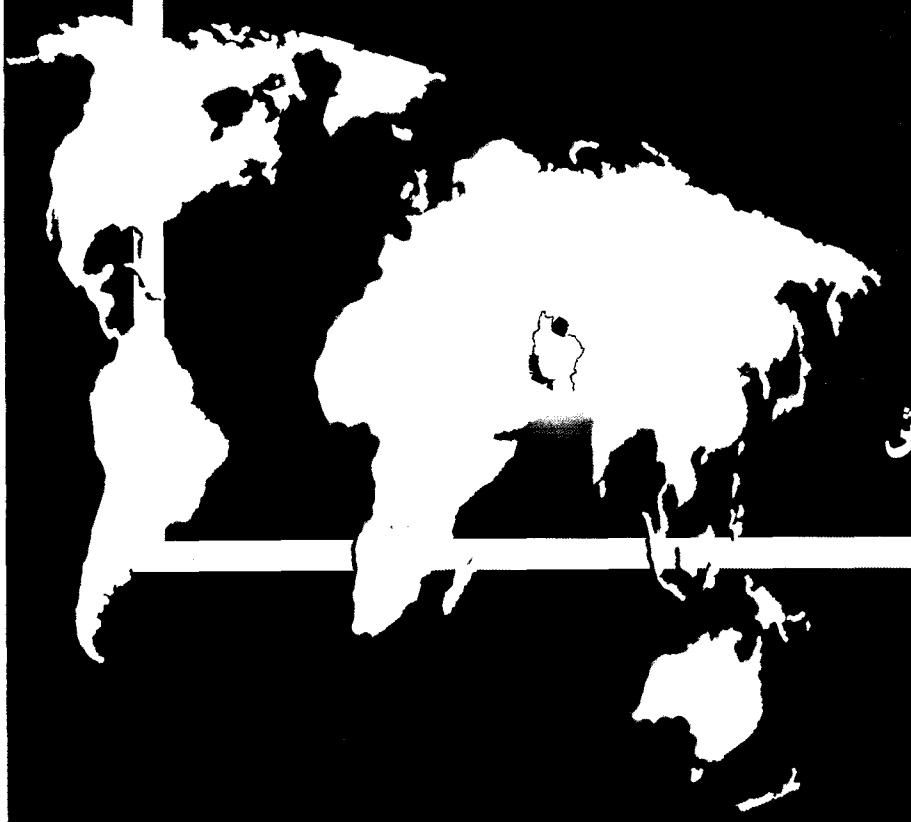
مرکز پژوهش و مهندسی جوش ایران

تابع سازمان گسترش و نوسازی صنایع ایران

مجموعه ۲: مواد و رفتار آنها در حین جوشکاری

جوشکاری فلزات غیر متشابه



مجموعه منابع تخصصی مهندسی جوش

مجموعه منابع تخصصی مهندسی جوش

مرکز پژوهش و مهندسی جوش ایران

- **مجموعه ۲ : مواد و رفتار آن‌ها در حین جوشکاری**
- **جلد ۲۵ : جوشکاری فلزات غیر متشابه**

حق چاپ و تکثیر برای مرکز پژوهش و مهندسی جوش ایران محفوظ می باشد.

000042

مجموعه منابع تخصصی مهندسی جوش

مرکز پژوهش و مهندسی جوش ایران

کمیته راهبری و نظارت :

عباس زارعی هنزکی

فریبا نصرتی

امید گل محله

محمود پارسا

کورش قدر قدر جهرمی

گروه تدوین و گردآوری :

مسعود وطن آرا

محمدرضا وطن آرا

میثم حق شناس

گروه بازخوانی علمی :

رامز وقار

عباس زارعی هنزکی

پیش‌گفتار

جوشکاری یکی از مهمترین فرایندهای ساخت و تولید در صنعت می‌باشد و در صنایع مختلف نظیر خودرو سازی، نفت و گاز، پتروشیمی، تأسیسات و ساختمان و پل‌ها، حمل و نقل، کشتی سازی، صنایع ریلی، نیروگاه‌ها، صنایع دفاعی و هوا و فضا، محصولات پزشکی، الکترونیکی و تجهیزات دقیق و... کاربردهای فراوانی دارد. کشور ایران در حال پیمودن مسیر توسعه صنعتی بوده و ازین رو صنعت جوش برای کشور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین آموزش منسجم و هماهنگ با جهان در این صنعت، یکی از نیازهای مهم کشور تلقی می‌گردد.

در طول جنگ جهانی دوم و پس از آن، نظر به افزایش حجم تولیدات و به تبع آن افزایش حجم جوشکاری به عنوان یکی از اصلی‌ترین روش‌های ساخت، با بروز مشکلات متعدد در این زمینه، هر یک از کشورهای صنعتی در کشورهای خود، اقدام به ساماندهی صنعت جوش و برش نمودند که این امر از طریق استاندارد سازی فعالیت‌های جوشکاری صورت گرفت. با توجه به تعدد استانداردها و مشکلات ناشی از آن و نیز روند جهانی شدن بازارها، کشورهای صنعتی اروپایی اقدام به تاسیس مرکزی متشکل از نمایندگان کشورهای خود به عنوان فدراسیون جوش اروپا(EWF)[1] نمودند. بعدها با حضور نمایندگان کشورهای صنعتی نظیر آمریکا و ژاپن و به‌دنبال آن کشورهای در حال توسعه، سازمان جدیدی تحت عنوان انستیتو بین‌المللی جوش(IIW)[2] تاسیس گردید. در حال حاضر انستیتو بین‌المللی جوش در تمام کشورهای عضو از جمله ایران دارای نماینده‌ای می‌باشد. این نماینده علاوه بر وظیفهٔ انتقال مشکلات صنعت جوش و برش در کشور خود، جهت بحث و بررسی و ارائه راه حل و نیز انتقال دانش روز جهان و استانداردهای جدید، وظیفه فراهم سازی امکان بهره‌گیری از سیستم آموزش و تایید کیفی هماهنگ IIW را در کشور خود بر عهده دارد.

مرکز پژوهش و مهندسی جوش ایران(IWREC)، وابسته به سازمان گسترش و نوسازی صنایع ایران در سال ۱۳۷۱ با هدف انجام فعالیت‌های پژوهشی و ارائه خدمات علمی، فنی و مهندسی، مشاوره و آموزش در زمینه‌های جوشکاری، بازرسی و کنترل کیفیت تاسیس گردیده است. این مرکز با اخذ نمایندگی انستیتو بین‌المللی جوش(IIW) و فدراسیون جوش اروپا(EWF) و همچنین به عنوان مرجع ملی اعطای مجوز و اعتبار(ANB)[3] در ایران و اولین مرکز آموزش معتبر بین المللی

۱-European Welding Federation

۲-International Institute of Welding

۳-Authorized National Body

جوش در سطح کشور(ATB)[1] ، اقدام به چاپ مجموعه کتابهای آموزش تخصصی جوش و برش در سطح مهندسی بین‌المللی جوش(IWE)[2] نموده‌است.

گردآوری و تالیف این مجموعه کتابها بر اساس راهنمای انستیتو بین‌المللی جوش، در خصوص آموزش‌های هماهنگ جهانی، تحت عنوان ۲۰۰۵ Rev.۲/Copyright ۴۰۹_EWF/۲۰۰۰_۰۰۲_Doc.IAB، بوده است و تلاش شده است تا استاندارد آموزشی انستیتو بین‌المللی جوش بر مبنای داشتن خصوصیات زیر در آنها تحقق یابد: ۱- جامع بودن و در برگرفتن تمامی فعالیتهای صنعت جوش و برش ۲- بر مبنای نظام آموزش هماهنگ جهانی ۳- بهره‌وری بالای آموزش ۴- قابلیت ارزیابی منسجم و هماهنگ.

کتاب حاضر بر اساس مفاد جزوهٔ ۲۵_ ۲ در راهنمای۲ Rev.۴۰۹ _ ۲۰۰۰/EWF _ ۰۰۲ _ Doc.IAB انستیتو بین‌المللی جوش، در خصوص **جوشکاری فلزات غیر متشابه** ، تدوین شده است. همچنین مطالبی فراتر از مفاد جزوهٔ مذکور، جهت تکمیل شدن هر چه بیشتر مبحث، در این کتاب ارائه شده است و به‌عنوان مرجعی جامع و معتبر برای تمامی کسانی‌که در حال گذراندن دوره‌های مختلف جوش می‌باشند، توصیه می‌شود.

بدیهی است پیشنهادات و انتقادات سازندهٔ خوانندگان گرامی، این مرکز را در بهبود هر چه بیشتر این مجموعه یاری خواهد رساند.

۱- Approved Training Body

۲- International Welding Engineer

فهرست مطالب

۱- مقدمه ۱
۲- مقدمات اساسی ۱
۲-۱- فلز جوش ۱
۲-۲- رقت و آلیاژسازی ۲
۲-۳- دماهای ذوب ۵
۲-۴- هدایت حرارتی ۶
۲-۵- انبساط حرارتی ۶
۲-۶- عملیات پیشگرم و پس گرم ۸
۲-۷- موارد دیگر ۸
۲-۷-۱- اثرات مغناطیسی ۸
۲-۷-۲- اثر متقابل فلز جوش- فلز پایه ۹
۲-۷-۳- طرح اتصال ۹
۳- ملاحظات کاری ۹
۳-۱- خواص فیزیکی و مکانیکی ۹
۳-۲- پایداری ریزساختاری ۱۰
۳-۳- مقاومت به خوردگی واکسیداسیون ۱۱
۴- انتخاب فلز پرکننده ۱۲
۴-۱- الزامات ۱۲
۴-۲- معیار انتخاب فلز پر کننده ۱۳
۵- انتخاب فرآیند جوشکاری ۱۴
۶- ترکیبات فلزی غیرهمجنس ویژه ۱۵
۶-۱- جوشکاری فولاد زنگ نزن به فولاد کربنی یا کم آلیاژ ۱۵
۶-۱-۱- مهاجرت کربن ۱۵
۶-۱-۲- فلزات پرکننده از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی ۱۶
۶-۱-۳- فلز پرکننده از جنس آ لیاژ های نیکل ۱۶
۶-۱-۴- ملاحظات سرویس ۱۷
۶-۱-۵- جوشکاری فولاد زنگ نزن آستینتی به فولاد ساده کربنی یا کم آلیاژ ۱۸
۶-۱-۶- جوشکاری فولاد زنگ نزن کروم دار به فولاد ساده کربنی یا کم آلیاژ ۲۳
۶-۲- جوشکاری آلیاژها ی نیکل وکبالت به فولاد ۲۴
۶-۲-۱- آلیاژهای نیکل ۲۴
۶-۲-۲- آلیاژهای کبالت ۲۸
۶-۳- جوشکاری آلیاژهای مس به فولاد ۲۸

۶-۳-۱- مس خالص ۲۹
۶-۳-۲- آلیاژهای مس- نیکل ۲۹
۶-۳-۳- آلومینیم برنز ۳۰
۶-۳-۴- برنج ۳۱
۶-۴- جوشکاری آلیاژهای مس به نیکل ۳۱
۶-۵- جوشکاری آلیاژهای آلومینیم به فولاد ۳۲
۶-۶- جوشکاری آلیاژهای آلومینیم به آلیاژهای مس ۳۴
مراجع ۳۶

Authorized National Body

۱– مقدمه

فلزات غیر همجنس به ترکیباتی اطلاق می گردد که یا ازلحاظ ترکیب شیمیائی متفاوتند (مانند آلومینیم - مس و نیکل) و یا اینکه آلیاژ هایی از یک فلز می باشند که از نظر خصوصیات متالورژیکی متفاوتند (مانند فولاد ساده کربنی وفولاد زنگ نزن). فلزات غیرهمجنس می توانند به صورت فلز پایه، فلز پر کننده ویا فلز جوش باشند.

اغلب ترکیبات فلزات غیرهمجنس می توانند توسط روشهای جوشکاری حالت جامد و فرآیندهای لحیم کاری سخت و نرم (جایی که آلیاژسازی بین فلزات غیر قابل اهمیت باشد) به یکدیگر متصل می شوند. دراین فرآیند ها فقط تفاوت درخواص فیزیکی و مکانیکی فلزات پایه و تأثیرات آنها بر قابلیت سرویس دهی اتصال، باید در نظر گرفته شود. وقتی فلزات غیرهمجنس با فرآیندهای ذوبی اتصال داده می شوند، آلیاژسازی بین فلزات پایه و فلز پرکننده از اهمیت بسزایی برخوردار می شود. بدین سبب که فلز جوش حاصل می تواند خواصی متفاوت نسبت به هریک از فلزات پایه در طول مدت سرویس تحت تنشهای دینامیکی یا استاتیکی ازخود بروز دهد.

