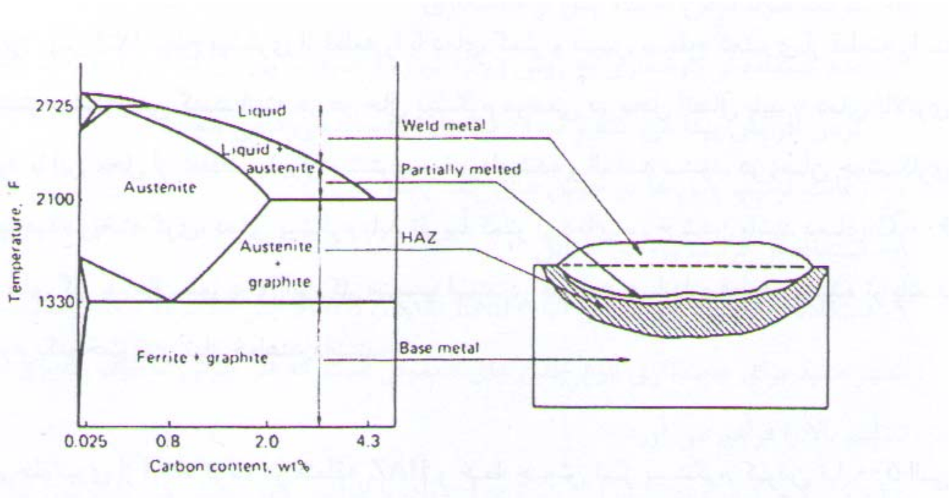
دانشگاه شهید رجایی

دانشکده مکانیک

جوشکاری چدنها



استاد: مهندس میراحمدی

گردآوری: جعفر زارعی

پاییز ۸٦

پیشگفتار :

جوشکاری یکی از مهم ترین فرایندهای ساخت و تولید در صنعت می باشد و در صنایع مختلف نظیر خودرو سازی ، نفت و گاز ، پتروشیمی ، تاسیسات و ساختمان و پل ها ، حمل و نقل ، کشتی سازی ، صنایع ریلی ، نیروگاه ها ، صنایع دفاعی و هوا فضا ، محصولات پزشکی ، الکترونیکی و تجهیزات دقیق و ..... کاربردهای فراوانی دارد . کشور ایران در حال پیمودن مسیر توسعه صنعتی بوده و از این رو صنعت جوش برای کشور از اهمیت ویژه ای برخوردار است . بنابراین آموزش منسجم و هماهنگ با جهان در این صنعت ، یکی از نیازهای مهم کشور تلقی می گردد .

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 اصلی ترین روش های 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 فعالیت های جوشکاری صورت گرفت . با توجه به تعدد استاندارد ها 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) نمودند . بعدها با حضور نمایندگان کشورهای صنعتی نظیر آمریکا و ژاپن و به دنبال آن کشورهای در حال توسعه ، سازمان جدیدی تحت عنوان انستیتو بین المللی جوش (IIW) تاسیس گردید . در حال حاضر انستیتو بین المللی جوش در تمام کشورهای عضو از جمله ایران دارای نماینده ای می باشد . این نماینده علاوه بر وظیفه 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 بهره گیری از سیستم آموزش و تاکید 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 فعالیت های پژوهشی و ارائه خدمات علمی ، فنی و مهندسی ، مشاوره و آموزش در زمینه های جوشکاری ، بازرسی و کنترل کیفیت تاسیس گردیده است .

عنوان	صفحه

مقدمه	۳
جوشکاری چدنها	۴
مشکلات اساسی در جوشکاری چدنها	۴
جوش پذیری وجوشکاری چدن سفید	۸
جوش پذیری وجوشکاری چدن خاکستری	۹
کنترل فاکتورهای موثربر جوش پذیری چدنها	۹
بررسی ساختار کریستالی مقطع جوش	11
دستورالعمل جوشکاری	۱۳
جوش کاری با فرایند قوس الکتریکی والکترود دستی	۲۲
انواع الکترود	۲۵
نکات تکنیکی	۲۹
نکاتی در ارتباط باجوشکاری چدنهای دیگر	۳۲

مقدمه :

چدن ها گروهی از آلیاژهای آهنی با خواص گوناگون و متنوع اند و به جای این کـه در حالـت جامـد روی آنهـا کـار انجام گیرد در حالت مذاب به شکل دلخواه ریخته گری می شوند . بر عکس فولادها که کمتر از ۲٪ کربن و معمـولاً کمتر از ۱٪ کربن دارند ، چدن ها ۲ تا ۴٪ کربن و ۱ تا ۳٪ سیلیسیم دارند . سایر عناصر فلزی و غیر فلزی نیز بـرای کنترل و ایجاد ویژگی های خاص اضافه می شوند . علاوه بر ترکیب شیمیایی ، عوامل مهم دیگـری از قبیـل فراینـد انجماد ، نرخ انجماد و عملیات گرمایی بعدی بر خواص آنها تاثیر می گذارد . چدن ها عـالی تـرین آلیاژهـای ریختـه گری اند و دارای گسترده ی وسیعی از استحکام و سختی و در بعضی موارد خواص ماشینکاری خوبی می باشند .

برای ایجاد مقاومت به سایش ، خراش و خوردگی به آنها عناصر آلیاژی اضافه می شود . اصولاً کاربرد وسیع چدن ها به دلیل هزینه ی کم و خواص مهندسی متنوع است . با وجود رقابت شدید مواد جدید ثابت شده است که چدن هـا با هزاران کاربرد مهندسی مناسب و مقرون به صرفه ی اقتصادی اند [۱] . اساساً چدن ها از آهن خـام کـه محـصول کوره ی بلند بوده تهیه می گردند . برای این کار آهن خام با ترکیب شیمیایی خواص را همراه با درصد مشخـصی از چدن و یا قراضه فولاد ذوب کرده ، پس از تنظیم ترکیب شیمیایی به کمک عناصر دیگری که به مـذاب اضـافه مـی کنند ، آن را در اشکال مورد نظر ریخته گری می نمایند .

جوشکاری چدن ها :

انجام عملیات جوشکاری روی قطعات ریخته شده چدنی به دلیل الزاماتی است که به برخی از مهمترین آنها اشاره شده است :

الف) برطرف کردن بعضی عیوب ریخته گری که پس از بیرون آوردن قطعه از قالب یا در حین تراشکاری ظاهر می شوند ، نظیر حفره های گازی ، حفره های ناشی از ریزش ماسه یا حبس سرباره ، ترک های موضعی ، کشیدگی یا تغییر ابعاد در بعضی مواضع کوچک .

