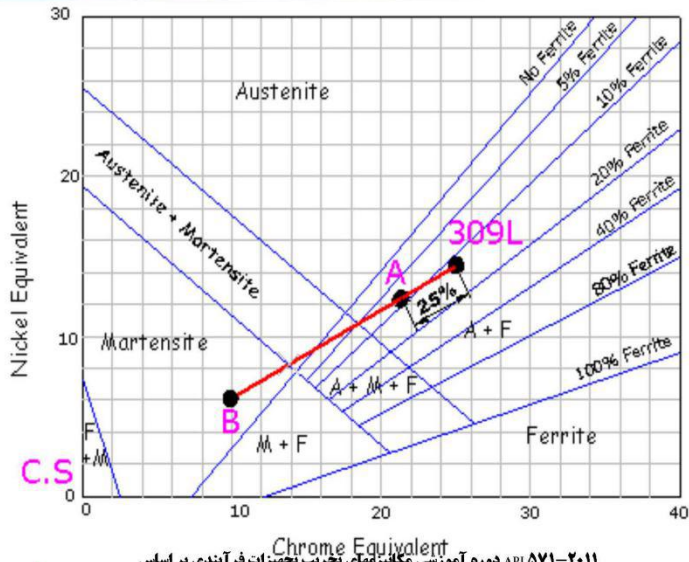
اسفندماه ۱۳۹۳ - آکادمی نوف نورد - مدرسی ابراهیم خیر

456

IRAN - GERMANY

TUV NORD

جوشکاری فلزات غیر هم جنس و نمودار شفلر 304L به CS با فیلر 309



اسفندماه ۱۳۹۳ - آکادمی توف نورده - مدرسه ابراهیم خیر

فاکتورهای مهم

- عملیات حرارتی پس از جوشکاری PWHT در پیشگیری از ترک خوردگی های القایی محیط هایی که حاوی H_2S مرطوب می باشد، بی تاثیر خواهد بود. چون منشا تنش ، تنش پسماند نیست
- طراحی اتصال فلزات غیر هم جنس
- در محیط هایی که خوردگی ناشی از خاکستر مایع می شود- نظیر تشکیل نقطه شبنم بر روی سطح خارجی تیوبهای کوره و تشکیل اسیدهای ناشی از ترکیب آب با خاکستر سوخت- احتمال ترک خوردگی های القایی محیطی در جوش بیشتر خواهد بود.
- پروفیل نامناسب جوشی، سوختگی بیش از حد کناره جوش و دیگر فاکتورهای افزایش دهنده تنش

