جوشکاری فلزات غیرهم جنس
Dissimilar welding

تعریف :

جوشکاری غیر هم جنس عبارتست از اتصال دو ماده (فلز) که یا از نظر ماهیت اتمی با یکدیگر متفاوتند مانند تیتانیم وفولاد، و یا آلیاژهای مختلف یک فلز می باشند مانند فولاد ساده کربنی به فولاد زنگ نزن

کاربردها:

- مواردی که یک ماده جوابگوی خواص مورد نیاز نباشد.
- استفاده از یک ماده خاص مقرون به صرفه نباشد.

مشکلات جوشکاری فلزات غیرهم جنس به روش ذوبی

۱- عدم انحلال در حالت جامد

۲- اختلاف در دمای ذوب

۳- اختلاف در ضریب هدایت حرارتی

٤- اختلاف در ضریب انبساط حرارتی

٥- اختلاف در نیاز به عملیات حرارتی

٦- اختلاف در قابلیت مغناطیس شوندگی

۱- عدم انحلال در حالت جامد

به غیر از تعداد محدودی از فلزات نظیر مس و نیکل مابقی فلزات در حالت جامد در یکدیگر قابلیت انحلال نداشته و با هم تولید ترکیبات ترد بین فلزی می کنند.

۲- اختلاف در دمای ذوب

تفاوت در دمای ذوب باعث:

۱- گسیختگی در فلز پایه با دمای ذوب پائین تر به دلیل اعمال تنش در اثر انجماد و انقباض فلز با نقطه ذوب بالاتر

۲- نفوذ مذاب فلز با نقطه ذوب کمتر به مرز دانه های جامد شده فلز با نقطه ذوب بالاتر و ایجاد ترک گرم

- معمولا اگر اختلاف نقطه ذوب دو فلز کمتر از $^{\circ}C$ ۱۰۰باشد به روش ذوبی قابل جوشکاری می باشند.

۳- اختلاف در ضریب هدایت حرارتی

جلوگیری از ذوب متقارن و ذوب بیشتر فلز با انتقال حرارت کمتر

Relationship of physical properties of various metals with those of carbon steel

Relative property	Ratio of properties					
	Carbon steel	Copper	Aluminum	Austenitic stainless steel	70Ni-30Cu	76Ni-16Cr-8Fe
Mean coefficient of thermal expansion	1.0	1.5	2.1	1.4	1.2	1.0
Thermal conductivity	1.0	5.9	3.1	0.7	0.4	0.2
Heat capacity	1.0	0.8	1.9	1.0	1.1	0.9
Density	1.0	1.1	0.3	1.0	1.1	1.1
Melting temperature	1.0	0.7	0.4	0.9	0.9	0.9

٤- اختلاف در ضریب انبساط حرارتی

اختلاف ضریب در حین انجماد باعث ایجاد تنش کششی در فلز با ضریب انبساط حرارتی بالاتر و تنش فشاری در فلز با ضریب پایین تر می شود.

این مسئله در سیکلهای با بازه متغییر دمایی شدیدتر است.

$$\sigma = E.\Delta\alpha.\Delta T$$

۵- اختلاف درنیاز به عملیاتهای حرارتی

برخی موارد یک فلز نیاز به عملیات حرارتی پس از جوش داشته در صورتی که همان عملیات برای فلز دیگر بسیار خطرناک محسوب می شود.

مانند اتصال فولاد زنگ نزن آستنیتی به آلیاژهای رسوب سخت شونده نیکل- کروم که عملیات پیر سختی لازم برای سوپر آلیاژ می تواند باعث حساس شدن فولاد زنگ نزن آستنیتی شود.

٦- اختلاف در قابلیت مغناطیس شوندگی

در جوشکاری های قوسی و یا پرتو الکترونی، وزش قوس و پرتو به سمت فلز مغناطیس شونده اتفاق می افتد.

این مسئله در نیروگاه ها به ویژه زمانی که اتصالات فولاد زنگ نزن آستنیتی به فریتی یا فولاد به سوپر آلیاژها مطرح می شود، خیلی اتفاق می افتد.

روشهای جوشکاری فلزات غیر همجنس

۱- روشهای حالت جامد

۲- لحیم کاری

۳- جوشکاری های ذوبی

جوشکاری های حالت جامد

در جوشکاری های حالت جامد اساس جوشکاری بر پایه تغییر شکل پلاستیک استوار است. بنابراین مشکلات روشهای ذوبی در اینجا وجود ندارد. اما دو نکته باعث محدود شدن استفاده از این روشها در جوشکاری فلزات غیر هم جنس شده است:

۱- اختلاف استحکام تسلیم دو فلز نباید زیاد باشد.

۲- جوشکاری های حالت جامد محدود به شکلها، کاربردها و اتصالات خاص می شود.

لحیم کاری

لحیم کاری نیز مشکلات روشهای ذوبی را نداشته لیکن:

۱- استحکام جوش حاصل خیلی قابل توجه نمی باشد.

۲- آلیاژهای لحیم لزوما برای هر دو فلز غیر همجنس قابلیت خیس کنندگی ندارند.

جوشکاری های ذوبی

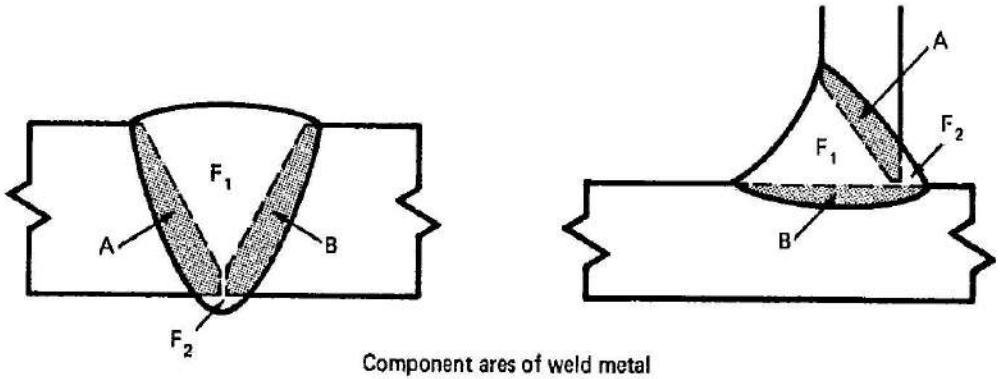
با انجام تمهیداتی می توان تا حدی بر مشکلات موجود در جوشکاریهای ذوبی فائق آمد.

در ادامه برخی از این تمهیدات بیان می شود.