ب) تعمیر قطعات مستهلک که از نظر اقتصادی یا عدم دسترسی به تکنولوژی ساخت آنها بهتر است که از طریق جوشکاری بازسازی شوند . این مورد خود دو حالت دارد : قطعات شکسته شده و قطعات سائیده شده و یا خورده شده .

ج) اتصال دو یا چند قطعه که ریختگی آن به صورت واحد با مشکلاتی همراه بوده یا از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیستند .

جوشهای انجام شده در موارد فوق از نظر کلی سه مشخصه ی زیر را دارند :

۱- جوش های تحت تنش ، که باید موضع جوش داده شده دارای حداقل خواص مکانیکی مورد نظر بوده یا با بقیه قطعه برابری کند .

۲- جوشهایی که تحت تنش قرار نمی گیرند و خواص مکانیکی آنها قابل مقایسه با قطعه ی مورد نظر نیاز نیست . غالباً قابلیت ماشین کاری و در بعضی موارد تطابق رنگ موضع جوش داده شده با بقیه ی قطعه لازم است . این حالت بیشتر در تعمیرات بعضی عیوب قطعات ریختگی مورد نظر است .

۳- مقاومت سطحی در مقابل خوردگی ، سائیدن ، خراش و اصطکاک در موضعی که فلز جوش رسوب داده شده ، درخواست می شود . در این موارد از فلز پرکننده خاصی با ترکیب شیمیایی ویژه استفاده می شود که بیشتر در مواضع سائیده شده قطعات چدنی مستهلک ، یا بالا بردن کارآیی قطعات چدنی نو کاربرد دارد . [۵]

مشکلات اساسی که در جوشکاری چدن ها به وجود می آید:

هنگامی که چدن تحت سیکل حرارتی جوشکاری قرار گیرد ، امکان دارد درجه حرارت بالا ، زمینه از کربن غنی شده و هنگام سریع سرد شدن کربن ترکیبی با فاز سخت و ترد نظیر سمنتیت یا کاربیدهای دیگر تولید شود و بدین ترتیب فلز جوش و یا منطقه ی مجاور آن اصطلاحاً الماسه شود (غیر قابل ماشین کاری) این اولین مشکل در جوشکاری چدن هاست .

گاه فاز سخت و ترد تحت تاثیر تنش های حرارتی ناشی از جوشکاری یا تنش های دیگر پسماند مقاومت نکرده و بر روی آن ترک هایی ایجاد می گردد . این اتفاق ممکن است در فلز جوش یا منطقه مجاور خط جوش به وجود آید . بنابراین دومین مشکل در عملیات جوشکاری چدن ها احتمال وقوع ترکیدگی در جوش یا منطقه مجاور آن می باشد .

عیب یا مشکل سومی که اغلب در جوشکاری چدن محاسبه حاصل می شود حفره ها و خلل و فرج است که باعث کاهش استحکام جوش و یا عدم موفقیت در آب بندی یک مخزن یا انبار چدنی می گردد . همانطور که اشاره شد کربن آزاد یا گرافیت در زمینه به طور فراوان وجود دارد . اگر این کربن در حین عملیات ذوب در جوشکاری با اکسیژن هوا تماس حاصل نماید و حتی در برخی مواقع بعضی اکسید ها را احیاء کند حباب های گاز CO_2 یا CO تولید می شود که می تواند از مذاب خارج شده و یا احیاناً حین انجماد در فلز جوش محبوس شده و خلل و فرج را به وجود آورند [۶].

در ادامه به بررسی برخی از عوامل متالورژیکی و متغییرهای جوشکاری و تاثیر آنها بر جوش پذیری چدن ها ، پرداخته خواهد شد .

پیشگرم کردن :

پیش گرم کردن قطعه ی مورد جوش و کنترل درجه ی حرارت بین پاسی موجب کاهش شیب حرارتی و در نتیجه تقلیل سرعت سرد شدن منطقه ی جوشکاری می شود . آرم سرد شدن ، احتمال تشکیل کاربید را در فلز جوش و مارتنزیت را در منطقه ی مجاور جوش کاهش می دهد . از طرف دیگر تنش های انبساطی و انقباضی نیز با پیشگرم کردن تقلیل می یابند . پیشگرم کردن می تواند به طور موضعی و توسط شعله انجام شده یا با قرار دادن قطعه در کوره یا محفظه های پیش ساخته شده شبیه کوره اعمال شود واضح است که پیشگرم کردن کل قطعه به دلیل عدم احتمال ایجاد تنش های داخلی در مواضع دیگر قطعه ترجیح داده می شود . درجه حرارت پیشگرم کردن به اندازه ، طرح ، میزان درجه ی مهار ، ساختار میکروسکوپی و خواص چدن ، نوع فلز پرکننده ، اندازه ی فلز جوش و روش

جوشکاری بستگی دارد . به عنوان مثال قطعات سنگین و ضخیم چون قابلیت جذب حرارت بیشتری دارند ، موجب سرد شدن سریع تر منطقه ی جوش می شوند نیاز به درجه حرارت پیشگرم کردن بالا تری دارند همچنین فلز جوش حجیم کندتر سرد شده ونیاز به درجه حرارت پیش گرم کردن پائین تری دارد (باید توجه داشت که فلز جوش طویل ، عمیق و بزرگ در مقابل ترک برداشتن حساس تر از فلز جوش کم عمق و کوتاه است) . در جدول ۷ محدوده دماهای پیشگرم و بین پاسی توصیه شده برای انواع چدن ها ارائه شده است . به طور کلی چدن های نشکن و چکش خوار فریتی ، نسبت به نوع پرلیتی به دلیل داکتیلیته بالاتر فریت نیاز به پیشگرم کمتری دارند .

جدول ۷: محدوده دمایی پیشگرم و بین پاسی برای جوشکاری چدنها [۳]

Type of cast iron	Matrix microstructure	Temperature range, °F: Arc welding	Temperature range, °F: Oxyacetylene welding
Gray	—	70 to 600	800 to 1200
Malleable	Ferritic	70 to 300	800 to 1200
Malleable	Pearlitic	70 to 600	800 to 1200
Ductile	Ferritic	70 to 300	400 to 1200
Ductile	Pearlitic	70 to 600	400 to 1200

a. A suitable preheat temperature for a particular application depends upon the welding process, filler metal, mass of the casting, welding process, and postweld heat treatment.