اتصال فلزات با ترکیب شیمیایی، خواص فیزیکی ومکانیکی متفاوت باعث پیدایش مشکلات زیادی درطول جوشکاری یا بعد ازآن می گردد. اختلاف می تواند بین دو فلز پایه مختلف یا بین فلزات پایه با فلز پر کننده باشد که در نتیجه ترکیب فلز جوش با تمامی اجزاء تشکیل دهنده‌اش متفاوت خواهد بود. این تفاوت با توجه به طراحی اتصال، فرآیند جوشکاری، فلز پرکننده و دستورالعمل جوشکاری تغییر می کند. در نتیجه این عوامل و همچنین هرگونه عملیات حرارتی فلز جوش باید مشخص گردیده و قبل از تولید به طور صحیح ارزیابی گردد. هدف اصلی از جوشکاری فلزات غیر هم جنس، ایجاد اتصالی است که الزامات شرایط کاری را برآورده کند.

۲– مقدمات اساسی

۲–۱– فلز جوش

در جوشکاری ذوبی اتصالات فلزی غیرهمجنس مهمترین مساله ترکیب شیمیایی و خواص فلز جوش است. ترکیب شیمیایی فلز جوش به ترکیب شیمیایی فلزات پایه، فلز پرکننده (در صورت استفاده) و درجه رقت[1] بستگی دارد. ترکیب فلز جوش به خصوص در جوشهای چند پاسه یکنواخت

۱-Dilution

Authorized National Body

نبوده و شیب ترکیب شیمیایی در فلز جوش مجاور هر یک از فلزات پایه مشاهده می‌شود .ویژگی های انجمادی فلز جوش نیز از درجه رقت و گرادیان ترکیب شیمیایی مجاور هر فلز پایه تاثیر می پذیرد. این خصوصیات با توجه به پدیده ترک گرم در حین انجماد اهمیت پیدا می‌کند.

هنگام طراحی یک اتصال غیر همجنس، مفاهیم اساسی آلیاژسازی، مشخصات متالورژیکی آلیاژ حاصل و خواص فیزیکی و مکانیکی آن می بایست در نظر گرفته شود. اگر دو فلز پایه با یکدیگر یک محلول جامد کامل تشکیل دهند (مانند مس و نیکل)، اتصال آنها به روش ذوبی کاملاً موفقیت آمیز است. از طرفی دیگر اگر دو فلز با یکدیگر محلول جامد کامل تشکیل ندهند، پس از جوشکاری روش ذوبی، عمدتاً فازهای پیچیده و ترکیبات بین فلزی تشکیل می شود که معمولاً ترد می باشند. امکان جوشکاری این فلزات به روش ذوبی به فلز پرکننده و دستورالعمل جوشکاری بستگی دارد که تا چه حد از تشکیل این چنین ترکیبات و فازهای بین فلزی ترد جلوگیری می شود تا اتصالی با کیفیت مطلوب و مناسب کاربرد مورد نظر تشکیل شود.

۲-۲- رقت و آلیاژسازی

در هنگام جوشکاری ذوبی فلزات غیر همجنس و در نتیجه اختلاط فلزات پایه وفلز پرکننده، پس از انجماد، حوضچه جوش شامل یک یا چند فاز خواهد بود. تنها فلزاتی که در حالت جامد در یکدیگر حلالیت دارند یک ساختار همگن و تک فاز ایجاد می کنند (مانند مس و نیکل). در سایر موارد ممکن است ترکیبات بین فلزی مانند $CuAl_2$ یا ترکیب بین نشینی مانند (Fe_3C, TiC) به وجود آید. تعداد، نوع، میزان و نظم متالورژیکی فازها و ترکیبات حاصل شده در اثر اتصال ذوبی، تعیین کننده خواص و سالم بودن اتصال می‌باشد. همچنین انجماد و سرعت سرد شدن، تاثیر قابل توجهی بر ایجاد فازهای موجود و ساختار متالورژیکی فلز جوش دارند.

درجوش فلزات غیر همجنس فلز پر کننده باید گونه ای انتخاب گردد که جوش حاصل ساختاری یکنواخت داشته و از انعطاف پذیری مناسبی برخودار باشد. علاوه بر این فلز پر کننده بایستی بدون آنکه سبب ایجاد ریز ساختار حساس به ترک گردد، رقت ناشی از فلزات پایه را بپذیرد. علاوه برآن ساختار میکروسکوپی فلز جوش باید تحت شرایط اعمال شده کاری مستحکم باشد. استحکام فلز جوش نیز می بایست معادل و یا قوی تر از فلز پایه ضعیف تر باشد.

در فرآیندهای جوشکاری ذوبی تلاطم قابل توجهی در حوضچه جوش مذاب رخ می دهد. این مسئله به جز منطقه باریکی نزدیک به فلز پایه ذوب نشده، اساساً سبب ایجاد فلز جوشی با ترکیب

Authorized National Body

شیمیایی غیر یکنواخت می شود. ناحیه ذوب شده فلز پایه معمولاً در زمانی که فلز پرکننده دارای نقطه ذوب بالاتری نسبت به فلز پایه می باشد، پهن تر است. در جوشکاری چند پاسه ترکیب شیمیایی هر پاس باید به طور نسبی یکنواخت باشد، هرچند اختلاف ترکیب شیمیایی خصوصاً در پاس های ریشه، مهره های مجاور فلزات پایه و پاس های پرکننده قطعی است. ترکیب شیمیایی متوسط کل فلز جوش با در نظرگرفتن دو نکته قابل محاسبه است:

۱- نسبت حجمها ی فلز پایه ذوب شده به حجم کل فلز جوش.

۲- ترکیب شیمیایی فلزات پر کننده وفلز پایه.

میزان درجه رقت براساس ناحیه ای که درسطح مقطع عرضی جوش تشکیل می شود اندازه گیری و قابل بررسی است. در شکل ۱ نشان داده شده است که درجه رقت به وسیله فلزات پایه A و B و در صورت استفاده از فلز پرکننده F چگونه اندازه گیری می شود.

درصد میانگین عناصر ویژه آلیاژی فلز جوش رقیق توسط معادله زیر قابل محاسبه است :

$$X_W = (D_A)(X_A) + D_B(X_B) + (I - D_T)(X_F)$$

که در آن:

X_W: درصد میانگین عنصر X در فلز جوش

X_A:درصد عنصر X درفلز پایه A

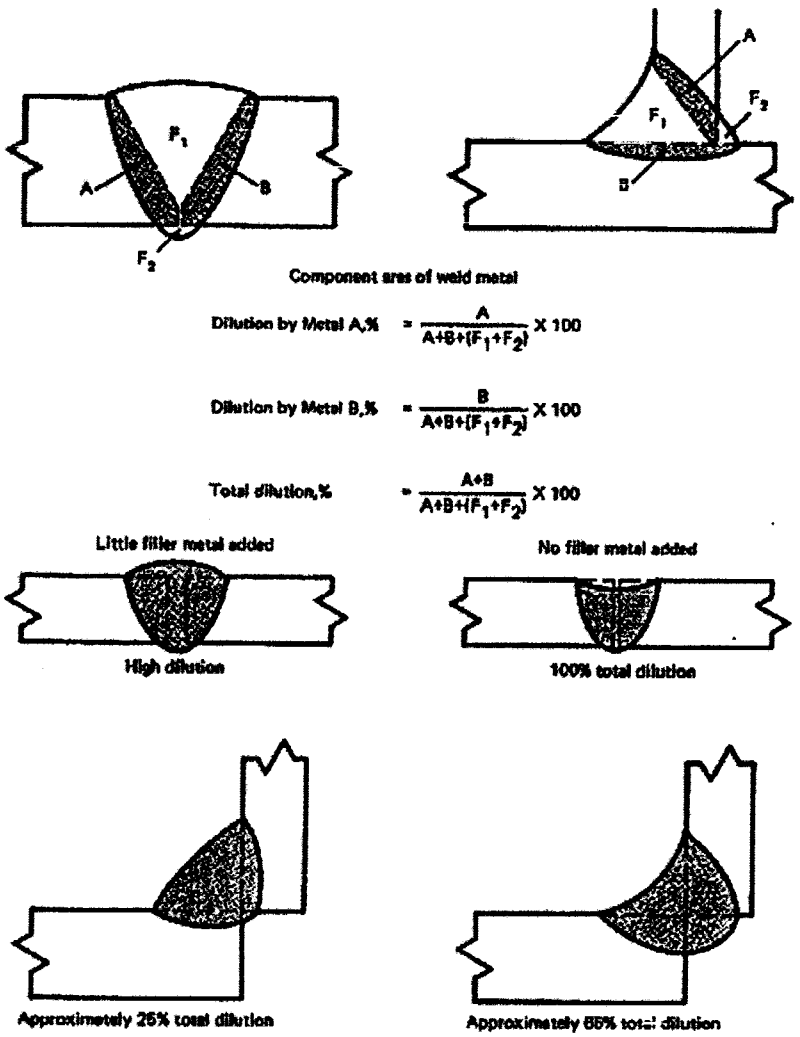
X_B: درصد عنصر X در فلز پایه B

X_F : درصد عنصر X در فلز پر کننده F

D_A :درصد درجه رقت فلز پایه A که به صورت اعشاری بیان می شود .

D_B :درصد رقت فلز پایه B که بصورت اعشاری بیان می شود

D_T : درصد رقت کلی فلزات پایه B,A که بصورت اعشاری بیان می شود



شکل ۱: میزان درجه رقت در یک اتصال غیر همجنس[۱].

به عنوان مثال به منظور محاسبه ترکیب شیمیایی فلز جوش با توجه به درجه رقت اتصال فولاد زنگ نزن آستنیتی۳۱۶ به فولاد کروم مولی ۱Mo- ۲/۲۵Cr با فلز پرکننده‌ای ازجنس نیکل کروم (ERNiCr-۳) در نظر گرفته می شود. ترکیب شیمیایی تقریبی سه آلیاژ در جدول ۱ ارائه شده است. با فرض آنکه در صد کلی درجه رقت ۳۵٪ باشد که ۱۵٪ مربوط به فولاد آلیاژی کروم- مولی و۲۰٪ مربوط به فولاد زنگ نزن ۳۱۶ است، میانگین درصدهای کروم، نیکل و مولیبدن در فلز جوش بصورت زیر محاسبه می شود:

Authorized National Body

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فلز پایه وفلز پر کننده انتخاب شده برای مثال [۱]

Element	Nominal Composition, percent		
	Cr-Mo steel	Type 316 sst	Filler metal
Cr	2.5	17	20
Ni	—	12	72
Mo	1.0	2.5	—
Fe	95.5	63	3

Cr٪=۰/۱۵(۲/۵)+۰/۲۰(۱۷)+۰/۶۵(۲۰) =۱۶/۸

Ni٪=۰/۲۰(۱۲)+۰/۶۵(۷۲)=۴۹/۲

Mo٪=۰/۱۵(۱)+۰/۲۰(۲/۵)=۰/۶۵

۲-۳- دماهای ذوب

اتصال فلزات غیر همجنس با جوشکاری ذوبی نیازمند ذوب هر دو فلز پایه می باشد. اگر فاصله دمای ذوب دو فلز پایه نزدیک به $93^{\circ}C$باشد، فرآیندهای جوشکاری ذوبی و دستورالعمل‌های جوشکاری معمول برای اتصال آنها قابل استفاده است، اما اگر اختلاف زیادی بین دمای ذوب وجود داشته باشد مشکلات جوشکاری کاملاً پیچیده خواهد بود، دراین موارد ممکن است از لحیم کاری سخت و یا روشهای جوشکاری حالت جامد برای اتصال فلزات غیر همجنس استفاده شود. جدول ۲ نشانگر دمای ذوب و دیگر خواص فیزیکی مهم بعضی از فلزات نسبت به فولادهای کربنی ساده می باشد.

جدول۲: مقایسه خواص فیزیکی فلزات مختلف با فولاد ساده کربنی[۱].

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

واضح است جوشکاری آلومینیم به فولاد یا به آلیاژهای نیکل با توجه به این اطلاعات مشکل خواهد بود. تفاوت در دمای ذوب فلزات پایه یا فلز جوش و فلز پایه می تواند سبب ایجاد گسیختگی در فلز پایه ای که دمای ذوب پایین تری دارد شود. انجماد و انقباض فلز با دمای ذوب بالا موجب ایجاد تنشهای کششی در فلز با دمای ذوب کمتر می گردد. از طرفی چون فلز با دمای ذوب کمتر، دیرتر منجمد می گردد، ممکن است تحمل تنشهای ایجاد شده را نداشته و دچار ترک خوردگی شود. این مشکل ممکن است با رسوب یک یا چند لایه از فلز پرکننده‌ای با دمای ذوب متوسط (اختلاف تقریباً $93^{\circ}C$) برروی سطح فلز پایه ای که نقطه ذوب بالاتری دارد، رفع گردد. این روش به نام لایه نشانی[1] شناخته می شود. پس از ایجاد لایه جدید، جوش بین سطح لایه نشانی شده وفلز دیگر انجام می شود.