۱-رفع مشکل عدم انحلال در حالت جامد

بهترین راه حل استفاده از فیلر متال مناسب است که قابلیت انحلال با هر دوی فلزات غیر هم جنس را داشته باشد. مانند استفاده از نیکل برای اتصال فولاد به مس.

البته برای جلوگیری از آمیزش دو فلز می توان چند لایه از فیلر واسط بر روی یکی از فلزات پایه لایه نشانی کرد وجوش نهایی بین لایه ایجاد شده و فلز دوم ایجاد شود.



در هر دو صورت باید به میزان رقت وکنترل آن توجه داشت خصوصا در حین تنظیم وتمرکز قوس.

Component ares of weld metal

$$\text{Dilution by Metal A,\%} = \frac{A}{A+B+(F_1+F_2)} \times 100$$

$$\text{Dilution by Metal B,\%} = \frac{B}{A+B+(F_1+F_2)} \times 100$$

$$\text{Total dilution,\%} = \frac{A+B}{A+B+(F_1+F_2)} \times 100$$

۲- رفع مشکل اختلاف در دمای ذوب

بهترین راه حل استفاده از یک یا دو فلز واسط می باشد که اختلاف دمای حداقل به ۱۰۰C عنوان لایه واسط بر فلز با نقطه ذوب بیشتر ایجاد شده تا بتوان به اتصال مطلوبی رسید.

۳- رفع مشکل اختلاف در ضریب هدایت حرارتی

برای غلبه بر این مشکل دو راه وجود دارد:

۱- تمرکز منبع حرارتی بر روی فلز با هدایت حرارتی بالاتر

۲- پیش گرم کردن قطعه با هدایت حرارتی بالاتر

٤- رفع مشکل اختلاف در ضریب انبساط حرارتی

برای رفع این مشکل دو را عمده وجود دارد:

۱- استفاده از فیلر با ضریب انبساط بینابین، یا اگر اختلاف بالا باشد از لایه نشانی استفاده شود.

۲- استفاده از پیش گرم برای فلز با ضریب انبساط بالاتر

$$\sigma = E.\alpha.\Delta T$$

۵- رفع مشکل اختلاف درنیاز به عملیاتهای حرارتی

در این حالت می توان فلزاتی را که نیاز به عملیات حرارتی پس از جوش دارند لایه نشانی نمود، کل مجموعه را عملیات حرارتی کرده و سپس به فلز دوم جوشکاری نمود.

مانند لایه نشانی سوپر آلیاژ رسوب سخت شونده با یک فیلر از جنس سوپر آلیاژ که رسوب سخت شونده نباشد. سپس عملیات حرارتی و در نهایت اتصال به فولاد زنگ نزن.

راه دیگر آنکه می توان از یک فولاد زنگ نزن پایدار شده مانند ۳۱۶ یا ۳۲۱ استفاده نمود.

٦- رفع مشکل اختلاف در قابلیت مغناطیس شوندگی

ساده ترین راه حل ممکن استفاده از جریان AC است.

البته می توان با قراردادن یک سیم پیچ حامل جریان در طرف فلز غیر مغناطیسی میدانی برابر با میدان تولید شده ایجاد نمود که باعث بالانس شدن پرتو یا قوس می شود.

مشکلات کلی اتصالات غیر همجنس در دمای بالا

به غیر از آنکه اتصال غیر هم جنس ایجاد شده به چه روشی صورت پذیرد، مشکلات زیادی در حین سرویس (خصوصا در دمای بالا) ممکن است برای آنها ایجاد شود از جمله:

۱- اختلاف خواص حرارتی نظیر ضریب انبساط در سیکلهای دما بالا می تواند سریعا منجر به ایجاد خستگی حرارتی یا توسعه و ایجاد ترک گردد.

۲- احتمال مهاجرت عناصر آلیاژی و بروز مشکلات. نظیر مهاجرت کربن در اتصال فولاد به فولاد زنگ نزن که سبب تردی فولاد زنگ نزن به دلیل تشکیل ترکیبات پیچیده، و نیز کاهش استحکام فولاد می شود.

۳- اختلاف در ترکیب شیمیایی دو طرف اتصال می تواند منجر به تشکیل پیل گالوانیک در دماهای بالا شود. خصوصا اگر یک طرف اتصال یک فولاد استحکام بالا قرار داشته باشد و به گونه ای شرایط برقرار شود که فولاد کاتد قرار بگیرد، در نتیجه آن خطر تردی هیدروژنی وجود خواهد داشت.

نکات مهم در انتخاب فلز پر کننده در جوشکاریهای ذوبی

۱-از نظر خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی فلز پر کننده باید خواصی بینابین دو فلز پایه داشته باشد .

۲-قابلیت انحلال مناسبی با هر دو فلز پایه داشته باشد.

۳- فلز جوش حاصل باید حداقل، خواص مکانیکی فلز ضعیف تر را تامین نماید.

٤-مقاومت به خوردگی حداقل معادل با فلز مقاوم تر داشته باشد.

۵- زمانی که اختلاف در نقطه ذوب بالا باشد، باید فلز پر کننده با نقطه ذوبی نزدیک به فلز پایه با نقطه ذوب پائین تر انتخاب شود تا بتواند به راحتی به داخل آن نفوذ کرده و اتصال محکمی ایجاد کند. در صورتی که عکس این مسئله اتفاق افتد، در حین جوشکاری رقت فلز پایه با نقطه ذوب کمتر بیشتر خواهد بود.