در جوش های چند پاسه درجه حرارت بین پاسی هم باید کنترل شود . این درجه حرارت نباید کمتر یا بیشتر از درجه حرارت پیشگرم کردن اولیه باشد . در قطعات سنگین گاهی اوقات لازم است تا برای نگهداشتن درجه حرارت بین پاسی معین در حین جوشکاری از منبع حرارتی دیگر برای گرم نگه داشتن قطعه کار استفاده نمود [۵] .

تاثیر مقدار حرارت ورودی و میزان شدت تمرکز آن و همچنین انتخاب نوع فلز پرکننده را بر دمای پیشگرم نباید نادیده گرفت . به عنوان مثال در جوشکاری اکسی استیلن به دلیل تمرکز حرارت کمتر لازم است که تمام قطعات چدنی پیشگرم شوند . همچنین زمانی که از فلز پرکننده چدنی استفاده می شود لازم است دمای پیشگرم بالایی انتخاب شود زیرا فلز جوش در دمای اتاق داکتیلیته کمی دارد . با کاربرد فلز پرکننده ای که رسوب آن دارای استحکام نسبتاً کم اما داکتیلیته مناسبی است مثل $ENi\text{-}C_1$ یا $EN\text{-}C_1\text{-}A$ ، می توان دمای پیشگرم را کمی بالاتر از دمای اتاق در نظر گرفت [۳] .

تکنیک رسوب دادن :

روشی که برای رسوب دادن فلز جوش انتخاب می شود ، اثر حرارتی متفاوتی روی فلز جوش دارد . ازدیاد سرعت جوشکاری موجب سریع تر شدن جوش شده و احتمال ایجاد ترک سرد و تشکیل مارتنزیت و کاربید افزایش می یابد

، در حالی که تاب برداشتن و پیچیدگی کاهش می یابد . با افزایش درجه حرارت پیش گرم نقش سرعت جوشکاری اهمیت کمتری پیدا می کند . شکل و اندازه ی حوضچه جوش و نحوه ی حرکت زیگزاگی الکترود یا مشعل نیز بر اثر حرارتی جوش موثر هستند . به عنوان مثال برخی از جوشکارها برای ایجاد حرارت بیشتر و سرد شدن آرامتر فلز جوش ، مبادرت به ایجاد حوضچه های جوش بزرگ و گرد می کنند . واضح است که هر چه حجم مذاب بیشتر باشد آرامتر سرد می شود و در حوضچه گرد از تمرکز تنش در گوشه و زوایا جلوگیری می شود . این خود تدبیر خوبی برای کاهش احتمال ترک برداشتن یا نرم شدن جوش است ، اما در مقابل احتمال ایجاد خلل و فرج در جوش افزایش می یابد ، چون هرچه حوضچه ی مذاب وسیع تر و عمیق تر باشد اولاً احتمال تماس هوا و عدم محافظت کامل مذاب توسط قوس یا شعله کمتر می گردد ، ثانیاً عمق زیاد مذاب ، احتمال محبوس شدن حباب های گازی را افزایش می دهد ، ثالثاً درصد ناخالصی ها نظیر فسفر که در فلز قطعه بیشتر از الکترود است در فلز جوش افزایش یافته و کیفیت جوش را پائین می آورد . بنابراین جوشکار باید در تکنیک رسوب دادن فلز و ایجاد حوضچه ی جوش ، بین عوامل فوق الذکر تعادل برقرار کند . حرکت زیگزاگی الکترود یا مشعل از نظر دامنه و فرکانس هم دارای مزایا و محدودیت هایی است که تقریباً شبیه مطالب بالاست .

سرباره ، فلاکس و گازهای محافظ :

در هنگام جوشکاری نوع مفتول یا الکترود به ویژه توسط قوس الکتریکی به درجه حرارت بالایی می رسند . این درجه حرارت علاوه بر این که می تواند موجب تبخیر بعضی عناصر شود ، در صورت عدم دقت ممکن است در تماس با اکسیژن هوا قسمتی از عناصر فعال را اکسید کند . واکنش های اکسیداسیون علاوه بر این که باعث کاهش برخی از عناصر در فلز جوش می شوند ، موجب ایجاد ذرات اکسید شده می شوند که اگر در مذاب محبوس شوند ، کیفیت اتصال را پائین می آورند . محافظت نوک مفتول توسط پوشش های مخصوص الکترود ، فلاکس یا روانساز ، گازهای شعله یا گازهای خنثی انجام می گیرد . مواد سرباره ساز می تواند به صورت پوشش همراه با الکترود یا مفتول بوده یا به طور جداگانه به شکل پودر یا خمیر به موضع مورد جوش اضافه شود .

عملیات حرارتی بعد از جوش (PWHT) :

حرارت دهی قطعه ی جوشکاری شده بلافاصله پس از جوشکاری یا بعد از سرد شدن به منظور تنش گیری یا کاهش سختی و بالا بردن قابلیت ماشین کاری انجام می گیرد . گاهی اوقات قطعه ی جوش داده شده ی گرم را در خاکستر داغ یا پوشش نسوز و عایق حرارتی قرار داده یا آن را با شعله ی آرام سرد می کنند . عملیات آنیل کردن

کامل ، نرمال کردن و انجام عملیات حرارتی مالیبل کردن هم بر روی قطعه ی جوش داده شده ی چدنی مرسوم است [۵].

انتخاب فلز پرکننده :

فاکتورهای مختلفی برای انتخاب فلز پرکننده برای جوشکاری چدن ها باید در نظر گرفته شود که مهمترین آنها عبارتند از :

۱- نوع چدن
۲- خواص مکانیکی مورد نظر در اتصال جوش داده شده
۳- تلرانس فلز پرکننده در ارتباط با درجه رقت توسط فلز پایه
۴- توانایی فلز جوش جهت آزاد سازی تنش های جوشکاری
۵- ماشینکاری پذیری منطقه ی جوش
۶- یکنواختی از جهت رنگ و زیبایی
۷- فرایند جوشکاری قابل اجرا
۸- هزینه

فلزات پرکننده در دسترس برای جوشکاری چدن ها توسط فرایندهای الکترود دستی ، توپودری ، میگ مگ ، و اکسی استیلن فراهم می باشند . به علاوه فلزات پرکننده ای نیز برای جوش برنج یا زرد جوش به کار می رود . در موارد خاصی چدن ها ممکن است با استفاده از فرایند تیگ و فلز پرکننده مناسب جوشکاری شوند [۳].