۲-۴- هدایت حرارتی

بیشتر فلزات و آلیاژها، رساناهای مناسبی برای حرارت می باشند، اما هدایت حرارتی برخی از آنها به مراتب بیشتر از سایر فلزات است. هدایت سریع حرارت حوضچه مذاب، توسط فلز پایه مجاور بر انرژی لازم برای ذوب موضعی فلز پایه تاثیر می گذارد. زمانی که دو فلز پایه غیرهمجنس، با تفاوت هدایت حرارتی قابل توجه به یکدیگر جوش داده می شوند، دستورالعمل جوشکاری باید به گونه ای باشد که این تفاوت در نظر گرفته شود. در اغلب موارد منبع حرارتی جوشکاری را مستقیماً به سمت فلزی که هدایت حرارتی بالاتری دارد نگه می دارند تا تعادل حرارتی بین دو فلز پایه به صورت مناسب حاصل گردد. هدایت حرارتی فلزات تابع دماهای آنها می باشد. هنگام جوشکاری فلزات غیرهمجنس سرعت سرد شدن تاحدودی می تواند با انتخاب پیشگرم مناسب برای فلزاتی که هدایت حرارتی بالاتری دارند، به تعادل برسد اثر ویژه پیشگرم، کاهش حرارت لازم جهت ذوب کردن فلز پایه می باشد.

۲-۵- انبساط حرارتی

خصوصیات انبساط حرارتی دوفلز پایه غیرهمجنس و فلز جوش از اهمیت بالایی برخوردار می باشد. اختلاف زیاد در ضریب انبساط حرارتی فلزات مجاور در طول مدت سرد شدن، موجب ایجاد

۱-Buttering

Authorized National Body

تنش کششی در یک فلز با ضریب انبساط حرارتی بالاتر و ایجاد تنش فشاری در فلز دیگر با ضریب انبساط حرارتی کمتر می شود. در فلزی که تنش کششی اعمال می شود احتمال ایجاد ترک گرم درطول مدت جوشکاری یا ترک سرد پس از جوشکاری وجود دارد که باعث کاهش توان سرویس دهی قطعه می گردد، از این رو تنش زدایی حرارتی یا مکانیکی پس ازجوشکاری به منظور جلوگیری از ترک سرد باید درنظر گرفته شود.

ضریب انبساط حرارتی خطی (α) را می توان بر اساس تغییرات کرنش ($\Delta\varepsilon$) با توجه به تغییرات دما (ΔT) بر اساس رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\alpha = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta T}$$

(α)از ویژگیهای هر عنصر می باشد این رابطه معمولا بصورت زیر بیان می شود.

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L\Delta T}$$

که در اینجا نسبت تغییر طول به طول اولیه($\frac{\Delta L}{L}$) تغییرات کرنش ($\Delta\varepsilon$) را نشان می دهد. تنش ایجاد شده در اثر سرد شدن در منطقه (HAZ) یکی از فلزات پایه از رابطه زیر قابل محاسبه است:

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

که:

E مدول الاستیک فلز و $\Delta\alpha$ اختلاف ضریب انبساط خطی بین دو فلز پایه می باشد.

اختلاف یا عدم تطابق درضریب انبساط حرارتی فلزات در اتصال غیرهمجنس سبب ایجاد تنش در اتصال می گردد. این عامل در اتصالاتی که تحت سیکلهای حرارتی کار می کنند از اهمیت زیادی برخودار است. یک مثال معمول مربوط به اتصال فولادهای زنگ نزن آستنیتی به فولادهای زنگ نزن فریتی در اتصالات لوله های انتقال در نیروگاههای سوخت فسیلی می باشد.

حالت ایده آل آن است که ضریب انبساط حرارتی فلز جوش حد متوسط بین فلزات پایه باشد، به ویژه اگر اختلاف بین ضریب انبساط حرارتی آنها بالا باشد. اگر اختلاف کم باشد فلز جوش ممکن است، ضریب انبساطی معادل بایکی ازفلزات پایه داشته باشد.

میزان رقت فلز جوش رسوب داده شده، می تواند بر ضریب انبساط آن تأثیر داشته باشد. برای مثال رقت نیکل خالص با مس باعث افزایش ضریب انبساط حرارتی شده درصورتی که رقت نیکل با مقادیر اندکی از آهن، کروم و مولیبدن سبب کاهش ضریب انبساط حرارتی می شود.

۲-۶- عملیات پیشگرم و پس گرم

انتخاب عملیات پیشگرم یا پس گرم مناسب می تواند مشکلات اتصالات برخی از فلزات غیر همجنس را رفع کند. جوشکاری آلیاژ یکه نیازمند به پیشگرم، به آلیاژ دیگری که به پیشگرم نیاز ندارد، فقط درصورتی قابل انجام است که بتوان پیشگرم را بصورت مستقل به آلیاژ نیازمند پیشگرم اعمال کرد .

الزام عملیات پس گرم برای اتصالات فلزات غیر همجنس ممکن است اعتراض طراح را همراه داشته باشد. ممکن است عملیات حرارتی مناسب برای یک جزء جوش در شرایط کاری مشخص برای جزء دیگر خطرناک باشد. به عنوان مثال اگر آلیاژ پیر سخت شونده نیکل – کروم به فولاد زنگ نزن پایدار نشده جوشکاری شود، عملیات پیرسختی آلیاژ نیکل کروم، سبب حساس شدن فولاد زنگ نزن آستنیتی وکاهش مقاومت به خوردگی بین دانه ای می شود. راه حل این مسئله آنست که درصورت امکان از فولاد زنگ نزن پایدار شده استفاده گردد. راه حل دیگر لایه نشانی بر روی آلیاژ پیر سخت شونده نیکل – کروم با آلیاژ مشابه که پیر سخت شونده نیست، می باشد. سپس این مجموعه باید تحت عملیات حرارتی مناسب قرار گیرد و در نهایت سطح لایه نشانی شده به فولاد زنگ نزن جوشکاری گردد.

۲-۷- موارد دیگر

۲-۷-۱- اثرات مغناطیسی

میدانهای مغناطیس دائمی یا لحظه ای ناشی از جریان AC وDC یا پرتو الکترونی، موجب ایجاد حوزه های نیروی مغناطیسی می شود که سبب انحراف قوس جوشکاری یا اشعه الکترونی می گردد. نیروی میدان مغناطیسی سبب تغییر در وزش قوس، پرتو الکترونی و نحوه انتقال فلزات می گردد. در حین جوشکاری زمانی که یکی از فلزات فرومغناطیس باشد قوس با جریان DC یا پرتو الکترونی به سمت آن منحرف می شوند و سبب ذوب بیشتر آن فلز و افزایش رقت ناشی از آن شود. ضمن آنکه ممکن است ذوب ناکافی در ریشه جوش به وجود آید. یکی از این موارد مربوط به جوشکاری فولاد ساده کربنی به آلیاژهای پایه نیکل می باشد. قوس یا پرتو الکترونی به سمت قسمت فولادی منحرف می شوند مگر آنکه تمهیدات ویژه ای در نظر گرفته شود تا میدان مغناطیسی خنثی گردد. انحراف مغناطیسی در جریانهای AC وجود ندارد.

Authorized National Body

۲-۷-۲- اثر متقابل فلز جوش- فلز پایه

در سیستمهای آلیاژی ویژه ای نفوذ فلز جوش به مرزهای دانه منطقه متاثر از حرارت (HAZ) می‌تواند رخ دهد که در نتیجه منجر به ایجاد ترک بین دانه ای در منطقه HAZ می گردد. به عنوان مثال فلز جوش غنی از مس مذاب می تواند در هنگام جوشکاری به مرزهای دانه فولاد کربنی نفوذ کند. میزان نفوذ در زمانی که فلز پایه پیشگرم شده است یا زمانی که قطعه تحت تنشهای کششی است و یا هر دو حالت وجود دارد، بیشتر است.

۲-۷-۳- طرح اتصال

هنگام طراحی اتصالات سر به سر درمیان فلزات غیرهمجنس باید به خصوصیات ذوب هرکدام از فلزات پایه و فلز پرکننده و نیز اثرات رقیق شدن توجه شود. افزایش زاویه پخها باعث کاهش رقت، کنترل بهترگرانروی فلزجوش و نیز برقراری بهتر قوس برای نفوذ مطلوب می گردد.

اتصال باید طوری طراحی شود که درجه رقت مناسب را درچند پاس اول (زمانی که جوشکاری از یک سمت انجام می شود) تامین کند. درجه رقت نامطلوب سبب ایجاد چند لایه متفاوت درفلز جوش شده و می تواند باعث افت خواص مکانیکی فلز جوش درحین سرویس کاری خصوصاً تحت شرایط بارگذاری تبادلی گردد. هنگام جوشکاری از دو طرف، جهت کنترل درجه رقت در پاس اول جوش طرف دوم، ابتدا باید از عملیات رویه برداری استفاده کرد.

۳- ملاحظات کاری

۳-۱- خواص فیزیکی و مکانیکی

اتصالات فلزات غیرهمجنس طبعاً شامل فلز جوشی است که دارای ترکیبی متفاوت با فلزات پایه می باشد. خواص جوش به ترکیب شیمیایی فلز پرکننده، دستورالعمل جوشکاری و نسبت رقت هر یک از فلزات پایه بستگی دارد. همچنین دو محدوده HAZ متفاوت درکنار هرکدام از فلزات پایه تشکیل خواهد شد. خواص مکانیکی جوش به علاوه مناطق HAZ هر دو فلز پایه برای شرایط کاری اتخاذ شده باید مورد توجه قرارگیرند.

Authorized National Body

عمدتاً توجه ویژه ای به اتصالات فلزات غیر همجنس تحت شرایط کاری با دمای بالا می شود. شرایط مطلوب هنگامی به وجود می آیدکه اتصال در دمای ثابتی کار کند. در شرایط کاری دمای بالا، تنشهای درونی می توانند با آزادسازی و رسیدن به تعادل کاهش پیدا کنند.

زمانی که نوسانات دمایی زیاد، در شرایط سرویس غیر قابل اجتناب است، بهتر است فلزات پایه ای انتخاب شوند که ضرائب انبساط حرارتی مشابهی دارند. اگر در عمل چنین راه حلی امکان نداشت، می توان از فلز سومی بین دو فلز پایه استفاده کرد. فلز سوم باید ضریب انبساط حرارتی بین دو فلز پایه داشته باشد. حتی می توان به جای استفاده از فلز سوم از فلز پرکننده ای که خاصیت فوق را داشته باشد استفاده کرد. در صورت امکان اتصال غیرهمجنس باید در شرایط تنشی کوچک قرار گیرند، زیرا تنشهای بالا می تواند بر روی تنشهای حرارتی ایجاد شده تأثیر مضاعف داشته باشد. زمانی که اتصال غیر هم جنس در شرایط سیکل دمایی کار می کند، خواص مناطق مختلف اتصال جوش داده شده که از نظر متالورژیکی تفاوت دارد، بسیار مهم است. بعضی از این خواص عبارتند از ضریب انبساط حرارتی، مدول الاستیک، استحکام تسلیم و مشخصات گسترش ترک. در این حالت خواص متفاوت فلزات پایه و فلز جوش می تواند سبب تولید تنش های نوسانی در مناطق متاثر از حرارت و مجاور فلز جوش شود. این تنشها موجب ایجاد خستگی فلز می شود که سبب توسعه ترکها و تخریب اتصال خواهد شد.

از آنجا که خواص گوناگون فلز با دما تغییر می یابد پیش بینی کردن رفتار اتصال غیرهمجنس فلز جوش در شرایط کاربردی با محاسبات ریاضی مشکل است. در این شرایط فقط آزمایشات تجربی می تواند بیانگر عمر اتصالات غیر همجنس باشد.

۳-۲- پایداری ریزساختاری

در جوشکاری احتمال تشکیل شیب غلظتی(شیب ترکیب شیمیایی) در فلز جوش به ویژه در مناطق مجاور فلز پایه وجود دارد. بعلاوه عملیات در دمای بالا می تواند سبب نفوذ درونی بین فلز جوش و فلز پایه شود که باعث تغییرات ریز ساختاری می گردد. اتصال دو فلز غیرهمجنس سبب تغییر غلظت اتمی و تغییر خواص درسرتاسر عرض جوش می شود. این تغییر خواص می تواند با گرادیان پتانسیل شیمیایی که در نتیجه آن نفوذ اتمی همراه یا بر خلاف گرادیان غلظتی در آلیاژهای چند جزیی رخ می دهد، تفسیر گردد. حرکت اتمها در مدت زمان مشخص در دماهای بالای

Authorized National Body

سرویس دهی، ترکیب شیمیایی را به طور جزیی تغییر می دهد و موجب تغییرات خواص فیزیکی و مکانیکی می گردد.

اتصال ایجاد شده در جوش غیر همجنس بین فولاد کم آلیاژ و فولاد زنگ نزن آستنیتی، با فلز پرکننده فولاد زنگ نزن آستنیتی می تواند مثالی از این مشکل باشد. مقدار کربن در فولاد کم آلیاژی معمولاً بیشتر از کربن فلز جوش (فولاد زنگ نزن آستنیتی) می باشد. درصد زیاد عناصر کاربیدزا مانند کروم در فولاد زنگ نزن و تمایل آنها به کاهش فعالیت شیمیایی کربن موجب ایجاد گرادیان پتانسیل شیمیایی برای نفوذ کربن از فولاد کم آلیاژ به فلز جوش فولاد زنگ نزن می‌شود. این پدیده ممکن است در حین عملیات حرارتی یا در شرایط کاری دمای بالا رخ دهد. در نتیجه این پدیده، کربن زدایی وگاهی اوقات رشد دانه در منطقه متاثر از حرارت (HAZ) فولاد کم آلیاژ رخ می دهد که منجر به کاهش خواص مکانیکی آن می شود. به طور مشابه فلز جوش فولاد زنگ نزن مجاورکربوره شده وکاربیدهای پیچیده ای شکل می گیرد. افزیش تدریجی کاربیدها اساساً با افزایش قابل ملاحظه سختی فلز جوش در این ناحیه و افزایش احتمال ترک همراه می باشد.