بررسی چند مورد اتصال ذوبی غیر هم جنس مهم در صنعت

۱-فولاد ساده کربنی یا کم آلیاژی به فولاد زنگ نزن

۲-نیکل به فولاد

۳-مس به فولاد

٤-آلومینیوم به فولاد

٥-مس به نیکل

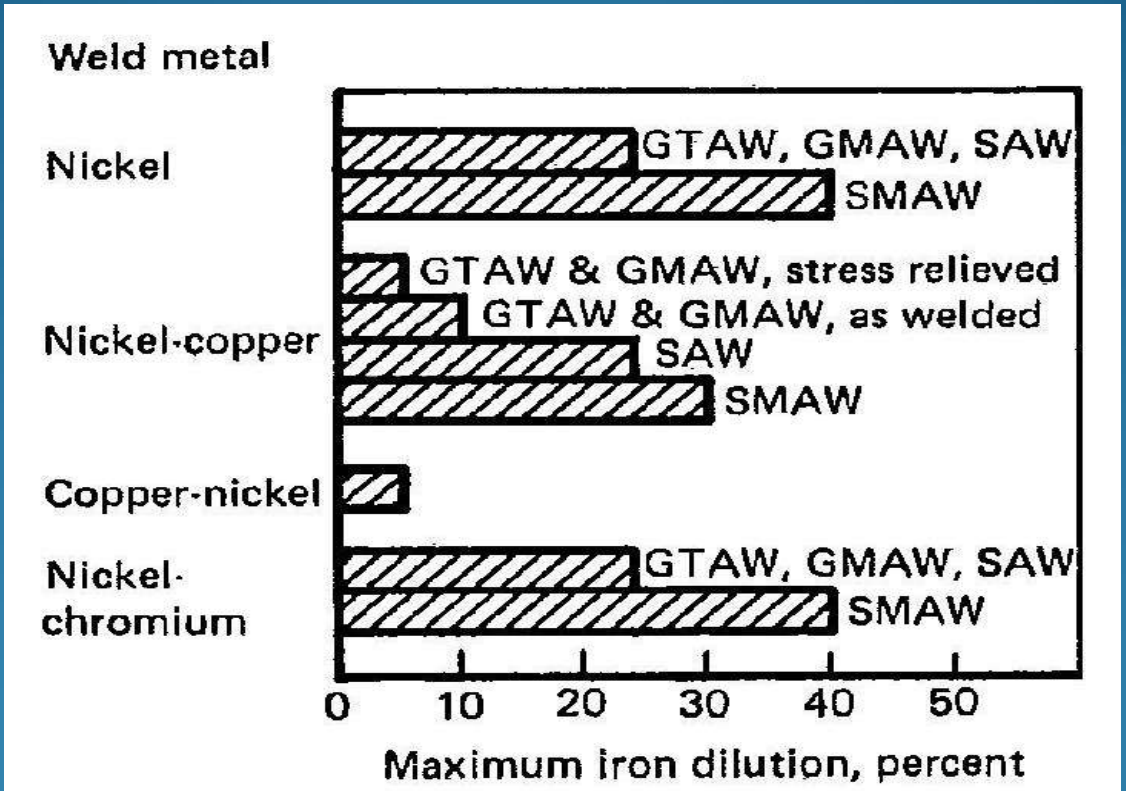
٦- اتصال فولادهای روکش شده

جوشکاری غیر همجنس نیکل به فولاد

نیکل وآهن تا حد قابل توجهی در یکدیگر قابل انحلال می باشند از این رو اتصال این دو فلز به روش ذوبی با مشکل زیادی مواجه نمی شود.

اتصالات غیر هم جنس نیکل به فولاد بیشتر زمانی مطرح می شوند که نیکل به عنوان فیلر متال برای اتصال فولاد به فولاد زنگ نزن یا آلیاژهای پایه آهنی بد جوش استفاده می شود.

میزان رقت برای فیلرهای نیکلی در روشهای مختلف، در شکل زیر مشخص شده است



Limits for iron dilution of nickel and nickel-alloy weld metals

Suggested filler metals for welding nickel alloys to steels

Nickel alloy			Filler metal for welding to	
UNS No.	Common designation[a]	Filler metal form	Carbon or low alloy steel	Stainless steel
N02200	Commercially pure nickel	Covered electrode	ENi-1, ENiCrFe-2	ENi-1, ENiCrFe-2, ENiCrFe-3
		Bare wire	ERNi-1, ERNiCr-3	ERNi-1, ERNiCr-3, ERNiCrFe-6
N04400 N05500 N05502	Monel 400 Monel K-500 Monel 502	Covered electrode	ENiCu-7, ENi-1	ENiCrFe-2, ENiCrFe-3
		Bare wire	ERNi-1	ERNiCr-3, ERNiCrFe-6
N06600 N08800	Inconel 600 Incoloy 800	Covered electrode	ENiCrFe-2, ENiCrFe-3	ENiCrFe-2, ENiCrFe-3
		Bare wire	ERNiCr-3 ERNiCrFe-6	ERNiCr-3 ERNiCrFe-6
N08825	Incoloy 825	Covered electrode	ENiCrMo-3	ENiCrMo-3
		Bare wire	ERNiCrMo-3	ERNiCrMo-3
N10665	Hastelloy B-2	Covered electrode	ENiMo-7	ENiMo-7
		Bare wire	ERNiMo-7	ERNiMo-7
N10276	Hastelloy C-276	Covered electrode	ENiCrMo-4	ENiCrMo-4
		Bare wire	ERNiCrMo-4	ERNiCrMo-4
N06455	Hastelloy C-4	Covered electrode	ENiCrMo-4	ENiCrMo-4
		Bare wire	ERNiCrMo-7	ERNiCrMo-7
N06007	Hastelloy G	Covered electrode	ENiCrMo-9	ENiCrMo-9
		Bare wire	ERNiCrMo-1	ERNiCrMo-1

a. Some of these designations are tradenames. There may be other similar alloys having different designations.

Typical mechanical properties of welded joints between nickel alloys and steels

Nickel alloy				Tensile strength, ksi	Elongation, percent	Failure location
UNS No.	Common designation[a]	Steel	Filler metal[b]			
N04400	Monel 400	410sst	ENiCrFe-2	81.8	34	Monel
N04400	Monel 400	304sst	ENiCrFe-2	83.4	45	Monel
N06600	Inconel 600	347sst	ENiCrFe-2	95.1	29	Inconel
N06600	Inconel 600	405sst	ERNiCrFe-6	90.0	35	Stainless steel
N06625	Inconel 625	304sst	ENiCrMo-3	91.2	—	Stainless steel
N06625	Inconel 625	410sst	ERNiCrMo-3	67.6	—	Stainless steel
N08800	Incoloy 800	347sst	ERNiCrFe-6	90.6	33	Incoloy
N10001	HASTELLOY B	Mild steel	ENiMo-1	60.0	—	Mild steel
N10002	HASTELLOY C	316sst	ENiCrFe-2	90.5	33	Stainless steel
N10002	HASTELLOY C	Mild steel	ENiCrMo-5	61.0	—	Mild steel

a. Several of these may be registered tradenames. Alloys of similar composition may be known by other designations.

b. Refer to AWS Specifications A5.11-76 and A5.14-76 for information on nickel alloy filler metals.

جوشکاری غیر همجنس مس به فولاد

۱- مس خالص

اتصال مس به فولاد سه مشکل اساسی دارد:

۱-اختلاف در ضریب انتقال حرارت

۲- عدم انحلال در حالت جامد

۳- ایجاد ترک گرم در اثر نفوذ مس مذاب به مرز دانه منجمد شده فولاد

برای رفع مشکل اول می توان بر حسب ضخامت مس آنرا بین ۲۵۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد پیش گرم نمود.

برای مشکل دوم وسوم بهترین راه حل لایه نشانی توسط نیکل بر روی مس می باشد. از آنجا که نیکل قابلیت رقیق شدن توسط آهن را دارا می باشد از این رو به راحتی این اتصال ایجاد می شود.