جوش پذیری و جوشکاری چدن سفید :

به طور کلی چدن های سفید قابل جوشکاری نیستند . تردی و شکنندگی بیش از حد این چدن ها سبب جوش ناپذیری آنها می باشد . در شرایط ویژه ای که چاره ای جز جوشکاری این نوع چدن وجود نداشته باشد استفاده از پرکننده های از جنس چدن سفید با روش گازی . یا E310 یا ER310 با روش های قوس الکتریکی با پیشگرم کردن در حدود 300° تا $۴۵۰^\circ C$ و آهسته سرد کردن پیش از جوشکاری و سپس انجام عملیات حرارتی تنش گیری در $۲۰۰^\circ C$ توصیه شده است .

پس از عملیات حرارتی و قبل از استفاده از قطعه ی تعمیر شده در سرویس کاری ، حتماً باید بازرسی های کافی و کاملی از قطعه به عمل آورد زیرا احتمال بروز ترک در جوش و HAZ بسیار زیاد است .

جوش پذیری و جوشکاری چدن خاکستری :

در این بخش جوشکاری چدن خاکستری مورد بررسی قرار خواهد گرفت . توجه به این نکته لازم است که بسیاری از نکاتی که در این قسمت ارائه شده است در ارتباط با جوشکاری وجوش پذیری چدن های چکش خوار و نشکن نیز صادق است .

فاکتورهای موثر برای جوش پذیری چدن ها عبارتند از :

۱- تنش های ناشی از سرد کردن
۲- شکل نامنظم قطعه ریخته گری شده
۳- سخت شدن ناحیه ی جوش و HAZ
۴- مقدار کربن موجود و باقی مانده در فلز پایه پس از جوشکاری
۵- آغشته بودن به روغن و چربی (روغن می تواناز طریق گرافیت ها و سوراخ های میکروسکوپی به داخل چدن نفوذ کرده و در طی جوشکاری بخار شده و سبب ایجاد حفره هایی در داخل جوش شود).

کنترل فاکتورهای موثر جوش پذیری چدن ها :

الف) برای کاهش تنش های ناشی از سرد شدن ، توجه به نکات زیر ضروری است :

۱- استفاده از پارامترهای صحیح جوشکاری
۲- استفاده از مهره جوش یا زنجیره های کوتاه جوش
۳- استفاده از شدت جریان کم
۴- طراحی صحیح برای ترتیب مهره جوش ها
۵- سرعت سرد کردن آهسته پس از جوشکاری
۶- عدم استفاده از جوشکاری به روش زیگزاگ ، زیرا حرارت ورودی در اثر زیگزاگ جوشکاری کردن افزایش پیدا می کند و میزان تنش های باقیمانده زیاد می شود .
۷- رعایت ترتیب پاس ها در جوش های چند پاسه
۸- استفاده از حرارت ورودی حداقل

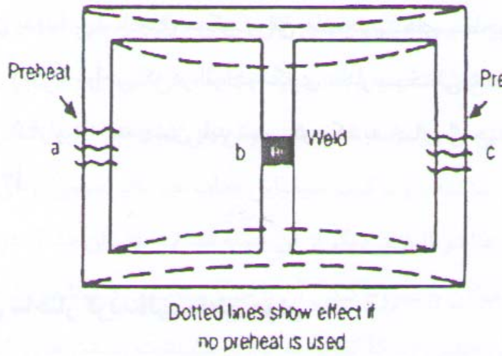
۹- استفاده از الکترود جوشکاری AWS A5,15 : ENiFe-Cl : این الکترود یک الکترود عمومی بسیار مفید برای جوشکاری انواع چدن های معمولی است که فلز جوش انعطاف پذیری با تنش تسلیم بالا را فراهم می آورد.

۱۰-پیشگرم کردن : تنش تسلیم بسیاری از مواد ، با افزایش دما کاهش می یابد . پس با پیشگرم کردن می توان مقدار تنش های پسماند را در قطعه به حداقل رساند .

۱۱- چکش زدن : چکش کاری با ایجاد تنش های مخالف تنش های پسماند ، سبب کاهش تنش های ایجاد شده ضمن جوشکاری می شود . چکش کاری سبک سطح هر جوش ، بلافاصله بعد از جوشکاری تنش های انقباضی را کاهش می دهد .

ب) برای اجتناب از ترک های ناشی از تنش های انقباضی جوشکاری در قطعات ریخته شده منبسط کردن قطعه با پیشگرم کردن بسیار موثر است . به این نوع پیشگرمایی اصطلاحاً پیشگرم غیر مستقیم می گویند . شکل ۱۳ طرح شماتیکی از این نوع پیشگرمایی را در خصوص یک قطعه چدنی نشان می دهد .

در این روش ابتدا سطح بیشتری از قطعه را با دمای کمتر و سپس سطح کمتری از قطعه را با دمای بیشتر پیشگرم می کنند . البته در هر حال پیشگرم موضعی در محل اتصال باید با دمای بالاتری انجام شود تا این محل از انعطاف پذیری بیشتری برخوردار شده و الماسه نشود . در زمان جوشکاری قطعات پیچیده ریخته گری، دمای پیشگرم باید تقریباً کمتر از دمای سرخ شدن باشد . دمای ۶۰۰°C در کوره های گاز یا زغال سوز برای این کار مناسب است . در مجموع هر اندازه قطعه پیچیده تر باشد به پیشگرم یکنواخت تری نیاز خواهند داشت.



شکل ۱۳: پیشگرمایی غیر مستقیم [۲]

پ) برای جلوگیری از ایجاد ترک در منطقه HAZ و خط جوش نیز پیشگرم کردن تا 500 الی ۶۰۰ °C توصیه شده است . استفاده از آمپر کمتر در جوشکاری نیز موثر می باشد .