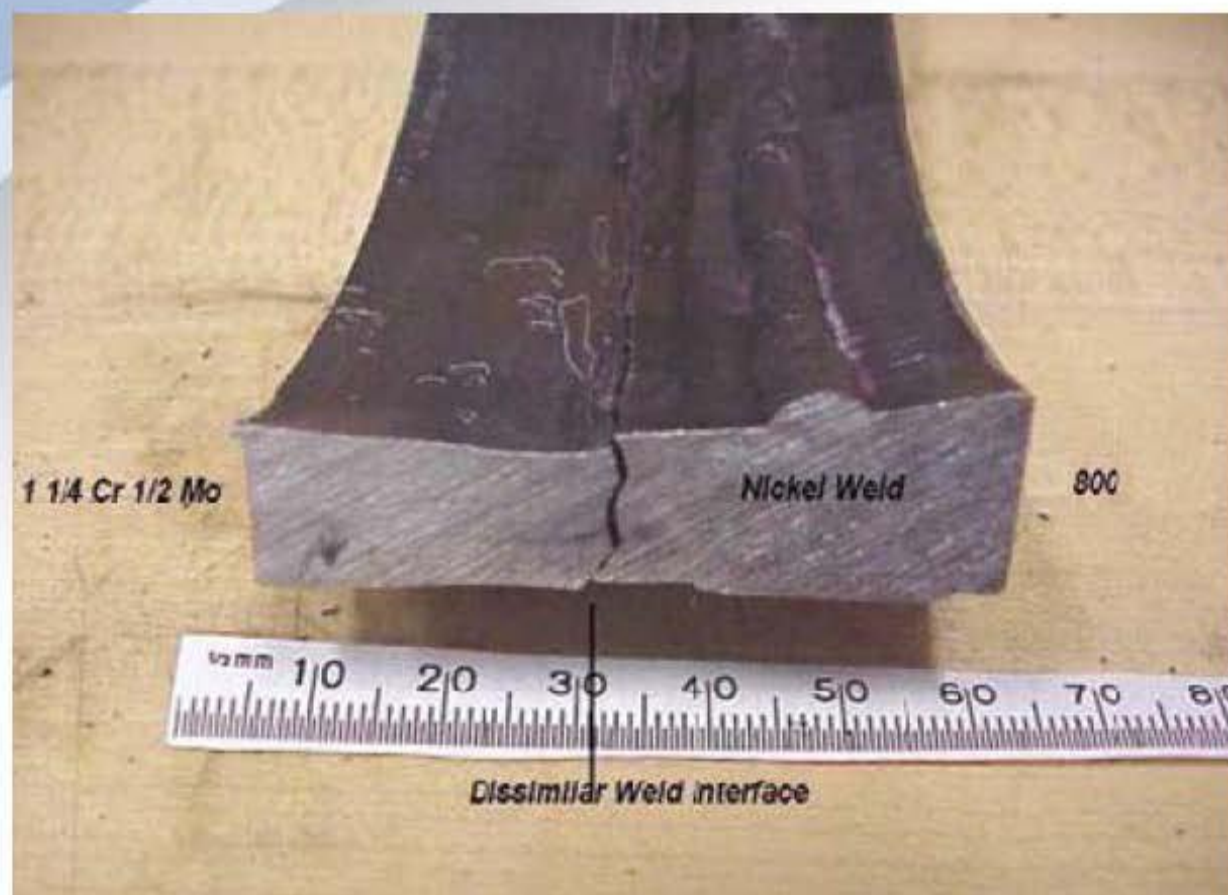
واحد ها و تجهیزات تحت تأثیر

- فلزات غیر هم جنس جوشکاری شده مورد استفاده در کاربردهای خاص در واحدهای پالایشی و یا دیگر واحدها
- لوله کشی مربوط به خروجی و ورودی مبدل‌های حرارتی واحدهای هیدروپروسسینگ
- تمامی تبدیل ها در کوره ها نظیر اتصال 9 Cr % به فولاد زنگ نزن 317L در کوره نفت خام
- اتصال ورودی دم خوکی (pigtail) از جنس 1.25 Cr مربوط به کوره واحد هیدروژن ریفرمر به سوکولت یا ولدودلت از جنس آلیاژ 800 مربوط به تیوب ها
- اتصال ولوهای با جوش محفظه ای از آلیاژ پایه نیکل به لوله کشی ها 5Cr % و 9Cr %
- اتصال روکش های فولاد زنگ نزن سری ۳۰۰ در محفظه داخلی راکتورها و ظروف تحت فشار در بسیاری از واحدهای پالایشی

ظاهر و شکل شناسی

- در بسیاری از موارد ترکها در پنجه‌ی جوش منطقه‌ی متأثر از حرارت فلز فریتی بوجود می‌آیند
- معمول ترین مناطق تحت تأثیر تیوب هایی می‌باشند که بوسیله‌ی جوشکاری به یکدیگر متصل شده‌اند، اما پایه سایورت ها و دیگر اتصالاتی که از جنس فولادهای زنگ نزن سری ۳۰۰ ریختگی و یا کار شده به فولادهای زنگ نزن سری ۴۰۰ هستند نیز تحت تأثیر می‌باشند.

ترک خوردگی اتصال فولاد 1.25Cr-0.5Mo به آلیاژ 800 مربوط به مبدل حرارتی در قسمت خروجی راکتور واحد هیدرو دی آلکیلایسیون. به دلیل تنشهای بالا در دمای بالا ($468^{\circ}\text{C} = 875^{\circ}\text{F}$) و فشار جزئی هیدروژن 280 psi ترک پیشروی نموده است.