البته به عنوان فیلر از برنز آلومینیوم و برنز سیلیسیوم نیز می توان استفاده نمود.

۲- مس – نیکل یا نیکل- مس

برای اتصالات آلیاژهای نیکل- مس یا مس- نیکل مانند مونل به فولاد یا فولادهای زنگ نزن که در کاربردهای دریایی مصرف زیادی دارند دو راه وجود دارد:

۱-لایه نشانی بر روی فولاد یا فولاد زنگ نزن با پرکننده نیکلی یا نیکل- مس تا آهن و کروم رقیق شوند. سپس با فیلر از همین جنس اتصال به آلیاژ مس- نیکل صورت پذیرد.

۲- لایه نشانی با پر کننده نیکلی بر روی فلز پایه مس- نیکلی یا نیکل- مس و سپس جوشکاری به فولاد با همین پر کننده نیکلی

۳- آلومینیوم برنز

آلومینیوم برنز را با استفاده از همین فیلر می توان جوشکاری نمود. برای اتصال به فولاد، برحسب میزان سختی پذیری فولاد، آلومینیوم برنز باید بین ۱۵۰ تا ۲۵۰ درجه سانتیگراد پیش گرم شود ولی برای اتصال به فولاد زنگ نزن پیش گرم از ٦٥ درجه سانتیگراد بیشتر نباید شود.

٤- برنج

آلیاژهای برنج نباید بیش از ۲۰٪ روی داشته باشند تا تخلخل ایجاد نگردد.

GTAW بهترین روش برای این اتصال می باشد.

ابتدا بر روی برنج یک لایه برنز لایه نشانی کرده تا رقت آهن صورت پذیرد، سپس توسط همین پرکننده اتصال به فولاد انجام می شود.

برای محدود کردن رقت فولاد، باید تمرکز قوس بر روی فیلر باشد تا علاوه بر آنکه رقت آهن کم می شود، از تبخیر روی جلوگیری به عمل آمده و هم آنکه نفوذ قابل توجهی صورت پذیرد.

جوشکاری غیر هم جنس آلومینیوم به فولاد

اتصال آلومینیوم به فولاد سخت ترین نوع اتصال می باشد زیرا تقریبا می توان گفت تنها اتصال صنعتی است که تمامی مشکلات جوشکاری های ذوبی را دارا است از این رو حتی به روشهای حالت جامد نیز این اتصال به سختی ایجاد می شود.

تنها راه حل عملی، جلوگیری از هرگونه اختلاط فولاد وآلومینیوم می باشد.

دو راه کلی برای ایجاد این اتصال وجود دارد :

راه اول

۱- فولاد با یکی از پوششهای آلومینیومی، روی، نقره و یا قلع که همگی را می توان به روش غوطه وری گرم ایجاد نمود پوشش داده می شود.

بهترین پوشش خود آلومینیوم می باشد که در بازه دمایی ٦٩٠ تا ٧٠٥ درجه سانتیگراد بر روی فولاد ایجاد می شود. البته با استفاده از روشهای PVD-CVD-ELECTRO PLATING نیز می توان آلومینیوم را بر روی فولاد نشاند.

۲-با پر کننده آلومینیومی و روش GTAW اتصال انجام می پذیرد.

۳- در حین جوشکاری قوس باید بر روی فلز پایه آلومینیومی متمرکز شود تا حرارت باعث اختلاط با فولاد نشود.

البته اتصال ایجاد شده نباید در بیش از بازه تنشی ۱۵ تا ۳۰ ksi کار کند. استحکام اتصال تابع عوامل زیر می باشد:

۱- فلز مورد استفاده برای پوشش فولاد

۲- ضخامت پوشش

۳- استحکام لایه پوشش داده شده بر روی فولاد

از طرفی به دلیل احتمال نفوذ آلومینیوم در فولاد، اتصال حاصل نباید در بیش از دمای ۲۶۰ درجه سانتیگراد کار کند.

راه دوم

می توان با استفاده از دو فلزی (Bimetal) آلومینیوم – فولاد که با روشهای انفجاری، اصطکاکی یا سایر روشهای حالت جامد ساخته می شود اتصال را بر قرار نمود. برای این منظور ابتدا دو فلزی را در وسط اتصال قرار داده و سپس ابتدا آلومینیوم را به آلومینیوم با روش تیگ و سپس فولاد به فولاد با روش الکترود دستی می توان جوشکاری کرد.

به دلیل احتمال تشکیل پیل گالوانیک بین اتصالات آلومینیوم – فولاد بهتر است اتصال ایجاد شده در نهایت رنگ یا پوشش دهی شود.

اگر پوشش گالوانیزه را بخواهیم جوشکاری نماییم باید ۳ تا ۵٪ سیلیسیوم، مس یا روی به پر کننده آلومینیومی اضافه شود تا ترکیبات بین فلزی بین ناحیه ذوب شده و پوشش روی محدود گردد.

جوشکاری غیر هم جنس مس به نیکل

به دلیل انحلال کامل مس و نیکل در حالت جامد، بدون هیچ مشکلی و به راحتی می توان با پر کننده های مس- نیکل یا نیکل – مس، جوشکاری این دو فلز به یکدیگر را انجام داد.

جوشکاری غیر هم جنس تیتانیوم

اتصال تیتانیوم به آلیاژهای مهم غیر آهنی توسط فیلر از جنس **نایوبیوم** که دارای قابلیت رقت با تیتانیوم، آلومینیوم، مس و نیکل می باشد، صورت می پذیرد. برای لایه نشانی، نایوبیوم با نقطه ذوب بالاتر را ابتدا بر روی آلیاژهای غیر آهنی نامبرده نشانده و سپس لایه حاصل را به تیتانیوم متصل می کنیم.

برای اتصال فولاد با همان رویه توضیح داده شده در بالا از فیلر **وانادیومی** استفاده می کنیم.

جوشکاری فولادهای روکش شده (clad steel)

فولادهای ساده کربنی ارزانترین گروه از آلیاژهای مهندسی می باشند، از این رو در بسیاری از موارد که مجبور به استفاده از سایر آلیاژهایی که مقاومت به خوردگی، سایش و دیگر خواص بهتری دارند، هستیم. در این موارد می توان به جای استفاده از آلیاژ مورد نظر از فولاد روکش شده با ضخامتی کم از آلیاژ مورد نظر استفاده نمود. این مسئله باعث صرفه جویی اقتصادی در کاربردهای مهندسی می شود.

اما بزرگترین مشکل در راه استفاده از این فولادها، جوشکاری آنان در ساخت سازه، لوله، یا مخزن می باشد.