ت) پدیده جذب کربن موجود در چدن توسط فلز جوش تقریباً در کلیه چدن های در حال جوشکاری اتفاق می افتد و برای جلوگیری و یا کاهش آن دو راه وجود دارد :

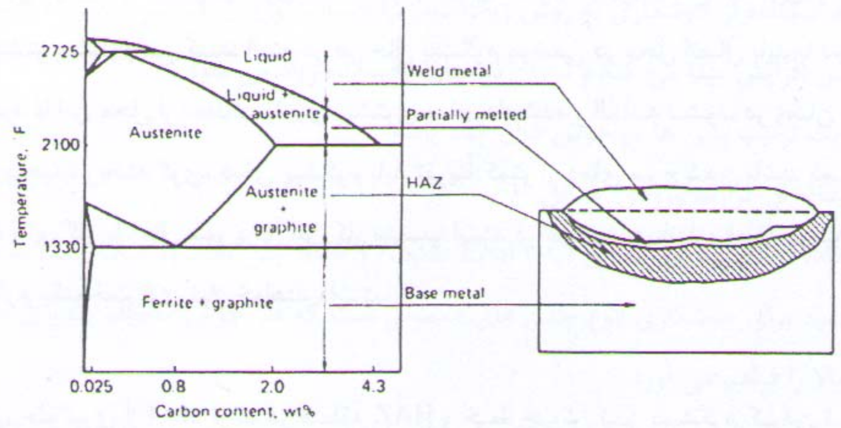
راه اول : پیشگرم با دمای بالا و سرد کردن آهسته . این عمل وقتی ضروری است که از مواد مصرفی با پایه ی آهنی استفاده شود .

راه دوم : استفاده از فلزات پرکننده پایه نیکلی

ث) آغشته شدن و جذب روغن توسط چدن در اثر نفوذ روغن در عمق چدن اتفاق می افتد . برای جلوگیری از بروز این پدیده باید تا جای ممکن روغن ها و چربی های سطحی روی قطعه ی کار را پاک کرد و به جای روغن زدن به نواحی ای که در اثر جوشکاری دچار سوختگی شده اند ، قطعه را به مدت چهار ۴ تا هشت ۸ ساعت در$500^{\circ}C$ قرار داد . همچنین باید سعی کرد که به جای گوجینگ (شیار زنی) از سنگ زدن استفاده نمود [۲].

بررسی ساختار کریستالی مقطع جوش :

بررسی ساختار کریستالی چدن و مقطع جوش نشان می دهد که یک جوش تحت تاثیر عوامل گوناگون مطابق با شکل ۱۴ شامل سه قسمت است .



شکل ۱۴: طرح شماتیک از مقطع یک جوش در مقایسه با اثر حرارتی ناشی از دیاگرام آهن- کربن [۲]

۱- بخش مذاب یا حوضچه ی مذاب اصلی جامد شده (Weld Metal)

همانطور که قبلاً اشاره شد غالب روش های جوشکاری بر روی چدن با الکترودهای مصرفی بوده و منطقه یا حوضچه ی مذاب دارای ترکیبی از فلز قطعه کار ذوب شده و سیم جوش است . اگر عملیات به نحوی باشد که منطقه ی

ذوب کم عمقی ایجاد کند ، طبیعتاً آنالیز آن به ترکیب شیمیایی مفتول پرکننده نزدیک تر می باشد در حالی که فرایندی با نفوذ عمیق ، رسوبی با آنالیزی نزدیک به فلز قطعه کار ایجاد می کند . در بسیاری موارد با تنظیم میزان ذوب یا درجه رقت می توان کیفیت جوش را کنترل کرد .

هنگامی که چدن مذاب سریع سرد شود ، کربن فرصت کافی برای آزاد شدن به صورت گرافیت را نداشته و به صورت سمنتیت یا بعضی کاربیدهای دیگر درمی آید . اگر مقدار سمنتیت تشکیل شده زیاد باشد مقطع شکست به رنگ سفید مشاهده می شود و چون این ترکیب بسیار سخت و شکننده می باشد باعث تردی و الماسه شدن فلز جوش می شود . تمایل به تشکیل سمنتیت تنها به سرعت سرد شدن بستگی نداشته ، و ترکیب شیمیایی مذاب هم تاثیر مهمی بر آن دارد . میزان کربن ، سیلیسیم ، منگنز و بعضی عناصر آلیاژی دیگر از آن جمله اند . به عنوان مثال در صورت استفاده از الکترود فولادی ، در اثر ذوب آن و ممزوج شدن آن با چدن مذاب و رقیق شدن ترکیب حاصله از نظر کربن و سیلیسیم ، می توان حدس زد که تمایل به ایجاد سمنتیت بیشتر می شود . بنابراین ایجاد گرافیت آزاد و زمینه ی نرم در منطقه ی ذوب به سرعت سرد شدن آرام و وجود کربن و سیلیسیم و اصولاً عناصر گرافیت زای کافی در مذاب نیاز دارد ، البته توجه به این نکته مهم است که مقداری از این عناصر ممکن است در تماس با اکسیژن هوا در حین جوشکاری اکسید شوند . واضح است که گرافیت کروی هم هنگامی در این منطقه به وجود می آید که تکنیک جوشکاری صحیح بوده و عناصر ایجاد کننده ی گرافیت کروی (نظیر Mg و Ce) در مذاب به مقدار کافی موجود باشند . [۵] .

۲- بخش ذوب جزیی در حوضچه ی جوش (Partially Metal Region)

بخش ذوب جزیی در واقع یک ناحیه ی انتهایی از HAZ در مجاورت حوضچه ی جوش است که به درجه ی حرارت نسبتاً بالا رسیده اما کاملاً ذوب نشده تا در بخش مذاب مخلوط شود . مذاب موجود در این ناحیه شبیه چدن مذاب یوتکتیک است که مثل چدن سفید سرد شده است و ساختار کریستالی بخش ذوب جزیی مخلوطی است از انواع فازهای مارتنزیت ، آستنیت ، کاربیدهای اولیه و لدبوریت که تعدادی از گرافیت های آن کروی شده و تعدادی ورقه ای باقی مانده اند . این ناحیه همچنین محل مناسبی برای تجمع بعضی ترکیبات و فازهاست که دارای نقطه ی ذوب کمتری هستند . از جمله این فازها ، باید به ترکیب یوتکتیکی آهن و فسفر (استدیت) اشاره کرد که در حین سرد شدن ، فازهای بسیار ترد و شکست را فراهم می آورد . برای کنترل مشکلات ، محاسبه و کنترل دمای بین پاسی ، پیشگرمایی و حرارت ورودی توصیه می شود . استفاده از الکترود یا مفتول های زود ذوب نیز در کاهش خطر

بروز ترک ها در این ناحیه موثر است . به هر حال با روش های سعی و خطا می توان به یک دستورالعمل مناسب برای جوشکاری دست یافت .