۳-۳- مقاومت به خوردگی واکسیداسیون

فلز جوش و فلزات پایه رفتار خوردگی مشخصی دارند که باید توسط طراح در انتخاب اولیه مواد مورد بررسی قرارگیرد. برای مثال، حساس شدن فولاد های زنگ نزن آستنیتی که منجر به تسریع خوردگی در محیط های مشخص می شود، موضوعی است که در جوشکاری این فولادها باید در نظرگرفته شود. به ویژه زمانی که فلز پرکننده مورد استفاده نیز از فولادهای زنگ نزن آستنیتی باشد.

در جوشکاری فلزات غیر همجنس پیل های گالوانیک تشکیل شده ناشی از اختلاف ترکیب شیمیایی، می تواند باعث خوردگی اغلب فلزات یا فازهای آندی اتصال شود. همچنین فلز جوش نیز از فازهای ریزساختاری مختلف تشکیل شده و بسیاری از پیلهای موضعی بین این فازها می تواند باعث خوردگی گالوانیک در سطح ریزساختاری شود.

اگر در مجاورت فولاد با استحکام بالا پیل گالوانیک به گونه ای تشکیل شود که فولاد کاتد پیل باشد، خطر افزایش تردی هیدروژنی در منطقه متاثر از حرارت فولاد با استحکام بالا به وجود می آید. تردی هیدروژنی در محدوده دمایی ۴۰- تا $95^{\circ}C$ و زمانی که جوش تحت شرایط تنش بالا قرار دارد از اهمیت ویژه ای برخوردار است. معمولاً تنش های پسماند توسعه یافته در منطقه جوش جهت ترغیب تردی هیدروژنی و خوردگی تنشی کافیست.

Authorized National Body

اختلاف ترکیب شیمیایی نیز در جوش اتصالات غیرهمجنس می تواند سبب ایجاد مشکلات خوردگی در دمای بالا شود. تغییرات ترکیب شیمیایی در فصل مشترک بین فلزات مختلف در شرایط دمایی بالا و در هوا می تواند سبب اکسیداسیون انتخابی و تشکیل شیارهایی در این مکانها گردد. شیارها باعث افزایش تمرکز تنش در اتصال شده و می تواند سبب تخریب اکسیداسیون تحت تنش در امتداد فصل مشترک جوش تحت شرایط سیکلهای حرارتی گردد.

۴- انتخاب فلز پرکننده

۴-۱- الزامات

انتخاب فلز پر کننده مناسب عامل بسیار مهمی در ایجاد اتصال فلزات غیر همجنس برای کارایی مناسب در شرایط سرویس می باشد. در جوشکاری فلزات غیر همجنس کاهش واکنشهای متالورژیکی ناخواسته بین فلزات از اهمیت ویژه ای برخوردار است. فلز پر کننده باید سازگار با هر دو فلز پایه بوده و با حداقل ایجاد رقت رسوب داده شود. به طور ایده آل فلز پرکننده ای که اتصال جوش داده شده را برقرار می کند باید دارای مشخصات زیر باشد:

۱) بی عیب بودن[۱]

فلز پرکننده تا حدی باید قابلیت رقیق شدن با فلزات پایه را داشته باشد که احتمال ایجاد جوش حساس به ترک وجود نداشته باشد. همچنین استفاده از آن نباید باعث ایجاد عیوبی از قبیل حفره یا آخال در فلز جوش شود.

۲) پایداری ساختاری

فلز جوش ایجاد شده می بایست در شرایط کاری طراحی شده، از نظر ساختاری پایدار باشد.

۳) خواص فیزیکی

خواص فیزیکی فلز جوش باید سازگار با فلزات پایه باشد. ضرایب انبساط حرارتی به ویژه با توجه به ایجاد تنشهای درونی در مدت اعمال سیکل حرارتی در شرایط کاری ازاهمیت زیادی برخوردار

۱- Soundness

می باشند. ضریب انبساط حرارتی فلز جوش باید مشابه ضرایب انبساط حرارتی فلزات پایه باشد. در شرایطی که الزامات طراحی تعیین کند، توجه مشابهی نیز باید به هدایت حرارتی و الکتریکی شود.

۴) خواص مکانیکی

فلز جوش تحت شرایط کاری باید حداقل دارای استحکام و انعطاف پذیری فلز پایه ضعیف تر باشد.

۵) خواص خوردگی

جهت جلوگیری از خوردگی ترجیهی فلز جوش مقاومت به خوردگی فلز جوش باید یکسان یا بیش از مقاومت به خوردگی هر دو فلز پایه باشد.

۴-۲- معیار انتخاب فلز پر کننده

دو معیار مهم که باید در انتخاب صحیح فلز پرکننده برای جوشکاری در نظر گرفته شود عبارتند از:

۱- فلز پرکننده انتخاب شده باید الزامات طراحی اتصال از قبیل خواص مکانیکی یا مقاومت در برابر خوردگی را برآورده کند.

۲- فلز پرکننده انتخاب شده باید معیار جوش پذیری را با توجه به میزان رقت، دمای ذوب و دیگر الزامات خواص فیزیکی جوش برآورده کند.

علاوه بر موارد بالا موارد پیشنهادی زیر نیز باید در نظر گرفته شود:

۱- زمانی که تفاوت بین نقاط ذوب فلزات پایه زیاد است، توصیه می شود فلز پرکننده با توجه به فلز پایه با نقطه ذوب کمتر انتخاب گردد. در هنگام جوشکاری، فلز پرکننده مناسب به طور رضایتبخش به فلز پایه نفوذ می کند. همچنین می تواند سطح قسمت دیگر را همانند فرآیند جوش برنج [۱]تر کرده و پیوند برقرار کند. اگر از یک فلز پرکننده با نقطه ذوب بالا استفاده شود، رقت ناشی از فلز پایه با نقطه ذوب کمتر بیش از حد خواهد بود.

۱-Braze Welding

۲- فلز پر کننده می بایست دارای انعطاف پذیری کافی جهت تحمل تنشهای حرارتی که در اثر اختلاف در ضریب انبساط حرارتی فلزات پایه ایجاد می شود را داشته باشد. به طور مثال برخی از فلزات پرکننده آلیاژهای پایه نیکل بسیار انعطاف پذیر بوده و می توانند رقت ناشی از فلز پایه را تحمل کرده و بدون کاهش قابل توجه خواص مکانیکی فلزات پایه، سبب جلوگیری از ترک خوردن اتصال گردند.

۳- فلز پر کننده باید دارای حداقل عناصر ناخالصی (کربن، اکسیژن، هیدروژن و نیتروژن) باشد، زیرا چنین آلیاژهایی نسبت به فلزات پرکننده حاوی مقادیر زیاد عناصر ناخالصی، علاوه بر انعطاف پذیری بیشتر نسبت به ترک گرم حساسیت کمتری دارند.

۵- انتخاب فرآیند جوشکاری

انتخاب فرآیند جوشکاری جهت اتصال فلزات غیر همجنس همچون انتخاب صحیح فلز پرکننده از اهمیت زیادی برخوردار است. عمق نفوذ در فلزات پایه و درجه رقت ناشی از آن با توجه به فرآیند و تکنیکهای مختلف جوشکاری متغیر می باشد.

به عنوان مثال در روش جوشکاری قوس الکترود دستی معمولاً میزان رقت ناشی از فلز پایه تا حدود ۳۰٪ می رسد. میزان رقت را می توان با تنظیم تکنیک جوشکاری اصلاح کرد. به عنوان مثال می توان الکترود را به گونه ای نگه داشت که قوس بر روی فلز جوش از پیش رسوب داده شده متمرکز گردد. با این روش می توان درجه رقت را به ۲۵٪ رساند. اگر رقت ناشی از یک طرف اتصال مشکل کمتری نسبت به طرف دیگر داشته باشد، می توان جهت قوس را به سمت آن فلز قرار داد. این تکنیک برای فرآیند GTAW نیز قابل استفاده است.

میزان رقت در فرآیند GMAW می تواند در محدوده ۱۰ تا ۵۰٪ که بستگی به نوع انتقال فلز و چگونگی نگهداری مشعل دارد.

انتقال فلز مذاب به صورت اسپری میزان رقت بالاتر وانتقال مذاب به صورت اتصال کوتاه همراه با حداقل درجه رقت می باشد. نفوذ در جوشکاری قوس زیر پودری با توجه به قطبیت می تواند بیشتر باشدکه در نتیجه عامل افزایش درجه رقت خواهد شد.

جوشکاری باریک (با نسبت عمق به عرض زیاد) می تواند با جوشکاری پرتو الکترونی و لیزر حاصل گردد، با استفاده از اشعه پردانسیته می توان جوشهایی ایجاد کرد که میزان حداقل فلز پایه

Authorized National Body

ذوب گردد. اگر در این فرآیندها نیاز به فلز پرکننده باشد، می توان ازیک ورق به عنوان لایه واسط با ضخامت مناسب یا از یک سیستم تغذیه سیم کمکی استفاده کرد.

صرف نظر از نوع فرآیند می توان به تاثیر پذیری درجه رقت از طرح اتصال و قرارگیری فلزات پایه نسبت به یکدیگر اشاره کرد.

۶- ترکیبات فلزی غیرهمجنس ویژه

۶-۱- جوشکاری فولاد زنگ نزن به فولاد کربنی یا کم آلیاژ

اتصال فولادهای زنگ نزن آستنیتی، فریتی یا مارتنزیتی به فولاد کربنی یا کم آلیاژ با استفاده از فلز پرکننده ای که بتواند رقت ناشی از فلزات پایه را بدون تشکیل عیوب در اتصال تحمل کند، توسط روشهای ذوبی به سادگی امکان پذیر است. معمولاً از یک فلز پرکننده فولاد زنگ نزن آستنیتی یا آلیاژهای نیکل بسته به کاربرد و شرایط سرویس به عنوان فلز پرکننده استفاده می‌شود.

۶-۱-۱- مهاجرت کربن

کروم در فولاد میل ترکیبی بیشتری برای واکنش با کربن نسبت به آهن دارد. زمانی که فولاد کم آلیاژ یا کربنی با فلز پرکننده ای شامل مقادیر زیاد کروم جوشکاری شود ، در دماهای بالاتر از ۴۳۰°C کربن از فلز پایه به فلز جوش نفوذ می کند. سرعت نفوذ تابع دما و مدت زمان نگهداری در دماهای بالاتر از ۵۹۵°C بوده و با آن افزایش می یابد. مهاجرت کربن می تواند در حین عملیات پس گرم یا شرایط کاری با دمای بالا رخ دهد.

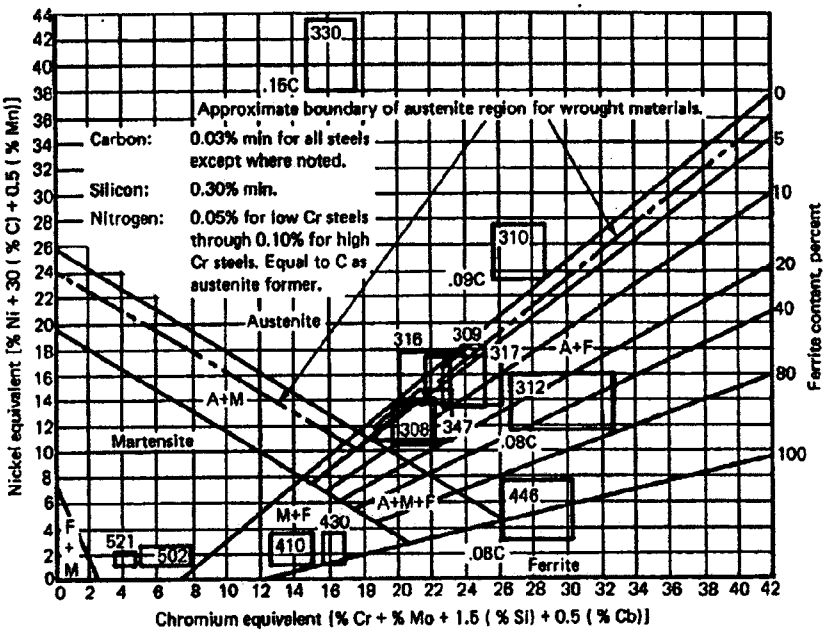
فولاد آستنیتی نسبت به فولاد فریتی حلالیت بالاتری نسبت به کربن دارد. بنابراین زمانی که از فلز پرکننده فولاد زنگ نزن آستنیتی استفاده می شود، نسبت به فلز پرکننده فریتی، تهی شدن کربن در فولاد کربنی یا کم آلیاژ بیشتر است. در عین حال در صورت استفاده از فلز پرکننده نیکل-کروم-آهن مانند ENiCrFe-۲ خطر مهاجرت کربن وجود ندارد.