انواع فولادهای روکش شده

۱- فولاد روکش شده با قلع

۲- فولاد روکش شده با فولاد زنگ نزن

۳- فولاد روکش شده با نقره

٤- فولاد روکش شده با مس

٥- فولاد روکش شده با نیکل

٦- فولاد روکش شده با تیتانیوم

در جوشکاری این اتصالات به سه نکته باید توجه نمود :

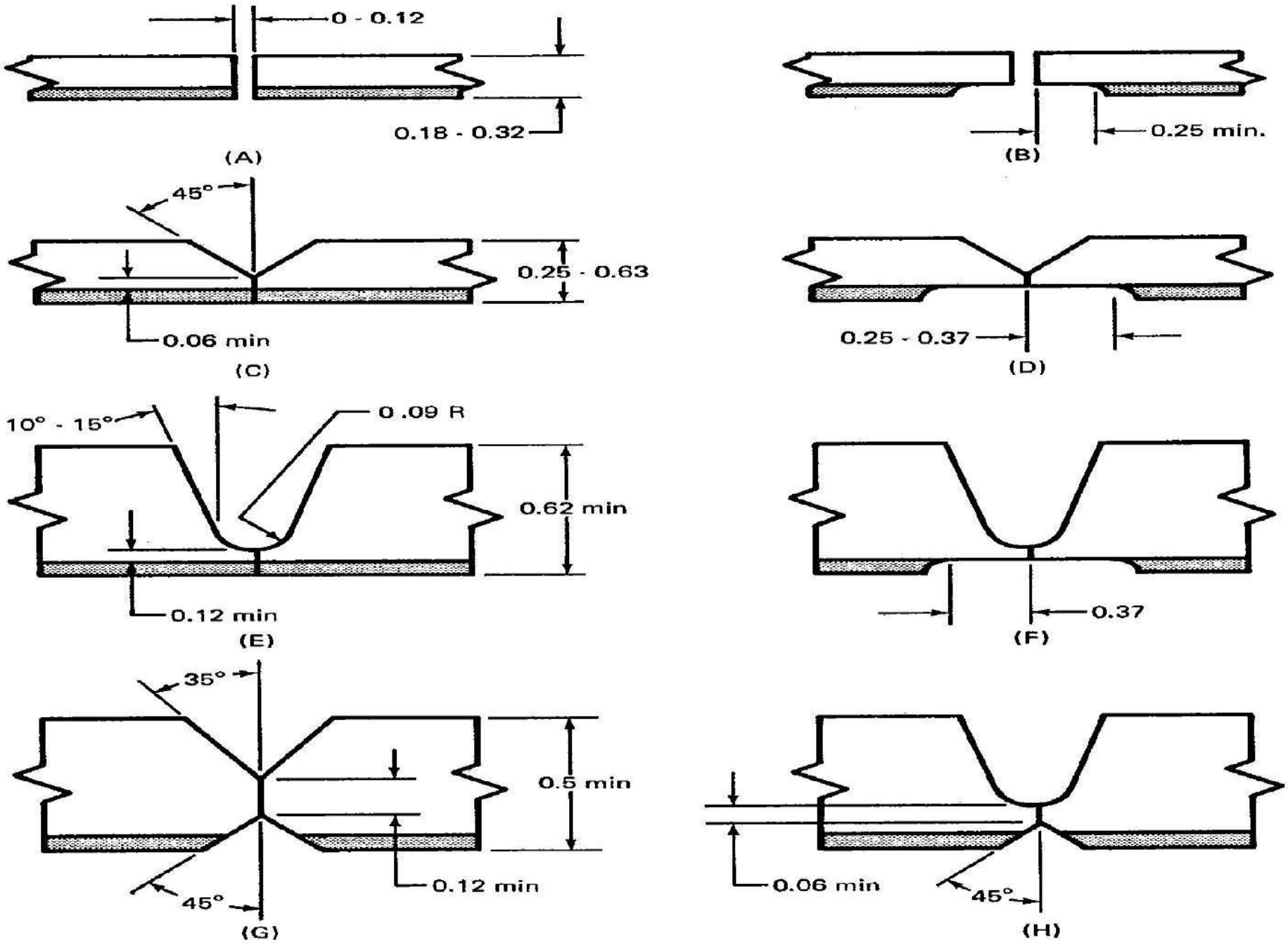
۱- طرح اتصال

۲- فیلر متال

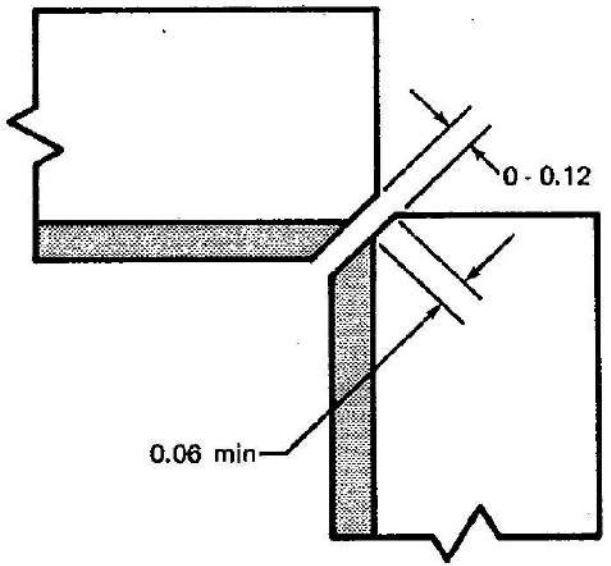
۳- روش جوشکاری

که به تفکیک هرکدام را بررسی خواهیم نمود.

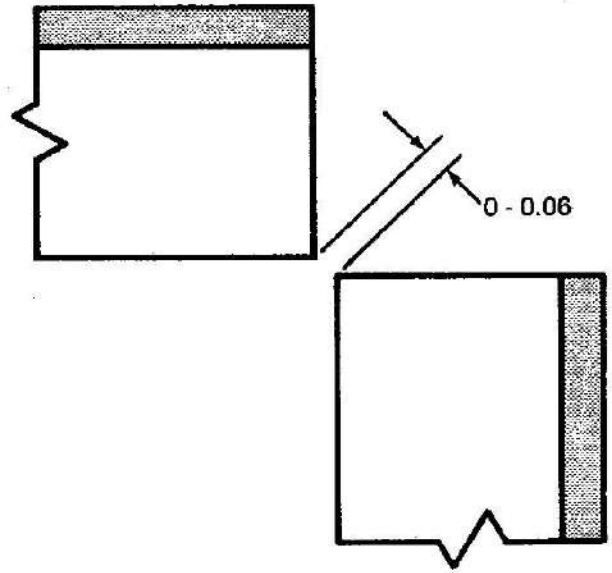
طرح اتصال



Butt joint designs for welding clad steel from both sides



(A)



(B)

Fig. 12.17—Corner joint designs for welding clad steel from both sides

در جوشکاری اتصالات سپری :

۱- اگر روکش در داخل اتصال قرار بگیرد، ابتدا فولاد را جوشکاری نموده و سپس آنرا از پشت برداشته و سپس با فیلر متال مناسب جوشکاری می کنیم.