۳- ناحیه ی متاثر از حرارت (HAZ)

هر چند منطقه ی HAZ ذوب نمی شود ، اما درجه حرارت آن تا حدی بالا می رود که ساختار ، وارد محدوده آستنیت شده و پس از سرد شدن در اثر استحاله ناگهانی به مارتنزیت ترد و شکننده تبدیل شود . اگر چدن خاکستری فریتی باشد ، کربن موجود در ساختار آن به صورت گرافیت های آزاد هستند بنابراین برای تبدیل گرافیت ها به کربن های مارتنزیتی در اثر فرایند نفوذ به زمان طولانی نیاز است که فرایند جوشکاری و سرد شدن پس از آن این اجازه را به چدن خاکستری فریتی نخواهند داد . پس در منطقه ی HAZ این چدن بعد از سرد شدن فاز فریت دیده خواهند شد . اگر چدن خاکستری پرلیتی باشد مقدار کربن ترکیبی آن (Fe_3C) زیاد بوده و در آستنیت حل می شود که در هنگام سرد شدن ، تولید مارتنزیت می کند . برای جلوگیری و یا تصحیح این ساختار باید به نکات زیر توجه نمود :

- استفاده از پیشگرم و کنترل درجه حرارت بین پاسی
- استفاده از روش های جوشکاری چند پاسی به جای جوشکاری تک پاسی
- استفاده از پس گرم شامل تنش زدایی و آنیل کردن

به دلیل ورقه ای بودن گرافیت های موجود در چدن خاکستری ، کربن موجود در این چدن به راحتی وارد حوضچه جوش شده ، در نتیجه موجب تردی فلز جوش پس از سرد شدن خواهد شد . به همین دلیل برای جوشکاری چدن خاکستری باید از فرایندهای جوشکاری ، مواد مصرفی و عملیات حرارتی مناسب استفاده کرد .

دستورالعمل جوشکاری :

الف) تمیز کاری :

قبل از شروع جوشکاری ، باید کلیه ی سطوح را به خوبی پاک کرد . به طور کلی چدن ممکن است از طریق دو نوع اصلی از مواد آلوده باشد :

۱- روغن ، گریس و غیره : هنگامی که چدن برای مدت طولانی در معرض روغن ، گریس و یا مواد چربی مشابه قرار گیرد ، روغن از طریق گرافیت ها ، حفره ها و منافذ میکروسکوپی موجود در سطح به داخل ساختار چدن نفوذ می کند و در هنگام جوشکاری به دلیل افزایش درجه حرارت ، بخار شده و تولید حفره های گازی خطرناکی در عمق قطعه ریختگی می نماید . برای از بین بردن روغن نفوذ کرده در عمق قطعه چدنی ، گریس و روغن زدایی شیمیایی سطح کافی نیست ، بلکه باید برای چند ساعت در دمای 400 تا $500^{\circ}C$ قرار گیرد تا روغن نفوذی بخار شده و از همان منافذ خارج شود . البته همیشه امکان پذیر نیست ، به همین دلیل در مواردی که حرارت دادن و سوزاندن روغن وجود ندارد ، استفاده از عملیات شیارزنی به وسیله الکترود کربنی به صورت موضعی برای پخ زدن لبه ها توصیه شده است که هم باعث زدودن روغن می شود و هم لبه سازی را انجام می دهد . اما ممکن است موجب ادامه رشد ترکها و افزایش تردی منطقه HAZ شود .

۲- موارد خارجی ، پوسته های باقی مانده ناشی از ریخته گری ، رنگ و غیره : با برس زدن و در صورت لزوم سنگ زدن دو طرف محل اتصال تا فاصله تا فاصله 20mm از هر طرف ، می توان این عیوب را به سادگی از بین برد . البته می توان قطعه را برای مدت ۱۵ تا ۳۰ دقیقه در درجه ی حرارت 300 تا $500^{\circ}C$ نیز قرار داد .

ب) آماده سازی محل اتصال :

۱- زاویه ی درز جوش در چدن ها باید پهن تر و باز تر از زاویه ی درز جوش در فولادهای کربنی در نظر گرفته شود . زاویه ای معادل 60 تا 90 درجه برای جوشکاری چدن توصیه می شود .

۲- تمامی زوایای تیز ، باید تا جای ممکن گرد شوند تا از تمرکز حرارت و تنش جلوگیری به عمل آید .