در شرایط کاری با سیکلهای حرارتی، منطقه متاثر از حرارت تحت تنشهای برشی متغیر ناشی از تفاوت ضرایب انبساط حرارتی فلز پایه و فلز جوش قرار می گیرد. این تنشها ممکن است موجب خستگی در ناحیه کربن زدایی شده نزدیک فصل مشترک جوش شود.

Authorized National Body

۶-۱-۲- فلزات پرکننده از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی

فازهای موجود در ریزساختار فلز رسوب داده شده تعدادی از فلزات پرکننده آستنیتی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: موقعیت فلز جوش برخی از فولاد های زنگ نزن در دیاگرام Schaeffler[۱].

برحسب ترکیب شیمیایی آلیاژ، در برخی موارد ریزساختار به طور کلی آستنیتی خواهد بود و در برخی موارد بسته به ترکیب شیمیایی آلیاژ ریزساختار شامل درصدی از فریت دلتا خواهد بود.

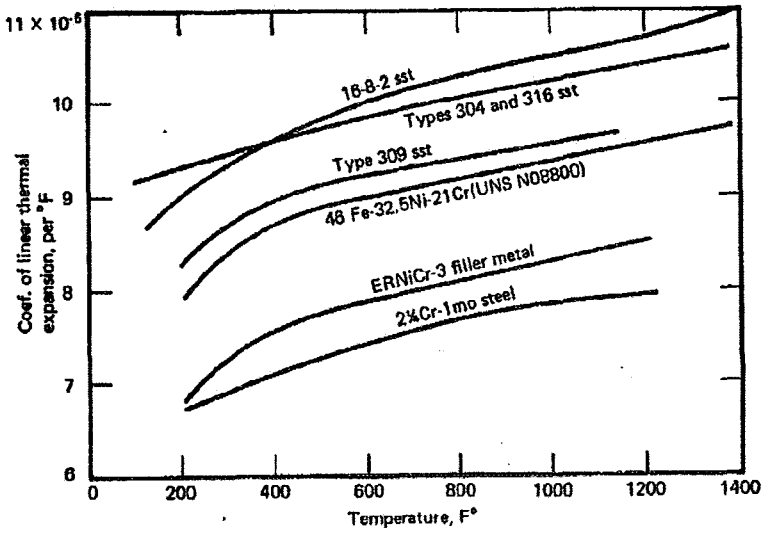
۶-۱-۳- فلز پرکننده از جنس آ لیاژ های نیکل

فلز پرکننده آلیاژهای نیکل ممکن است برای جوشکاری فولاد زنگ نزن به فولاد کربنی و کم آلیاژ مورد استفاده قرار گیرد. فلزات پرکننده مناسب برای این کاربرد معمولاً الکترودهای پوشش دار4 یا ENiCrFe-2 و الکترودهای جامد ERNiCr-3 و میله های جوشکاری می باشند. ضمن آنکه فلزات پرکننده دیگری از آلیاژهای نیکل نیز برای این کاربرد قابل استفاده هستند.

Authorized National Body

۶-۱-۴- ملاحظات سرویس

شکل ۳ ضریب انبساط خطی متوسط را بر حسب تابعی از دما برای تعدادی از آلیاژهایی که معمولا در جوشکاری تجهیزات نیروگاه بخار بکار می روند نشان می دهد.



شکل ۳: ضریب انبساط حرارتی متوسط بر حسب دما برای آلیاژهایی که در جوشکاری به کار می روند[۱].

ضریب انبساط فولاد ۲,۲۵Cr-۱Mo حدود ۲۵٪ کمتر از فولاد های زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ و ۳۱۶ می باشد. ناحیه اتصال بین فولادهای زنگ نزن آستنیتی و فولادهای کم آلیاژی ممکن است در کاربردهای مشخص تحت تغییرات دمایی زیادی قرار گیرد. برای تغییر دمایی مشخص تنش اعمال شده بر اتصال جوش متناسب با اختلاف ضرایب انبساطی می باشد. آنالیز تنشی این اتصالات انجام شده بین این دو نوع فولاد نشان دهنده آن است که تنشهای حرارتی ایجاد شده بیش از تنشهای اعمالی در حین کار می باشد.

تجربیات کاربردی اتصالات غیرهمجنس مورد استفاده در سیستمهای انتقال نشان می دهد که تعداد قابل توجهی از عوامل تخریب در زمانی کمتر از عمر پیش بینی شده ای که مورد انتظار بوده است، رخ می دهد. اکثر عوامل انهدام اتصالات جوشکاری فولاد آستنیتی به فولاد فریتی در منطقه متاثر از حرارت فولاد فریتی، مجاور فصل مشترک رخ می دهد.

Authorized National Body

این آسیبها مرتبط به یک یا چند دلیل زیر می باشد :

۱- تنشهای بالا و خزش حاصل از آن در فصل مشترک که نتیجه اختلاف در ضریب انبساط حرارتی جوش و فلزات پایه می باشد.

۲- مهاجرت کربن از فولاد فریتی به طرف فولاد زنگ نزن آستنیتی که منطقه متأثر از حرارت فولاد را ضعیف می کند.

۳- اکسیداسیون ترجیحی در فصل مشترک که توسط تنشها ی موجود تسریع می شود .

۶-۱-۵- جوشکاری فولاد زنگ نزن آستینتی به فولاد ساده کربنی یا کم آلیاژ

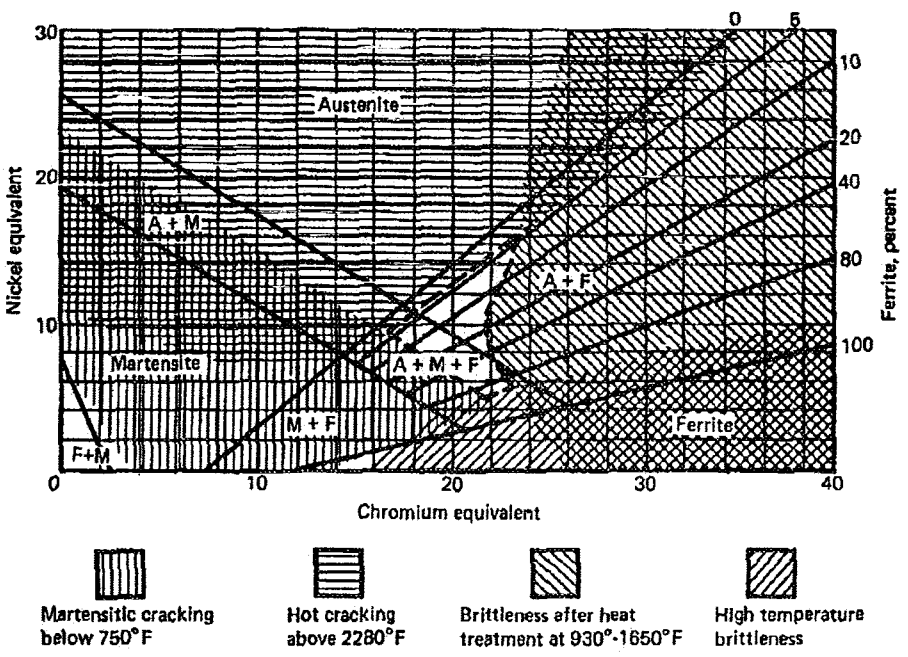
انتخاب فلز پرکننده در طراحی جوش ذوبی بین فولاد کربنی یا کم آلیاژ و فولاد زنگ نزن آستنیتی به منظور دستیابی به عمر سرویس دهی قابل قبول از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. انتخاب مناسب به شرایط سرویس دهی مورد انتظار اتصال جوش داده شده و اثر درجه رقت بر ترکیب شیمیایی فلز جوش بستگی دارد.

- **شرایط کاری با دمای متوسط**

برای شرایط کاری با دمای کمتر از ۴۲۵°C فلز پرکننده فولاد زنگ نزن آستنیتی استفاده می‌شود. فلز پرکننده Ni-Cr-Fe نیز مناسب است اما قیمت بالاتر آلیاژ، استفاده از آن را در کاربردهای صنعتی محدود می کند.

انتخاب فلز پر کننده از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی برای اتصال فولادهای غیر همجنس نیازمند پیش بینی ترکیب شیمیایی فلز جوش و ریزساختار بعد از رقت با فلز پایه می باشد. در جوشهای چند پاسه با تغییر ترتیب پرسازی اتصال، درجه رقت تغییر می کند.

نمودار اصلاح شده Schaeffler در شکل ۴ نشان دهنده ترکیبات فلز جوش فولاد براساس نیکل معادل وکروم معادل می باشد که عامل پیش بینی ایجاد تردی و تشکیل ترک در فلز جوش فولاد زنگ نزن می باشد.



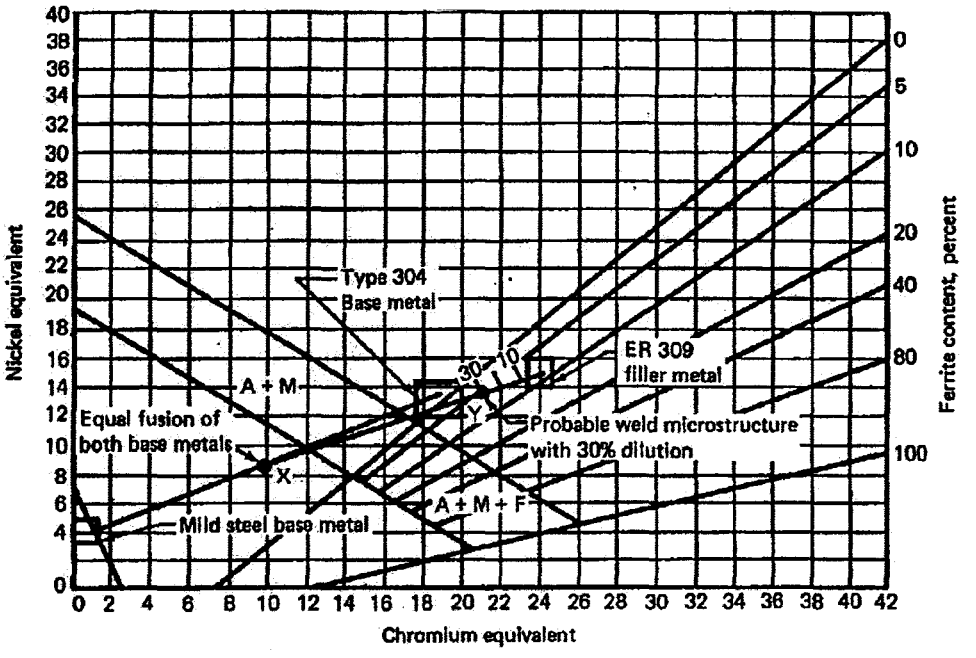
شکل ۴: دیاگرام اصلاح شده Schaeffler برای فلز جوش فولاد زنگ نزن که نشان دهنده مناطق مستعد به تردی و ترک می باشد[۱].

منطقه مرکزی کوچک بدون هاشور در نمودار، نشان دهنده ترکیب فلز جوشی است که برای اغلب شرایط سرویس دهی مناسب می باشد. ریزساختار فلز جوش فولاد زنگ نزن آستنیتی که دراین منطقه واقع می شود اساساً شامل آستنیت همراه با۳ تا ۸٪ فریت دلتا می‌باشد. حضور فاز دلتا سبب انحلال گوگرد در ریزساختار شده که در نتیجه از بروز ترک گرم در زمینه آستنیتی جلوگیری کند. فریت خود درسیکلهای کاری طولانی مدت در دمای بالا (۵۰۰ تا ۹۰۰°C) تبدیل به فاز ترد سیگما می شود که این فاز سبب کاهش انعطاف پذیری فولاد زنگ نزن در پایین تر از دمای انتقال نرمی به تردی می گردد.

بنابراین حضور فریت اضافی درفلز جوش آستینتی مطلوب نیست. انتخاب فلز پرکننده و دستورالعمل جوشکاری مناسب، سبب قرار گرفتن ترکیب شیمیایی درمیان منطقه بدون هاشور در شکل ۴ خواهد شد.

دیاگرام Schaeffler ممکن است برای تخمین ریزساختار فلز جوش هنگام اتصال فولاد زنگ نزن به فولاد ساده کربنی یا کم آلیاژ مورد استفاده قرار گیرد. شکل ۵ نحوه تخمین فلز جوش حاصل از

جوشکاری تک پاسه یک فولاد ساده کربنی به یک فولاد زنگ نزن ۳۰۴ را توسط یک فلز پرکننده از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی ER۳۰۹ نشان می دهد.