ترک در محل اتصال تیوب از جنس HP40 (حاوی Nb) به فلنج 1.25Cr-0.5Mo به دلیل ترک
سرد هیدروژنی در لایه آستری مربوط به واحد ریفورمر بخار متان. دمای فرآیند حدود 914 الی
941oF (490oC الی 505oC) و فشار کاری 2.14Mpa و درصد هیدروژن ۱۰ الی ۲۰ %
حجمی گاز



۲۰۱۱-۵۷۱ API دوره آموزشی مکانیزمهای تخریب تجهیزات فرآیندی بر اساس

اسفندماه ۱۳۹۳ - آکادمی ذوق نور - مدرس ابراهیم خیر

نمای نزدیک از ترک خوردگی جوش کلاhek سیلندر



۲۰۱۱-۵۷۱ API دوره آموزشی مکانیزمهای تخریب تجهیزات فرآیندی بر اساس

اسفندماه ۱۳۹۳ - آکادمی ذوق نور - مدرس ابراهیم خیر

463



دوره آموزشی مکانیزمهای تخریب تجهیزات فرآیندی بر اساس API 571-2011

اسفندماه ۱۳۹۳ - آکادمی تیف نورد - مدرس ایرا هم خنجر

464

پیشگیری و کاهش اثر

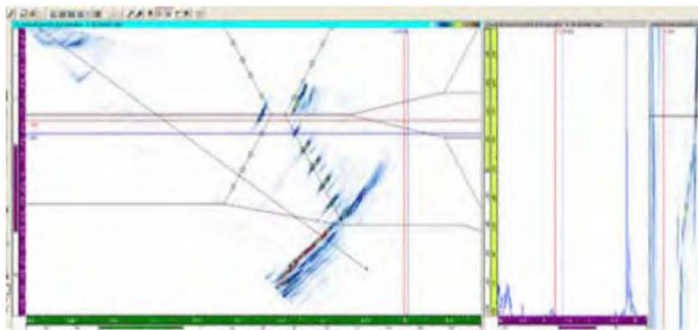
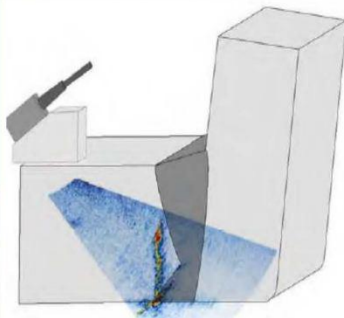
- از آن جایی که فلزات پرکننده پایه‌ی نیکل دارای ضریب انبساط گرمایی نزدیک به فولادهای کربنی و فولادهای کم آلیاژ هستند باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در تنش‌های حرارتی وارده بر اتصال در سمت فولاد فریتی شده و نتیجتاً به مقدار زیادی باعث افزایش عمر اتصال می‌گردند.
- اگر از الکترود فولادهای زنگ نزن سری ۳۰۰ جهت جوشکاری استفاده شده، جوش فلزات غیرمشابه می‌بایستی در محدوده‌ی دمایی پائینی به کار گرفته شود.
- بهتر است سمت فریتی را با فاز آستینیتی آستر کاری نمایید.

پیشگیری و کاهش اثر

- در اتصالات آسترکاری شده حداقل ضخامت جوش می بایستی 0.25 اینچ (6.25 میلی متر) باشد.
- در تجهیزات دما بالا، مابین دو فلز غیرمشابهی که قرار است به یکدیگر متصل شوند یک قطعه‌ی کوچک که دارای ضریب انبساط حرارتی مابین این دو فلز است را نصب کنید.