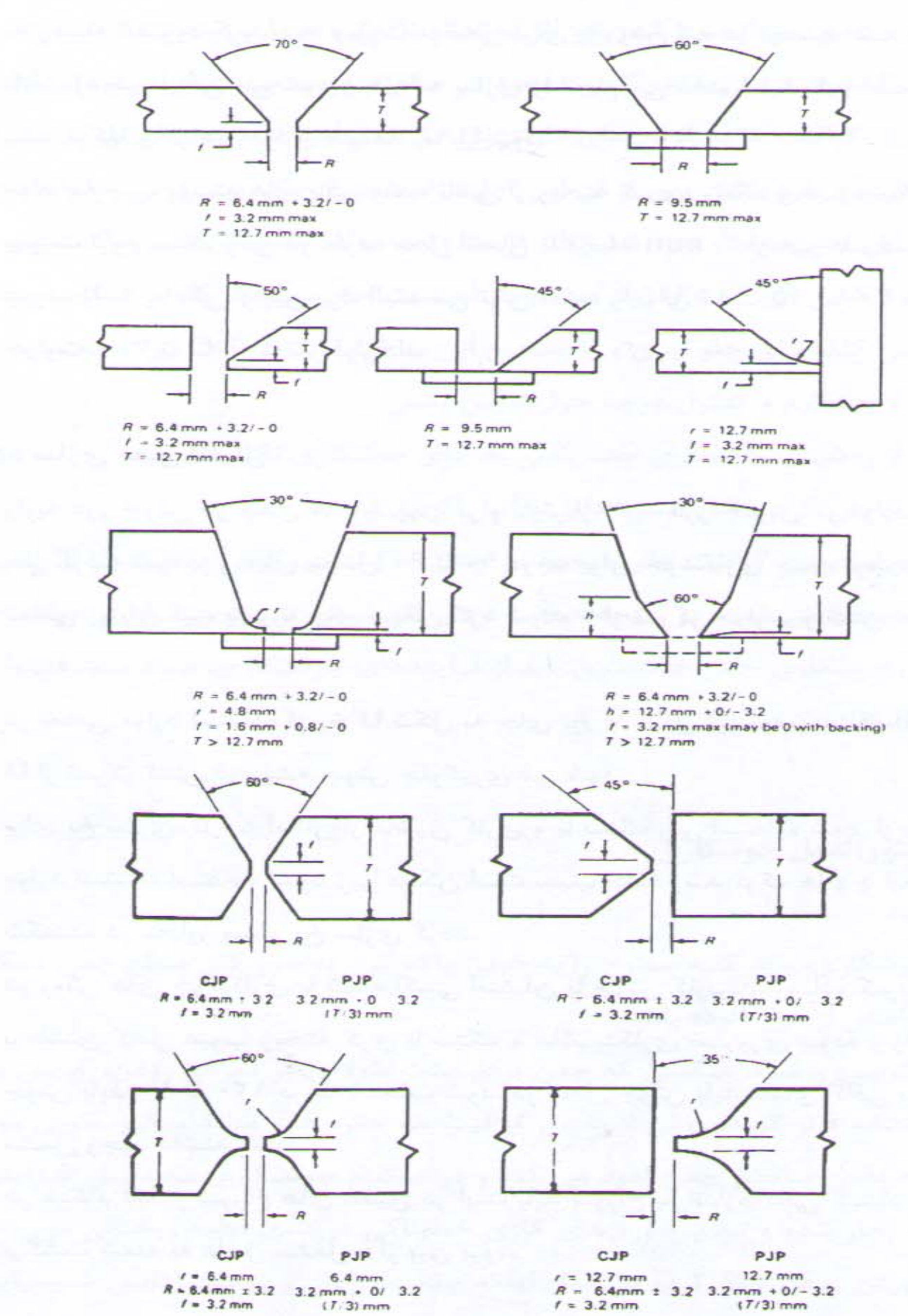
۳- در بعضی موارد استفاده از پخ Uشکل به جای پخ V شکل نیز توصیه شده است ، زیرا در پخ U از تمرکز تنش دریچه ی جوش جلوگیری می شود .

۴- برای پخ سازی ، تا حد امکان از ماشین کاری و یا سنگ زنی استفاده شود . از شیار زنی به جز در موارد استثناء استفاده نشود زیرا ممکن است سبب ادامه ی رشد ترک ها و یا ایجاد منطقه ی ترد و شکننده در مجاور مسیر پخ سازی گردد .

۵- در روش های جوشکاری با شعله ی اکسی استیلن یا جوش کاربید ، آماده کـردن لبـه ی اتـصال و برداشـتن کامل عیوب ریخته گری با سنگ یا ماشین کاری ضروری بوده و زاویه ی پخ یا درز جـوش بایـد ۹۰ تـا ۱۲۰ درجـه انتخاب شود . در محل جوش باید فضای کافی برای حرکت نوک مشعل وجود داشته باشد .

۶- در هنگام تعمیر سوراخ های عمیق در ابتدا باید سوراخ به اندازه ی کافی گشاد شود و فقط تا امکان برگـشت شعله به داخل مشعل از بین برود .

۷- استفاده از پخ های دو طرفه ی X با جوش دو طرفه در کاهش احتمال پیچیدگی مـوثر اسـت . در شـکل ۱۵ روش های آماده سازی اتصالات برای جوشکاری چدن ها نشان داده شده است .



شکل ۱۵: آماده سازی اتصالات برای جوشکاری چدنها [۷]

پ) پیشگرم کردن و کنترل درجه ی حرارت بین پاسی

پیشگرم کردن قطعه ی چدنی مورد جوش و کنترل درجه ی حرارت بین پاسی ، موجب کاهش شیب حرارتی و در نتیجه باعث کاهش سرعت سرد شدن جوش می گردد . در نتیجه ، احتمال ایجاد کاربید (سمنتیت) را در فلز جوش و مارتنزیت را در منطقه ی HAZ کاهش می دهد . از طرفی دیگر تنش های انبساطی و انقباضی ، عدم انعطاف پذیری کافی و ترک ها نیز با پیشگرم کردن تقلیل داده می شوند .

سه روش برای پیشگرم کردن چدن وجود دارد :

۱- پیشگرم کردن موضعی توسط شعله یا المنت ، برای کاهش نرخ سرد شدن جوش بسیار موثر است . برای این منظور باید قطعه کار را به گونه ای قرار داد که مسیر پیشگرم کردن باعث تمرکز تنش در موضع خاصی نشود .

۲- پیشگرم عمومی به علت احتمال ایجاد تنش های داخلی در مواضع دیگر قطعه نسبت به پیش گرمایی موضعی ترجیح داده می شود . افزایش دمای پیشگرم خارجی در نواحی سه گانه ی جوش ، HAZ و فلز پایه سبب کاهش سختی می گردد . اگر چه دمای پیشگرم عمومی برای چدن های خاکستری در حدود درجه ی حرارت تشکیل مارتنزیت توصیه می شود ، اما برای اطمینان از عدم حضور مارتنزیت در ترکیب ، استفاده از دمای $370^{\circ}C$ برای قطعات چدنی معمولی و دمای پیش گرم 590 تا $650\ ^{\circ}C$ برای قطعات سنگین ، پیچیده و ضخیم توصیه شده است .

۳- پیشگرم غیر مستقیم : در پیشگرم غیر مستقیم ، قطعه قبل از جوشکاری منبسط می شود بنابراین ترک ها باز شده و پس از جوشکاری مجدداً متراکم و به هم فشرده می شوند بنابراین از بروز تنش ها و ترک های انقباضی جلوگیری به عمل می آید .

پیشگرم را می توان در انواع زیر به کار برد :

- درجه ی حرارت ۸۰ تا ۱۰۰ درجه ی سانتیگراد : در این درجه ی حرارت ، تمامی رطوبت سطح چدن خشک شده وامکان نفوذ هیدروژن از هوای مرطوب و اطراف به داخل جوش از بین می رود .
- درجه ی حرارت ۲۰۰ تا ۲۵۰ درجه ی سانتیگراد : این دما معمولاً برای پیشگرم کردن چدن های نشکن به کار می رود و از تشکیل مارتنزیت در منطقه ی HAZ جلوگیری می کند . پیشگرم در ۳۰۰ تا ۵۰۰

درجه ی سانتی گراد بیشتر توصیه می شود ، زیرا از رسوب سمنتیت پرویوتکتوئید که انعطاف پذیری را به طور قابل ملاحظه ای کم می کند ، جلوگیری می نماید .