۲- اگر روکش در بیرون اتصال قرار بگیرد، ابتدا فولاد را جوشکاری نموده وسپس آنرا برداشته بعد از آن فولاد را لایه نشانی می کنیم تا به روکش برسیم.

نکته قابل توجه آنکه در اتصالاتی که به هیچ عنوان امکان جوشکاری ذوبی وجود ندارد باید روکش را برداریم و با کمک تسمه کمکی جوشکاری را انجام دهیم.

فیلر متال

Filler metals for welding the cladding layer of clad steel

Cladding metal	Buttering passes		Fill passes	
	Covered electrode	Bare electrode or rod	Covered electrode	Bare electrode or rod
Austenitic Cr-Ni stainless steels				
304	E309, E309L	ER309, ER309L	E308, E308L	ER308, ER308L
304L	E309L	ER309L	E308L	ER308L
309	E309, E309L	ER309, ER309L	E309, E309L	ER309, ER309L
309S	E309L	ER309L	E309L	ER309L
310, 310S	E310, E310Cb	ER310	E310, E310Cb	ER310
316	E309Mo	ER309	E316, E316L, E318	ER316, ER316L, ER318
316L	E309L, E309Mo	ER309L	E316L, E318	ER316L, ER318
317	E309Mo	ER309	E317, E317L	ER317, ER317L
317L	E309L, E309Mo	ER309L	E317L	ER317L
321	E309Cb	ER309L	E347	ER321
347	E309Cb	ER309L	E347	ER347
348	—	ER348, ER309L	—	ER348
Chromium stainless steel				
405, 429, and 430	ENiCrFe-2 or -3[a] E309[a] E310[a] E430[b]	ERNiCrFe-5 or -6[a,c] ER309[a] ER310[a] ER430[b]	ENiCrFe-2 or -3[a] E309[a] E310[a] E430[b]	ERNiCrFe-5 or -6[a,c] ER309[a] ER310[a] ER430[b]
410 and 410S	ENiCrFe-2 or -3[a] E309[a] E310[a] E430[b]	ERNiCrFe-5 or -6[a,c] ER309[a] ER310[a] ER430[b]	ERNiCrFe-2 or -3[a] E309[a] E310[a] E410[b], E410NiMo[b], E430[b],	ERNiCrFe-5 or -6[a,c] ER309[a] ER310[a] ER410[b], ER410NiMo[b], ER430[b],
Nickel alloys				
Nickel	ENi-1	ERNi-1	ENi-1	ERNi-1
Nickel-copper	ENiCu-7	ERNiCu-7	ENiCu-7	ERNiCu-7
Nickel-chromium-iron	ENiCrFe-1, 2, or 3	ERNiCrFe-5	ENiCrFe-1 or 3	ERNiCrFe-5
Copper alloys				
Copper	ENiCu-7 ECuA1-A2 ENi-1	ERNiCu-7 ERCuA1-A2 ERNi-1		ERCu
Copper-nickel	ENiCu-7	ERNiCu-7 ERNi-1	ECuNi	ERCuNi
Copper-aluminum	ECuA1-A2	ERCuA1-A2	ECuA1-A2	ERCuA1-A2
Copper-silicon	ECuSi	ERCuSi-A	ECuSi	ERCuSi-A
Copper-zinc	ECuA1-A2	ERCuA1-A2 RBCuZn-C[d]	ECuA1-A2	ERCuA1-A2 RBCuZn-C[d]
Copper-tin-zinc	ECuSn-A	ERCuSn-A	ECuSn-A	ERCuSn-A

a. Welding on material colder than 50° F is not recommended.
b. Preheat of 300° F min is recommended, particularly with plate over 0.5 in. thick.
c. ERNiCrFe-6 weld metal is age-hardenable. Consult the supplier.
d. Deposited by oxyacetylene welding.

نکات مهم در اجرای جوشکاری

بطور کلی برای انجام اتصال دو مدل کاری وجود دارد:

۱- استفاده از تسمه کمکی از جنس روکش

استفاده از این روش بیشتر برای اتصالاتی استفاده می شود که هیچ گونه اختلاطی با فولاد نمی توانند داشته باشند مانند اتصال تیتانیوم به فولاد. در این موارد پرکننده ها از جنس هر دو فلز پایه می باشند. در این اتصالات معمولا هزینه تمام شده اتصال بالا خواهد بود.

۲- استفاده از لایه نشانی که در اتصالاتی استفاده می شود که مقدار کمی رقت را می توانند تحمل کنند. در این موارد:

۱- محاسبه مقدار رقت

۲- نوع روش جوشکاری

۳- جنس، قطر و قطبیت الکترودها

٤- طرح اتصال

چند نکته در روش لایه نشانی

۱- برای حداقل شدن میزان رقت نکات زیر رعایت شود:

-- استفاده از کوچکترین قطر الکترود ممکن

-- استفاده از الکترودهای پرآلیاژتر از روکش تا رقت صورت گرفته را جبران کند

-- استفاده از چند بار لایه نشانی تا رقت به اندازه کافی صورت پذیرد. در صورت محدود بودن فضای اتصال، می توان بعد از هر بار لایه نشانی بیش از نصف لایه را سنگ زد تا فضای کافی برای کنترل رقت فراهم آید.

-- از جریان DCEN استفاده شود تا میزان رقت الکترود کمتر گردد.

-- دقت شود تا برای کاهش میزان رقت فلز جوش قوس بر روی لایه قبلی متمرکز شود.

۲- جوشکاری فولاد را با الکترودهای قلیایی باید انجام دهیم تا حتی در اثر کاتد شدن فولاد تردی هیدروژنی به سرعت به وقوع نپیوندد.

۳- لایه برداری فولاد را باید با الکترود کربنی و سنگ زنی انجام داد و حتما بقایای لایه برداری قبل از ایجاد لایه جدید حذف گردد.