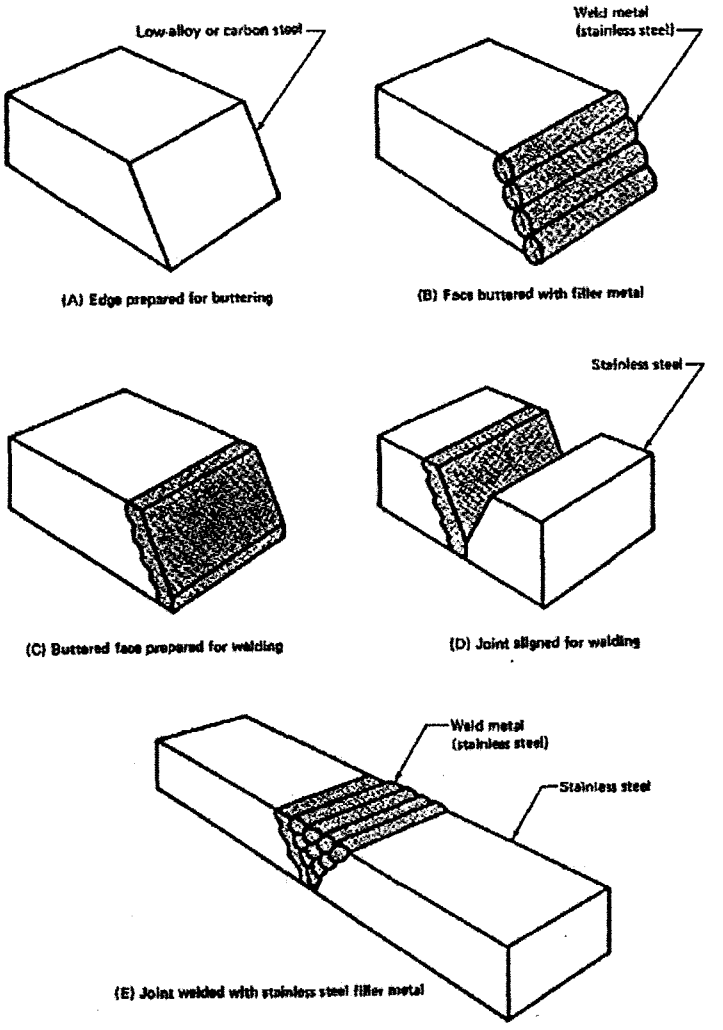


شکل ۵: تخمین ترکیب شیمیایی فلز جوش از دیاگرام Shaeffler[۱].

نحوه تخمین بدین صورت است که ابتدا برروی نمودار دو نقطه معادل ترکیب شیمیایی دو فلز پایه بر اساس کروم معادل و نیکل معادل مشخص شده که توسط یک خط به یکدیگر متصل می‌گردند. نقطه X بر اساس درجه رقت نسبی ناشی از هر یک از فلزات پایه بر روی خط مشخص شده است. اگر میزان رقت ناشی از هر کدام با یکدیگر برابر باشد، نقطه X در وسط خط قرار می‌گیرد. خط دوم بین نقطه X و نقطه ای که نماینده فلز پرکننده ER۳۰۹ است، رسم می شود. ترکیب شیمیایی فلز جوش بر روی این خط قرار می گیرد و موقعیت دقیق آن بسته به درجه رقت کلی تغییر می کند. با فرض درجه رقت ۳۰٪، ترکیب شیمیایی در نقطه Y قرار می گیرد. این موقعیت در منطقه هاشور نخورده در شکل ۴ قرار می گیرد و خواص جوش قابل قبول می باشد. اگر یک پاس بعدی، پاس اول را به فولاد کربنی متصل کند رقت ناشی از فولاد کربنی باید حداقل باشد تا از تشکیل مارتنزیت در فلز جوش جلوگیری شود.

Authorized National Body

اگر رقت ناشی از فلز پرکننده فولاد زنگ نزن آستنیتی مشکل زا باشد، می توان با لایه نشانی اولیه سطح اتصال فولاد کربنی یا کم آلیاژ با یک یا دو لایه از فلز پرکننده فولاد زنگ نزن نوع ۳۰۹ یا ۳۱۰ (مطابق با شکل ۶A,B)، این مشکل را کنترل کرد. بعد از ماشینکاری و بازرسی لایه رسوب داده شده (شکل ۶C)، اتصال بین فولاد زنگ نزن و فولاد لایه داده شده با استفاده از دستورالعمل های معمول و فلز پرکننده مناسب برای جوشکاری فلز پایه فولاد زنگ نزن جوشکاری می شود. این عملیات باعث می شود که نیازی به عملیات حرارتی بعد از جوش که منجر به حساس شدن فولاد زنگ نزن آستنیتی به خوردگی مرزدانه ای می شود، نباشد.



شکل ۶: تکنیک مورد استفاده برای جوشکاری فولاد زنگ نزن به فولاد ساده کربنی یا کم آلیاژ[۱].

Authorized National Body

- **شرایط کاری دمای بالا**

زمانی که اتصال فولاد زنگ نزن آستنیتی به یک فولاد کم آلیاژی یا ساده کربنی در دمای ۳۷۰°C استفاده می شود، برای ایجاد این اتصال می بایست از یک فلز پرکننده از جنس آلیاژهای نیکل استفاده گردد. این فلزات پرکننده مزایای زیادی در اتصالاتی که تحت سیکلهای دمایی کار می کنند، دارند. در حین جوشکاری، این فلزات پرکننده بدون حساسیت به ایجاد ترک می توانند رقت ناشی از فلزات پایه را تحمل کنند. انحلال کربن توسط این فلزات پرکننده محدود بوده و سبب کاهش مهاجرت کربن از فولاد کم آلیاژی به طرف فلز جوش می شود.

فلزات پرکننده نیکلی ضریب انبساط حرارتی نزدیک به ضریب انبساط حرارتی فولاد های کم آلیاژ دارند (شکل ۳). از این رو تحت شرایط سیکل حرارتی، در فصل مشترک فلز جوش بین فلزات پرکننده و فولاد کم آلیاژ نسبت به فصل مشترک جوش بین فلز پرکننده و فولاد زنگ نزن آستنیتی تنشهای کمتری ایجاد می گردد.

تنشهای داخلی در فصل مشترک فولاد زنگ نزن فلز پرکننده آلیاژ نیکل به دلیل تفاوت در ضریب انبساط حرارتی آنها می باشد. اگرچه مقاومت به اکسیداسیون کافی و استحکام خزشی مطلوب فلزات در این فصل مشترک می توانند خواص مکانیکی فولاد در شرایط سرویس را حفظ کند.

- **ملاحظات طراحی**

زمانی که نیاز به اتصال بین فولاد کم آلیاژ به فولاد زنگ نزن آستنیتی باشد، جهت سرویس دهی طولانی، در فاز طراحی ملاحظات ویژه ای باید در نظر گرفته شود. همانطور که قبلاً ذکر شد، میزان تنشهای ایجاد شده در فصل مشترک جوش در نتیجه اختلاف ضرایب انبساط حرارتی بالاست. بنابراین سایر تنشهای سیستم در اتصال باید پایین نگه داشته شوند. بارهای خارجی روی اتصال با طراحی و قرارگیری اتصالات به طور مناسب باید به حداقل رسانده شود.

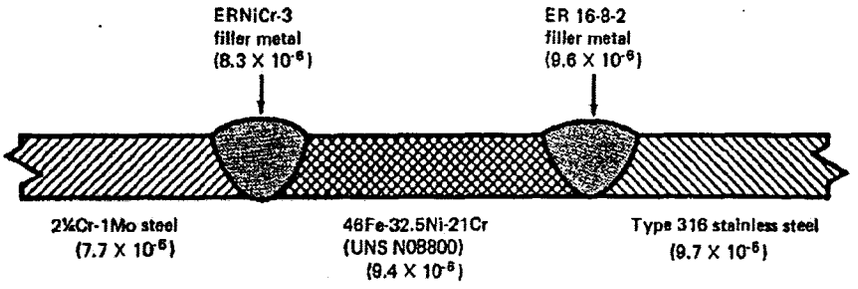
یکی از روشهای کاهش دادن این تنشها قرارگیری فلز سومی بین فولاد زنگ نزن آستنیتی و فولاد ساده کربنی یا کم آلیاژ است. این فلز پایه سوم باید دارای ضریب انبساط حرارتی بین دو فلز پایه دیگر باشد و دارای خواص مکانیکی مطلوبی جهت کاربرد مد نظر باشد.

آلیاژهای آهن-نیکل-کروم نظیر ۴۶Fe-۳۲,۵Ni-۱۲Cr (UNS N۰۸۸۰۰) یا ۴۳Fe-۳۶Ni-۱۹Cr (UNS N۰۸۳۳۰) کاندیداهای مناسبی برای این منظور می باشند (به شکل ۳ توجه گردد).

مثالی از مفهوم این طراحی در شکل ۷ نشان داده شده است. عیب مهم این طراحی آن است که دو اتصال جوش داده شده به جای یک اتصال مورد نیاز است. زمانی که از آلیاژ Fe-Ni-Cr به عنوان

Authorized National Body

فلز سوم استفاده می شود، فلز پرکننده نوع ERNiCr-۳ برای اتصال آن به فولاد آلیاژی Cr-Mo توصیه می گردد. برای جوش دادن فولاد زنگ نزن آستنیتی بهتر است از فلز پرکننده زنگ نزن آستنیتی استفاده شود.



شکل ۷: استفاده از فلز سوم در طراحی بین فولاد کم آلیاژ و فولاد زنگ نزن آستنیتی برای سرویس در دماهای بالا[۱].

۶-۱-۶- جوشکاری فولاد زنگ نزن کروم دار به فولاد ساده کربنی یا کم آلیاژ

انتخاب فلز پرکننده برای اتصال فولاد زنگ نزن فریتی و مارتنزیتی کروم دار (سری های ۴۰۰) به فولاد ساده کربنی یا کم آلیاژ می تواند با توجه به شرایط زیر انجام پذیرد:

۱- جهت جوشکاری فولاد کروم دار سختی پذیر به فولادی با درصد کروم بالاتر، از فلز پرکننده ای شامل میزان کروم معادل با هر یک از دو فولاد می توان استفاده کرد. به علاوه استفاده از هر فلز پرکننده ای که درصد کروم آن بین دو فولاد قرار می گیرد نیز به شرط آنکه جوش به طور مطلوب عملیات حرارتی شود، رضایت‌بخش خواهد بود.

۲- قانون کلی برای جوشکاری هر فولاد کروم دار به هر فولاد کم آلیاژ استفاده از فلز پرکننده‌ای است که دارای ترکیب شیمیایی مشابه فولاد کم آلیاژ باشد، به شرط آنکه الزامات کاربردی سرویس را رعایت کند. با هر فلز پرکننده فولاد کم آلیاژ میزان کرومی که از طریق رقت ناشی از فلز پایه فولاد کروم دار تجمع می یابد باید در نظر گرفته شود.

۳- برای جوشکاری هر فولاد کروم دار به فولاد ساده کربنی می توان از فلز پرکننده ساده کربنی استفاده کرد. فلز پرکننده فولاد کروم دار نیز می تواند مورد استفاده قرار گیرد. اما ترجیح داده می شود از فولادهای با سختی پذیری کمتر استفاده شود.

۴- از فلز پرکننده فولاد آستنیتی زنگ نزن می توان برای جوشکاری فولاد کروم دار به فولاد کروم دار دیگر یا سایر فولادها استفاده کرد، به شرط آنکه یکی از فولادها برای مخازن تحت فشار به کار برده نشود.

زمانی که عملیات حرارتی مناسب برای جوش که فولاد کروم دار را به هرگونه فولاد دیگر متصل می کند، در نظر باشد، اعمال شرایط فوق باید با مشورت متالورژیست های حاذق انجام گیرد.

به طور کلی در صورت رعایت دستورالعمل صحیح، اتصال فولادهای حاوی کروم به فولادهای ساده کربنی یا کم آلیاژ رضایت‌بخش خواهد بود و این اتصالات قابل کاربرد تا دماهای حدود ۴۲۵°C می‌باشد.

۶-۲- جوشکاری آلیاژها ی نیکل وکبالت به فولاد

۶-۲-۱- آلیاژهای نیکل

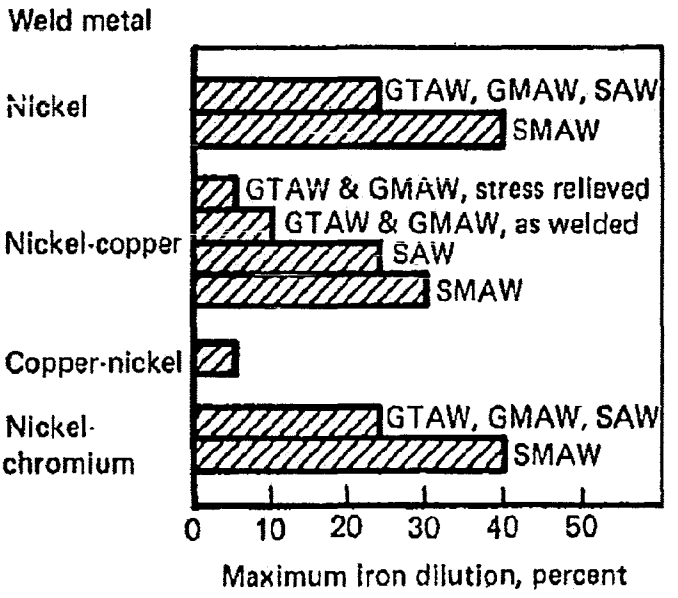
با استفاده از فلز پرکننده مناسب و کنترل درجه رقت، آلیاژهای نیکل به آسانی قابل اتصال با فولادها می باشند. معمولاً به دلیل داکتیلیته خوب و تلرانس قابل قبول از رقت ناشی از آهن، فلزات پرکننده پایه نیکل انتخاب می گردد.