بازرسی و پایش

- انجام ۱۰۰٪ تست مایعات نافذ PT پس از آستر کاری و قبل از اتمام
- انجام ۱۰۰٪ تست آلتراسونیک UT لایه آستری پس از PWHT به منظور بررسی میزان چسبندگی
- انجام ۱۰۰٪ رادیوگرافی
- انجام ۱۰۰٪ تست آلتراسونیک با قابلیت ثبت
- انجام PMI به منظور بررسی آنالیز فلز جوش
- جوشهای غیر هم جنس در تیوب کوره ها می بایست مورد تست رادیوگرافی و امواج برشی آلتراسونیک SWUT قرار گیرد

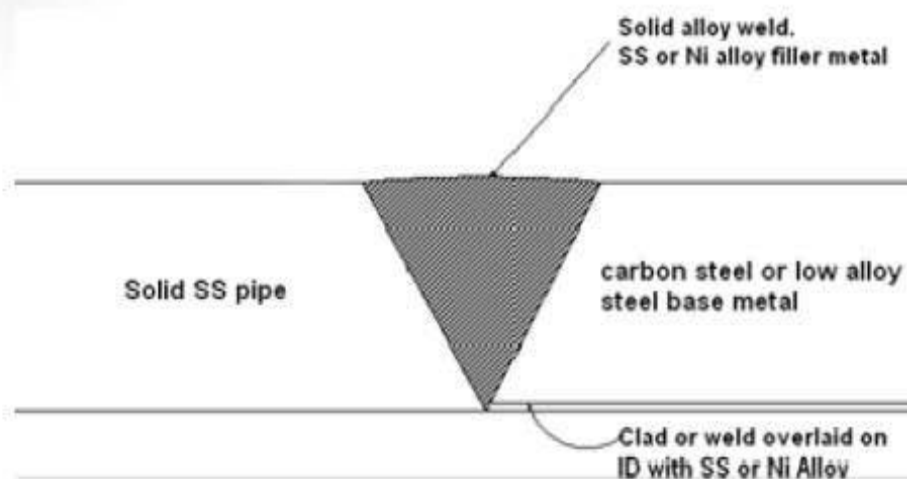
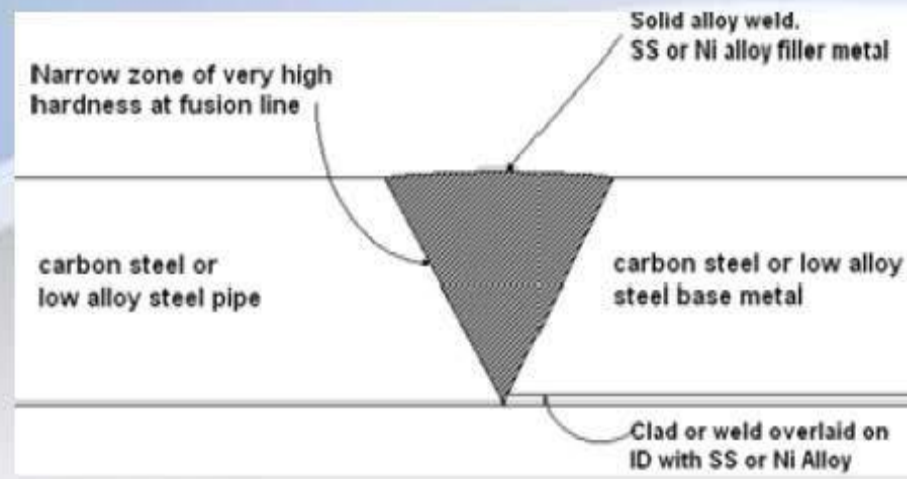