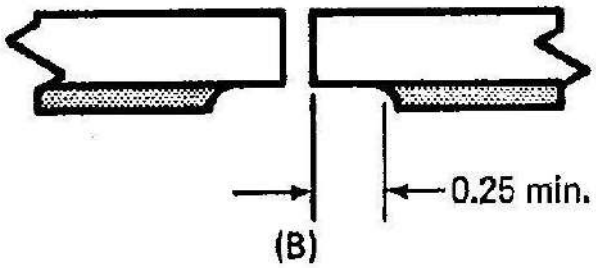
فولاد روکش شده با مس

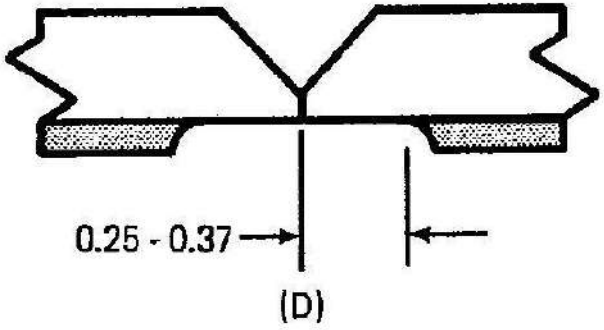
در جوشکاری این فولاد باید مقداری از اتصال قبل از جوشکاری برداشته شود و سپس توسط روش قوس دستی جوشکاری با الکترود قطر ۱/٦ میلی متر صورت پذیرد. حداقل پیش گرم قطعه ۱۵۰ درجه سانتیگراد به بالا می باشد. استفاده از پر کننده های نیکلی یا نیکل مس بهترین گزینه می باشد البته اگر ضخامت روکش از ۲ میلی متر کمتر بود جوشکاری مستقیما از روی خود فولاد شروع می شود. تمرکز قوس باید بر روی حوضچه بوده و از روش میگ نیمه اتوماتیک با تکنیک پس دستی استفاده شود. در این حالت رقت آهن ۵٪ در پاس اول خواهد بود.

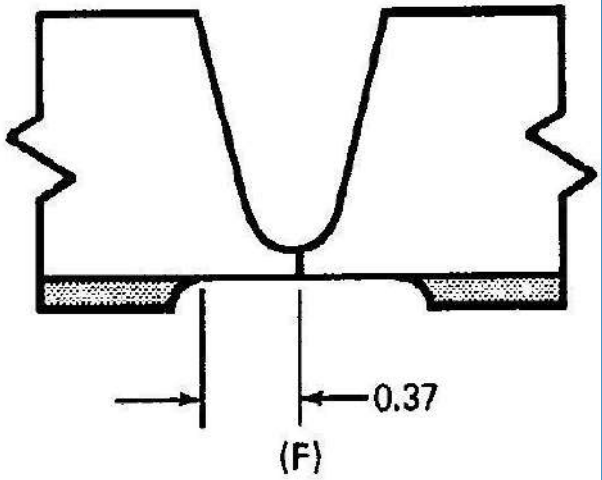
فولاد روکش شده با نیکل

به راحتی و بصورت مستقیم یا چند لایه، لایه نشانی با فیلر از جنس فلز پایه (نیکل-مس یا نیکل)به فولاد می توان جوشکاری نمود.

فولاد روکش شده با تیتانیوم



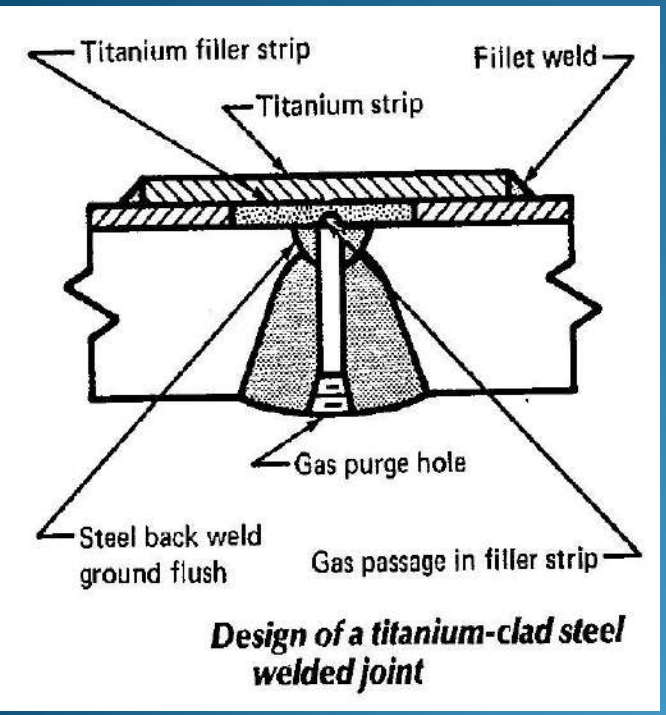




فولادهای روکش شده با تیتانیوم را به هیچ عنوان نمی توان لایه نشانی نمود حتی برای جوشکاری نیز باید از طرح اتصالاتی شبیه به زیر استفاده کرد تا اختلاطی صورت نپذیرد.

در ادامه چند مورد رویه جوشکاری مشخص شده است

اتصال لب به لب



Design of a titanium-clad steel welded joint

۱- ابتدا فولاد را جوشکاری نموده

۲- از پشت لایه برداری کرده و مجددا از پشت جوش می دهیم.

۳- فولاد را سنگ زده تا سطح پشتی فولاد کاملا صاف شود.

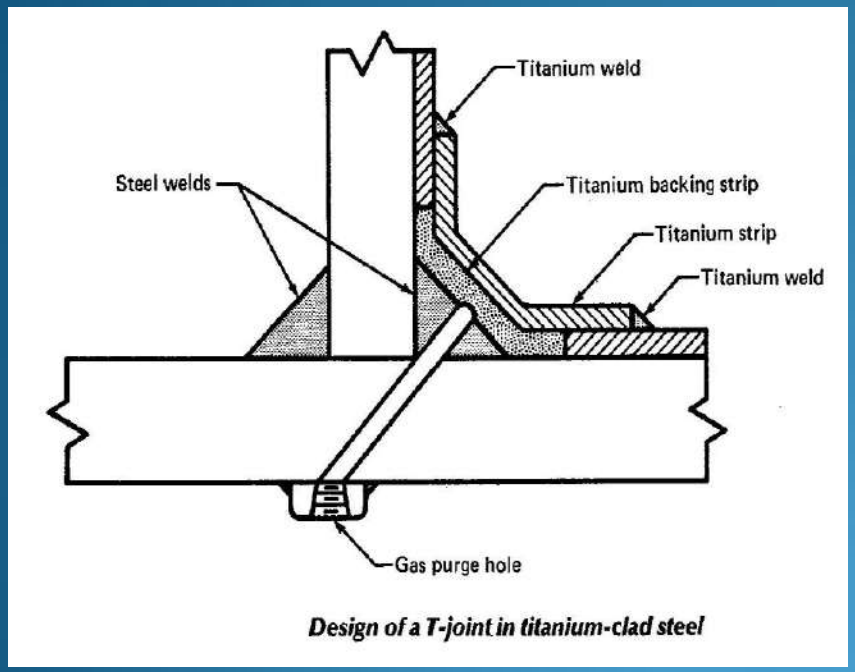
٤- تسمه پر کننده را در فضای خالی پشت انداخته و با چند تک خال به فواصل ۱۰ تا ۱۵سانتی متری فیکس می کنیم. تک خال را با دستگاه تیگ می زنیم.