گوگرد و فسفر در آلیاژهای نیکل وکبالت موجب بروز ترک گرم می شوند. تکنیکهای ذوب مورد استفاده برای تولید نیکل و آلیاژهای آن طوری طراحی می شود که میزان این عناصر در سطوح پایینی حفظ گردد. از طرفی میزان گوگرد و فسفر در برخی از فولادها بالاتر است. در نتیجه در اتصال یک فولاد به آلیاژ نیکل با استفاده از فلز پرکننده آلیاژ نیکل، درجه رقت باید به دقت کنترل گردد تا از ترک گرم فلز جوش جلوگیری شود.

- **رقیق شدن ناشی از آهن**

فلز جوش اغلب آلیاژهای پایه نیکل مقدار قابل توجهی از آهن را در خـــود می توانند حل کنند، اما میزان این رقت با توجه به فرآیند جوشکاری مورد استفاده، در برخی موارد به نوع عملیات حرارتی انجام پذیرفته تغییر می کند.

شکل ۸ میزان رقت آهن را بر روی ۴ فلز جوش از آلیاژهای نیکل که با استفاده از فرآیندهای معمول جوشکاری قوسی رسوب داده شده اند را نشان می دهد.

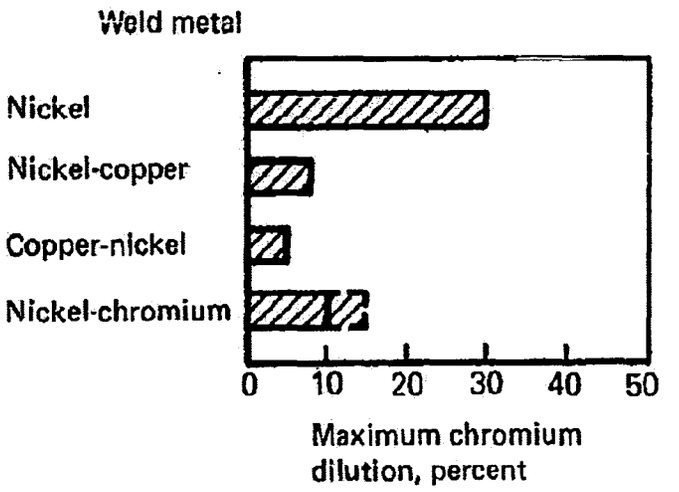


شکل ۸: محدوده های رقت توسط آهن در فلزات جوش نیکل و آلیاژهای آن[۱].

فلزات جوش رسوب داده شده با الکترودهای روپوش دار نیکلی یا نیکل کروم، تا حدود ۴۰٪ رقت ناشی از آهن را می توانند تحمل کنند. از سوی دیگر، میزان درجه رقت باید برای سیم جوشهای نیکلی یا نیکل کروم باید تا حدود ۲۵٪ محدود گردد. حدود قابل قبول برای رقت توسط آهن برای فلز جوش نیکل- مس به شدت با فرآیند جوشکاری تغییر می کند. در جوشکاری قوس زیر پودری میزان رقت نباید از ۲۵٪ تجاوز کند. در فرآیندهای جوشکاری با محافظت گاز میزان رقت ناشی از آهن توسط فلز جوش کمتر است به خصوص اگر جوش به صورت حرارتی تنش زدایی شود (حدود ۵٪). به منظور اجتناب از تجاوز از این حدود یک لایه بافر از فلز جوش نیکلی یا نیکل- مس بر روی سطح فولاد توسط فرآیند SMAW یا SAW قبل از جوشکاری با فرآیندهای گاز محافظ باید اعمال گردد.

- **رقیق شدن ناشی از کروم**

همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است میزان رقیق شدن ناشی از کروم باید توسط تمام فلزات جوش آلیاژهای نیکل کنترل گردد. رقت فلز جوش نیکل باید به حداکثر ۳۰٪ محدود گردد. فلزات پرکننده نیکل-کروم معمولاً برای اتصالاتی که توسط کروم رقیق می شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. میزان کلی کروم فلز جوش نیکل–کروم نباید از ۳۰٪ تجاوز کند. اغلب آلیاژهای نیکل- کروم، شامل فلزات پرکننده، کمتر از ۳۰٪ کروم دارند و رقیق شدن مشکل ساز نمی باشد.



شکل ۹: محدوده های رقیق شدن توسط کروم در فلزات جوش نیکل و آلیاژهای آن[۱].

- **رقیق شدن ناشی از سیلیسیم**

رقیق شدن فلز جوش نیکل کروم توسط سیلیسیم، به ویژه زمانی که یکی از قطعات فولاد ریختگی باشد، از اهمیت بالایی برخوردار است. حداکثر مقدار سیلیسیم در فلز جوش نیکل کروم نباید از ۰/۷۵٪ تجاوز کند.

- **فلزات پر کننده**

برای جوشکاری آلیاژهای نیکل به فولاد یا فولاد های زنگ نزن، فلز پرکننده هایی از جنس آلیاژهای نیکل پیشنهاد می شود که در جدول ۳ نشان داده شده است. برای هر اتصال غیر همجنس دو یا سه فلز پرکننده مختلف پیشنهاد شده است که انتخاب هر کدام از آنها به نوع فولاد یا فولاد زنگ نزن بستگی دارد. در برخی از موارد میزان رقت که بر حسب نوع فرآیند جوشکاری بدست می‌آید عامل کنترل کننده ای در انتخاب فلز پرکننده می باشد.

جدول ۳: فلزات پرکننده پیشنهادی برای اتصال آلیاژ [۱].

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	Monel 400	Covered electrode	ENiCu-7, ENi-1	ENiCrFe-2, ENiCrFe-3
N05500	Monel K-500			
N05502	Monel 502	Bare wire	ERNi-1	ERNiCr-3, ERNiCrFe-6
N06600	Inconel 600	Covered electrode	ENiCrFe-2, ENiCrFe-3	ENiCrFe-2, ENiCrFe-3
N08800	Incoloy 800			
		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.

- **خواص مکانیکی**

استحکام کششی اتصالات جوشکاری شده بین برخی آلیاژهای مختلف نیکل وفولاد در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴: خواص مکانیکی اتصالات جوشکاری شده بین آلیاژهای نیکل و فولاد[۱].

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.

۶-۲-۲- آلیاژهای کبالت

اغلب آلیاژهای کبالت حاوی ۱۰ تا ٪۲۰ نیکل، ۲۰تا٪۳۰ کروم و ۲تا٪۵ مجموع تنگستن یا مولبیدن یا هر دو می باشند. در جوشکاری، از لحاظ متالورژیکی آلیاژهای کبالت، مشابه آلیاژهای با کاربرد دمای بالای نیکل-کروم رفتار می کنند. هنگام اتصال آلیاژ پایه کبالت به فولاد زنگ نزن، فلز پرکننده‌ای با ترکیب مشابه با آلیاژ کبالت توصیه می گردد.

از پرکننده های نیکلی نیز می توان استفاده کرد. در بعضی از شرایط انتخاب فلز پرکننده، فرآیند جوشکاری و دستورالعمل مناسب، باید با انجام آزمونهای مناسب صورت پذیرد.

۶-۳- جوشکاری آلیاژهای مس به فولاد

مس و آهن به طور کامل در حالت مایع در یکدیگر حل می شوند، اما حلالیت آنها در حالت جامد جزیی است. اغلب آلیاژهای مس-آهن محلولهای جامد دوتایی تشکیل می دهند. از نظر جوشکاری عدم حضور ترکیبات بین فلزی مزیت مهمی به شمار می رود. اگرچه فلز جوش آلیاژ دو فازی می تواند منجر به مشکلات خوردگی در کاربردهای خاص شود. رقیق شدن ناشی از آهن می تواند با استفاده از دستورالعمل جوشکاری مناسب یا جایگزینی یک لایه بافر نیکل بر روی فولاد به حداقل برسد. فرآیندهای SMAW, GTAW به دلیل کنترل بهتر نفوذ و عمق ذوب نسبت به فرآیند GMAW

Authorized National Body

ترجیح داده می شوند. درسیستم آلیاژی مس-آهن ترکیبات شیمیایی زیادی با دامنه انجمادی وسیعی وجود دارند، بنابراین ایجاد ترک گرم در فلز جوش آلیاژمس–آهن محتمل می باشد.

فعالیت سطحی مس بر آهن بالا می باشد. مس مذاب درامتداد مرز دانه های آهن، به درون آن نفوذ می کند و باعث ایجاد ترک گرم یا شکاف در منطقه متاثر از حرارت فولاد می گردد.

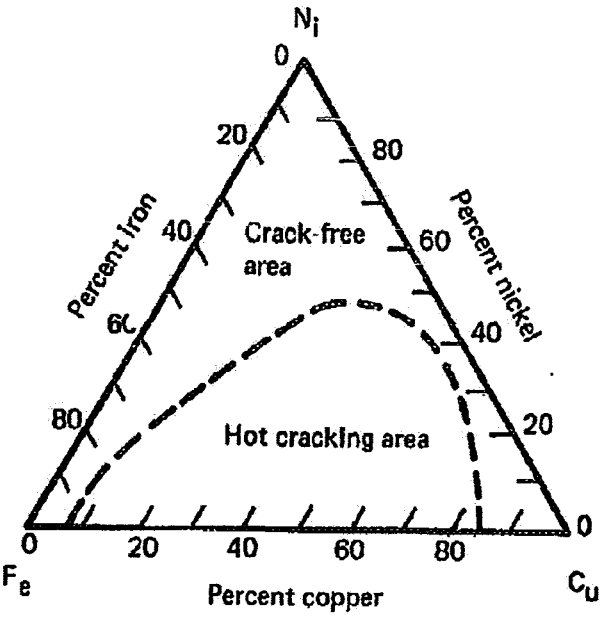
۶–۳–۱– مس خالص

مس و نیکل هر دو به هر نسبتی، ترکیب شده و تولید آلیاژ تک فاز می کنند. قطعات مسی می توانند با فلز پرکننده نیکلی لایه نشانی شده و سطح اتصال حاوی درصد نیکل بالا تشکیل دهند. سپس سطح نیکلی به فولاد ساده کربنی یا فولاد زنگ نزن با استفاده از روشها و فلزات پرکننده مناسب، جوشکاری شود. قسمتهای مسی برحسب ضخامت، در دامنه دمایی ۲۰۰ تا ۵۴۰°C جهت ایجاد تعادل حرارتی درحین جوشکاری، پیشگرم می‌شوند.

مس می تواند به صورت مستقیم با فلز پرکننده سیلیسیم برنز (CuSi-A) یا آلومینیم برنز (CuAl-AX) و با یکی از فرآیندهای رایج قوسی به فولاد جوشکاری شود دراین حالت پیشگرم مس و کنترل میزان رقت آن با فولاد مهم می با شد .

۶–۳–۲– آلیاژهای مس– نیکل

شکل ۱۰ ترکیب شیمیایی سیستم آلیاژی مس-نیکل-آهن که به ایجاد ترک گرم حساسیت دارند و ندارند را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل رقت فلز پرکننده مس–نیکل توسط آهن یا کروم یا مجموع هر دوی آنها باید به کمتر از ٪۵ محدود شده باشد (به اشکال ۸ و ۹ نیز مراجعه شود) این محدودیت عموما برای سایر پرکننده های دیگر مسی نیز قابل اعمال است.



شکل ۱۰: دیاگرامی که مناطق مستعد به ترک گرم فلز جوش نیکل-مسی که توسط آهن رقیق شده است را نشان می دهد[۱].

در بعضی مواقع آلیاژهای مس– نیکل برای کاربردهای دریایی به فولادهای ساده کربنی یا زنگ نزن متصل می شوند. یک روش اتصال در این حالت لایه نشانی بر روی سطح فولاد با فلز پرکننده نیکلی یا نیکل-مس می باشد تا رقیق شدن فلز جوش توسط آهن در اتصال فولاد و رقیق شدن فلز جوش توسط کروم در اتصال فولاد زنگ نزن را کنترل کند. پس از لایه نشانی مجدداً با فلز پرکننده نیکل– مس یا مس– نیکل عمل اتصال انجام می پذیرد. انتخاب فلز پرکننده به ملزومات سرویس مربوط می باشد. نکته قابل ذکر است آن است که دمای پیشگرم نباید از $65^{\circ}C$ تجاوز کند.

روش دیگر این نوع اتصال لایه نشانی بر روی آلیاژ مس – نیکل با پرکننده نیکلی و سپس جوشکاری آن به فولاد با همان فلز پرکننده نیکلی است.

۶-۳-۳- آلومینیم برنز

اتصال آلومینیم برنز به فولاد ساده کربنی یا زنگ نزن با استفاده از فلز پرکننده از جنس آلومینیم برنز قابل اجرا می باشد. دمای پیشگرم وبین پاسی مورد نیاز بستگی به نوع فولاد دارد. برای

Authorized National Body

فولادهای ساده کربنی و کم آلیاژ بسته به سختی پذیری فولاد، دمای پیشگرم در محدوده ۱۵۰ تا ۲۶۰°C می باشد. برای فولاد زنگ نزن دمای پیشگرم نباید از ۶۵°C تجاوز کند.