دوره آموزشی مکانیزمهای تخریب تجهیزات فرآیندی بر اساس API ۵۷۱-۲۰۱۱

اسفندماه ۱۳۹۳ - آکادمی توف نورد - مدرس ابراهیم خیر

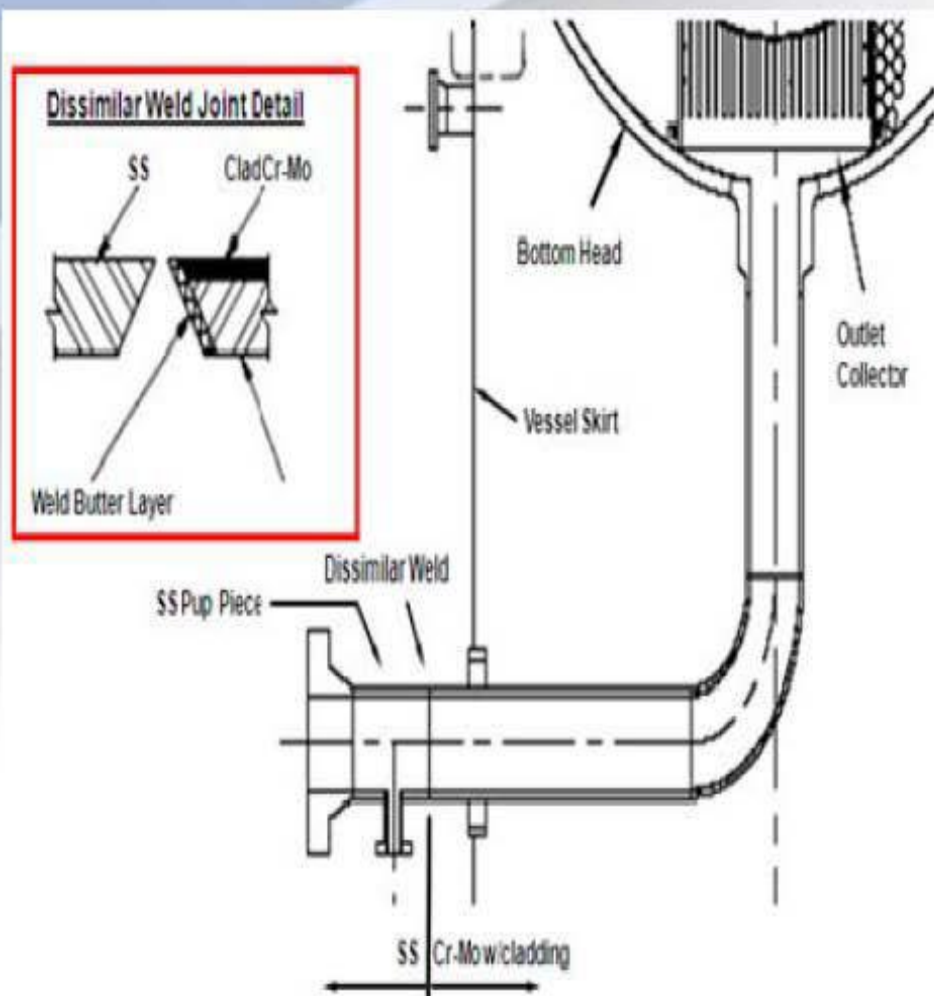
مکانیزم‌های مرتبط

- خستگی گرمایی، خوردگی خستگی، خزش و ترک خوردگی تنشی سولفیدی از مکانیزم‌های مرتبط هستند.



دو شکل رایج جوشکاری فلزات غیر هم جنس (a) لوله فولادی فریتی (سمت چپ) که به روکش و یا لوله روکش دار در سمت راست جوشکاری شده است. (b) فولاد زنگ نزن (سمت چپ) به روکش و یا لوله روکش دار (سمت راست) جوشکاری می شود.

۲۰۱۱-۵۷۱ API دوره آموزشی مکانیزمهای تخریب تجهیزات فرآیندی بر اساس



جزئیات طراحی یک جوش به منظور اتصال لوله فولاد زنگ نزن به روکش یا لوله روکش دار. مراحل کار عبارت است از : ۱- لبه جوش در سمت فولاد فریتی (سمت راست) را آسترکاری نماید. ۲- قبل از انجام جوشکاری عملیات حرارتی پس از جوشکاری PWHT در سمت فولاد فریتی اجرا نماید. ۳- عملیات جوشکاری فلزهای غیر هم جنس را با الکتروود مناسب با تمام رسانید. ۴- جوش حاصل نیازی به عملیات حرارتی پس از جوشکاری PWHT ندارد.