٥- یک سوراخ به قطر حدودا ٦ الی ۷ میلی متر در جوش فولاد ایجاد کرده.

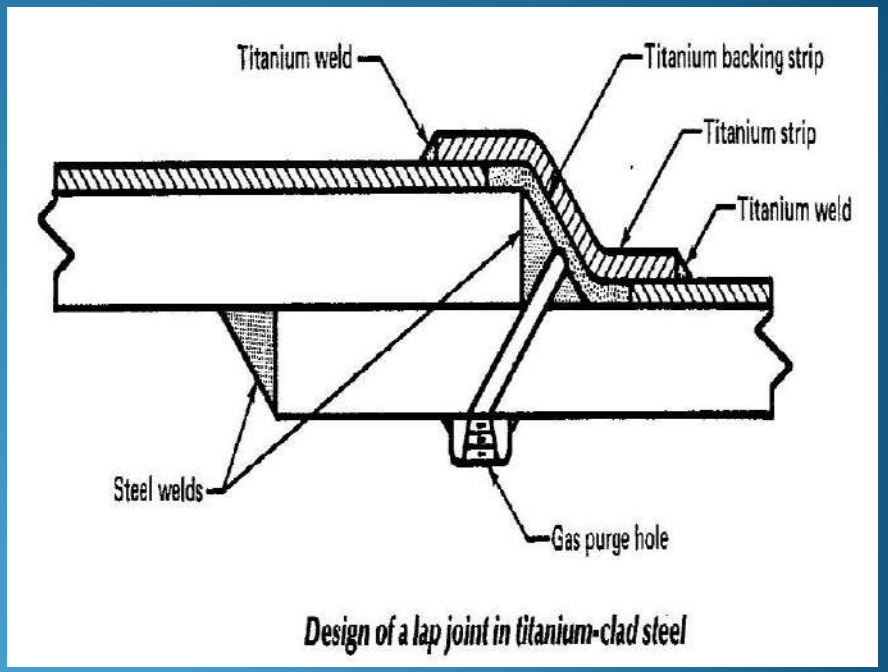
٦- عملیات اعمال گاز خنثی را به عنوان ایزوله کاری فضای خالی پشت اتصال اصلی استفاده می کنیم . از این سوراخ می توان به عنوان محل تست نشتی نیز استفاده کرد.

٧- تسمه پشتی را بر روی تسمه پرکننده قرار داده و بصورت لب روی هم با فیلر تیتانیومی جوشکاری می کنیم.

اتصال لب روی هم وسپری

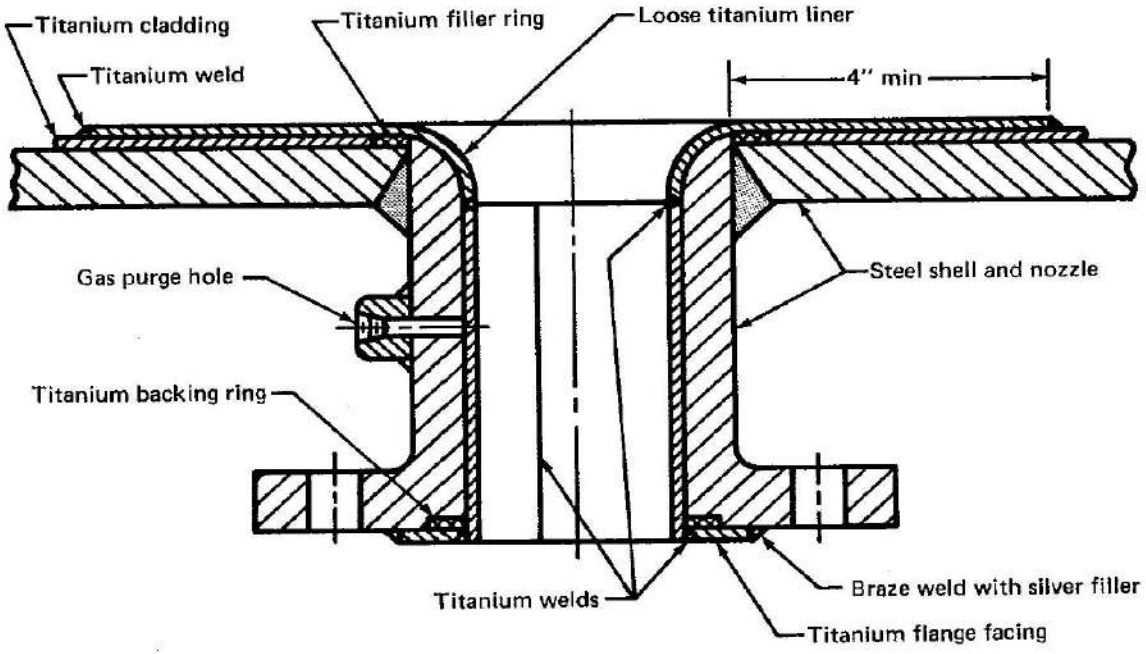


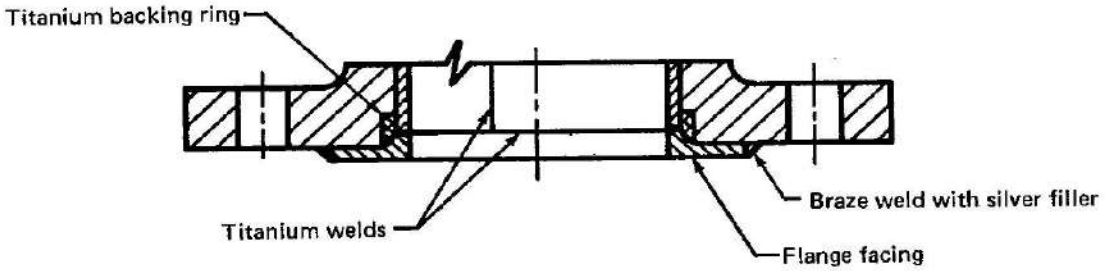
Design of a T-joint in titanium-clad steel



Design of a lap joint in titanium-clad steel

اتصال نازل به بدنه مخزن





Typical nozzle design for titanium-clad steel vessels