فولاد باید تمیز و عاری از اکسید باشد. در جوشهای چند پاسه برای کنترل بهتر رقیق شدن ناشی از فولاد استفاده از جوشهای بافته ای توصیه می گردد. تمیز کاری بین پاسی با برسهای سیمی از جنس فولاد های زنگ نزن جهت زدودن اکسید از سطح فلز رسوب داده شده توصیه می گردد. GTAW با جریان متناوب، عمل تمیزکاری را به خوبی انجام می دهد.

۶-۳-۴- برنج

برنج هایی با مقادیر کم روی می توانند به طورکاملاً رضایتبخش با استفاده از فرآیند GTAW به فولاد جوش داده شوند. به منظور به حداقل رساندن حفره در فلز جوش، میزان روی در آلیاژ برنج باید کمتر از ٪۲۰ باشد. دستورالعمل های مورد استفاده برای آلومینیم برنز برای جوشکاری برنج نیز می تواند به کار رود. سطح فولاد ابتدا باید با یک فلز پرکننده مس- قلع با جریان مستقیم الکترود منفی لایه نشانی شود، سپس با استفاده از فلز پرکننده مشابه و جریان متناوب به منظور تمیزکاری، جوشکاری قابل انجام است. عملیات پیشگرم برای برنجها معمولاً مورد نیاز نیست. قوس نباید به طورمستقیم بر روی برنج قرار گیرد زیرا منجر به بیش از حد گرم شدن آلیاژ و بخار شدن روی می شود. به جای آن قوس باید به فلز پرکننده متمرکز شود تا عمق نفوذ داخل لایه بافر موجود بر روی فولاد و در نتیجه رقیق شدن ناشی از آهن محدود شود.

۶-۴- جوشکاری آلیاژهای مس به نیکل

برای جوشکاری آلیاژهای مس و مس- نیکل به نیکل و آلیاژهای نیکل کاربردهای مختلفی وجود دارد، اما برای برنجها و برنزها کاربردهای کمی موجود است. به دلیل آنکه مس و نیکل در یکدیگر حل می شوند، جوشکاری آنها به یکدیگر با مشکل جدی مواجه نمی باشد. برای اتصال این آلیاژ ها، انواع فلز پرکننده مس- نیکل، نیکل- مس و نیکل موجود می باشد. فلز جوش نیکل- مس حداقل دارای استحکام ٪۴۰ بیشتر از فلز جوش مس- نیکل یا نیکل می باشد (به ترتیب ۵۰، ۷۰ و ۵۵ksi).

آلیاژهای مس و مس- نیکل با استفاده از فلز پرکننده مس- نیکل یا نیکل- مس یا بدون استفاده از فلز پرکننده آلیاژهای نیکل یا نیکل – مس متصل می شوند.

Authorized National Body

ممکن است سطح نیکل با استفاده از فلز پرکننده نیکل- مس لایه نشانی شود و سپس به مس- نیکل جوش داده شود. زمانی که به اتصالی با استحکام بالاتر نیاز است، سطح مس می‌تواند با فلز پرکننده مس- نیکل لایه نشانی شود و سپس اتصال با استفاده از پرکننده نیکل- مس برقرار گردد. برای اتصال آلیاژهای مس یا مس- نیکل به آلیاژهای نیکل حاوی کروم یا آهن یا هر دو، فلز پرکننده نیکلی توصیه می گردد. سطوح اتصال مس یا مس- نیکل می تواند با استفاده از فلز پرکننده نیکلی لایه نشانی گردد تا رقیق شدن ناشی از مس کنترل گردد.

۶-۵- جوشکاری آلیاژهای آلومینیم به فولاد

آهن و آلومینیم فلزات سازگاری برای اتصال توسط فرآیندهای جوشکاری ذوبی نمی باشند. نقاط ذوب این دو فلز تفاوت زیادی با یکدیگر دارند (۶۶۰°C برای آلومینیم و ۱۵۳۸°C برای فولاد). هیچ یک از دو فلز تقریباً در حالت جامد در یکدیگر حلالیتی ندارند و فازهای بین فلزی ترد مختلفی می توانند تشکیل دهند ($FeAl_2$، $FeAl_5$ یا $FeAl_3$). در نتیجه جوشها دارای اتصال آهن و آلومینیم ترد خواهند بود. بعلاوه به دلیل تفاوت در ضرایب انبساط حرارتی، هدایت حرارتی و حرارت ویژه دو فلز تنشهای جوشکاری بالایی قابل انتظار می باشد.

در صورتی که فولاد از ابتدا توسط فلزی که سازگار با یک فلز پرکننده مناسب باشد پوشش داده شود، می توان آلومینیم را به فولاد ساده کربنی یا زنگ نزن توسط لحیم کاری یا جوشکاری متصل کرد. پوششهای آلومینیم، نقره، قلع و روی می توانند مورد استفاده قرار گیرند که معمولاً از آلومینیم استفاده می شود. عملیات پوشش دهی می تواند با استفاده از غوطه ورکردن فولاد تمیز داخل حمام آلومینیم مذاب با دمای ۶۹۰ تا ۷۰۵°C، با یا بدون استفاده از عملیات فلاکسینگ صورت پذیرد. همچنین با استفاده از رسوب دهی الکترولیتی[1] یا رسوب دهی توسط بخار می توان پوشش آلومینیمی را بر سطح فولاد اعمال کرد.

بعد از تمیزکاری قسمت فولادی پوشش داده شده می تواند با استفاده از فرآیند GTAW و فلز پرکننده آلیاژ آلومینیم به سطح آلومینیمی فولاد متصل شود. در حالی که فلز جوش مذاب بر روی پوشش موجود بر فولاد جریان دارد، قوس باید بر روی عضو آلومینیمی متمرکز گردد، زیرا فولاد نباید ذوب گردد.

۱-Electrodeposition

Authorized National Body

استحکام چنین اتصالی بستگی به موارد زیر دارد:

۱- فلز مورد استفاده برای پوشش فولاد

۲- ضخامت پوشش

۳- استحکام لایه پوشش داده شده برسطح فولاد

طراحی اتصال نیز بر استحکام جوش تاثیر دارد زیرا تعیین کننده محدوده بارگذاری و حضور تمرکز تنش می باشد. تحت شرایط کنترل شده استحکام اتصال می تواند در محدوده ۱۵ تا ۳۰ksi به دست آید. نتایج تجربی نشان می دهد زمانی که ترکیبات بین فلزی در جوش وجود نداشته باشد و چسبندگی پوشش به فولاد در بهترین شرایط باشد، استحکام بهینه به دست می‌آید.

افزودن ۳ تا ۵٪ سیلیسیم، روی یا مس به فلز پرکننده آلومینیم سبب محدود شدن تشکیل ترکیبات بین فلزی بین ناحیه ذوب شده و پوشش روی فولادهای گالوانیزه می گردد.

زمانی که جهت جلوگیری از اختلاط آلومینیم و آهن از پوشش دهی استفاده می شود، می‌بایست توجه کرد که قطعه حاصل از جوشکاری در شرایط دمایی بالا بکار برده نشود، زیرا سبب نفوذ آلومینیم و آهن و در نتیجه ایجاد ترکیبات ترد بین فلزی می گردد. حداکثر دمای مجاز قابل استفاده، ۲۶۰°C می باشد.

آلومینیم و فولاد توسط یکی از فرآیندهای جوشکاری حالت جامد نظیر اصطکاکی یا انفجاری به بهترین شکل می توانند به یکدیگر اتصال داده شوند. جهت جوشکاری این دو فلز روش دیگر ایجاد یک قطعه کوچک دو فلزی آلومینیم – آهن با استفاده از یکی از فرآیندهای حالت جامد می‌باشد. پس از اینکه قطعه کوچک آماده شد، به عنوان واسطه بین آلومینیم وفولاد اصلی قرار داده می شود و توسط فرآیند جوشکاری ذوبی فولاد به طرف فولادی قطعه واسط، وآلومینیم به طرف آلومینیمی قطعه واسط متصل می شوند.

برای جوشکاری ابتدا با استفاده خال جوش، قطعه واسط را به دو قطعه اصلی اتصال داده سپس ابتدا آلومینیم را با فرآیند GTAW و پس از آن طرف فولادی جوشکاری می گردد. طرف فولادی را با یکی از روشهای الکترود توپودری یا الکترود دستی می توان جوشکاری کرد.

زمانی که آلومینیم وسایر فلزات به یکدیگر متصل می شوند، حضور رطوبت یا تشکیل پیل گالوانیک بین دو قطعه جوش خورده، سبب ایجاد خوردگی می شود. در این حالت اتصالات می‌بایست با روشهای مختلف نظیر رنگ کردن، پوشش دهی و... در برابر این مشکل محافظت شوند.

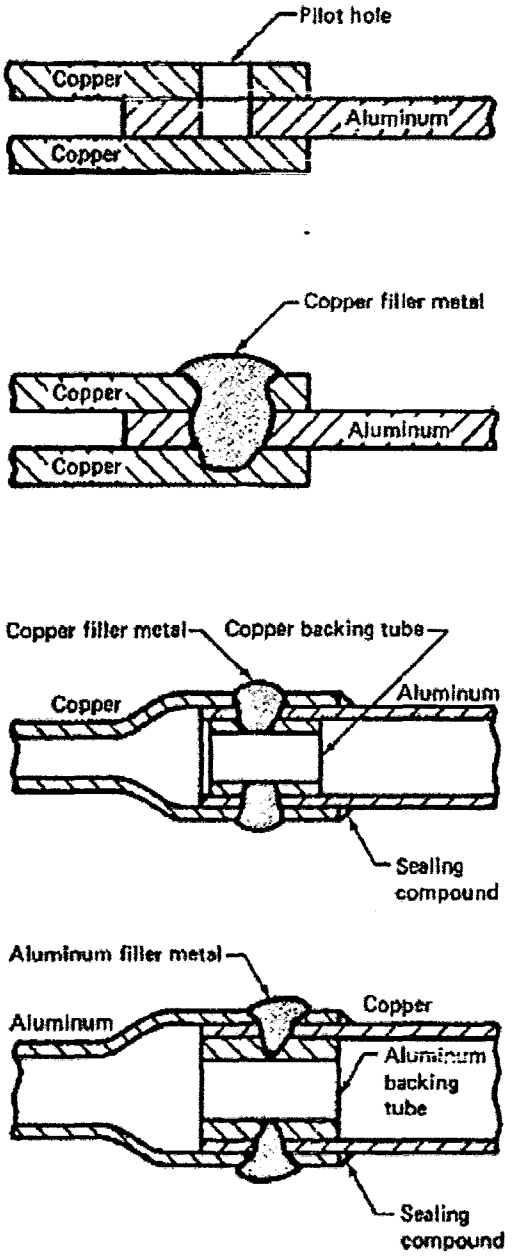
Authorized National Body

۶-۶- جوشکاری آلیاژهای آلومینیم به آلیاژهای مس

آلومینیم با بیشتر فلزات آهنی درحالت مذاب قابل اختلاط می باشد. اما معمولا ترکیبات بین فلزی شکننده ای در اثر اختلاط در حالت جامد تشکیل می دهد. این ترکیبات ترد معمولا محدود کننده استفاده از جوشکاری ذوبی جهت اتصال آلومینیم به فلزات دیگر می باشد که معمولاً شامل جوشکاری ذوبی آلومینیم به مس، آلومینیم به نیکل و آلومینیم به منیزیم نیز می شود.

جهت اتصال آلومینیم به مس، قبل از جوشکاری لایه ای از نقره یا آلیاژ نقره بر سطح مس اعمال می شود و اتصال با استفاده از فلز پرکننده ای از جنس آلومینیم یا آلومینیم – سیلیسیم انجام می پذیرد. علاوه بر نقره از آلومینیم، قلع و روی نیز برای پوشش دهی مس می توان استفاده کرد.

جهت اتصال آلومینیم به مس برای اتصالات الکتریکی می توان از جوشکاری قوسی نقطه ای با گاز محافظ استفاده کرد. همان طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است یک فلز بین دو لایه از فلز دیگر قرار می گیرد. سوراخی در دو لایه از سه لایه ایجاد می گردد با استفاده از قوس جوش نقطه ای، جوش از طریق این سوراخ با نفوذ به داخل عضو سوم و پر شدن سوراخ ایجاد می‌گردد. به منظور تطابق با عضو بالایی و پایینی یک فلز پرکننده مسی یا آلومینیمی مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش ترکیبات Al-Cu تردی در اطراف فلز جوش ایجاد می گردد اما در همانجا باقی می مانند.



شکل ۱۱: جوشکاری قوسی نقطه ای با گاز محافظ مس - آلومینیم[۱].

Authorized National Body

مراجع

۱-AWS Handbook, ۷th edition, ۱۹۹۷, Vol.۴,"Dissimilar metals".

Authorized National Body

پیشنهادات و انتقادات:

IWREC

Iranian Welding Research & Engineering

iiw
iis

Joining dissimilar materials