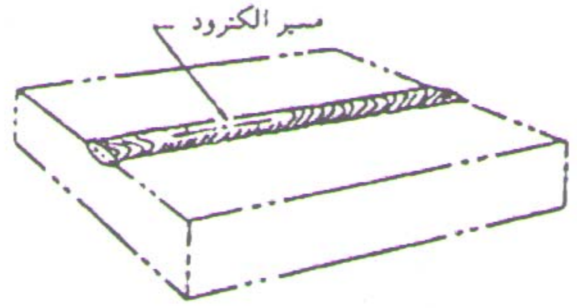
- درجه ی حرارت بیش از ۵۰۰ درجه ی سانتیگراد : به طور کلی این دما بیشتر برای پیشگرم کردن غیر مستقیم استفاده می شود و هر چه دما بالاتر باشد ، نتایج به دست آمده بهتر خواهد بود ، مشروط بر آنکه سرعت گرم و سرد کردن آهسته باشد .
- درجه ی حرارت ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه ی سانتیگراد : در این دما می توان مطمئن بود که کمترین احتمال بروز سختی و تردی در HAZ وجود دارد .

ت) فنون جوشکاری چدن ها :

از مهمترین فنون جوشکاری کنترل حرارت ورودی است . یکی از راه های کنترل یا کاهش حرارت ورودی ، انتخاب صحیح نوع زنجیره های جوش می باشد .

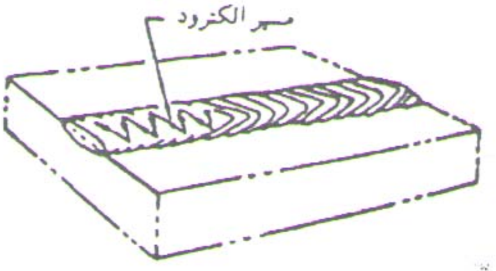
به طور کلی دو نوع دانه ی زنجیری برای جوش وجود دارد :

۱- مهره ی جوش یا دانه ی زنجیری رگه ای یا پله ای : پاس جوشی را که با پس و پیش رفتن کم یا بدون پس و پیش رفتن (بدون زیگ زاگ) الکترود انجام می گیرد ، مهره ی جوش یا دانه ی زنجیری رگه ای (پله ای) می گویند . (شکل ۱۶)



شکل ۱۶: مهره جوش رگه ای یا پله ای [۲]

۲- مهره ی جوش یا دانه ی زنجیری زیگ زاگی (بافته ای) : نوعی مهره ی جوشی را که با حرکت نوسانی عرضی صورت گرفته و جوشکار با نوسان دست (الکترود) به طرفین خط جوش به حالت زیگ زاگ جوشکاری می کند مهره ی جوش دانه ی زنجیری زیگ زاگی (بافته ای) می گویند . (شکل ۱۷)

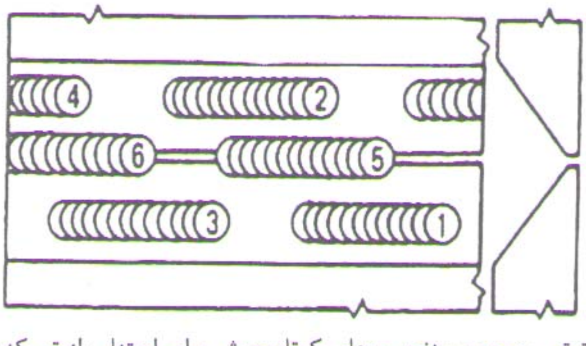


شکل ۱۷: مهره جوش زیگزاگی یا بافته ای [۲]

حرارت ورودی همواره در حالت رگه ای یا پله ای کمتر از حالت زیگ زاگی است . در حالت خاص اگر به حالت زیگ زاگی احتیاج باشد ، توجه به این نکته ضروری است که عرض زیگ زاگ یا پس و پیش رفتن الکترود ، هرگز نباید از دو یا سه برابر قطر الکترود بیشتر باشد .

ث) رعایت ترتیب در جوشکاری کوتاه زمانه :

یکی دیگر از روش های کنترل حرارت ورودی به ویژه در جوشهای ترمیمی و روکش سازی با جوش استفاده از جوش های با زنجیره های رگه ای کوتاه و تکه تکه (بخیه جوش) در سطح چدن است . به طوری که پس از جوشکاری در یک طول کوتاه ، اجازه داده می شود تا جوش ۳۰ تا ۴۰ درجه سرد شود و سپس خط بعدی جوش در نقطه ای تقریباً قرینه ی آن اعمال گردد . (شکل ۱۸)

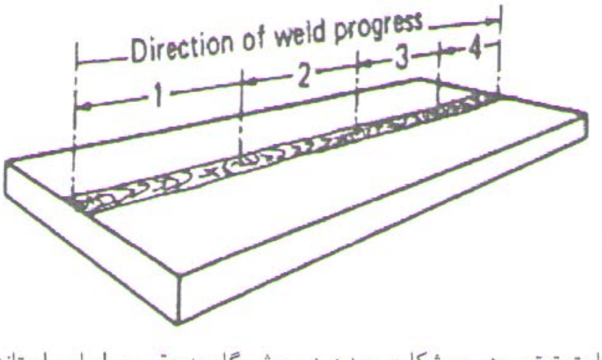


شکل ۱۸: استفاده از ترتیب صحیح و زنجیره های کوتاه جوش برای اجتناب از تمرکز تنش های اضافی [۲]

چکش کاری این جوشهای کوتاه قبل از سرد شدن آنها می تواند سبب کاهش تنش ها شود . این تکنیک به جوشکار این امکان را می دهد که جوش های بعدی را در جوش های قبلی رسوب دهد .

ج) فن گام به عقب یا برگشت به عقب :

فن خاصی است که در جوشکاری به هنگام تعویض الکترود یا سایر مواقع باید انجام داد تا عیـوب کمتـری در محـل تعویض الکترود به وجود آید . در این فن در انتهای الکترود کمی طول قوس را زیاد کرده روی گرده جـوش برگـشت داده می شود سپس الکترود جدید چند میلی متر جلوتر روشن و به محـل انتهـای جـوش رسـوب داده شـده قبلـی حرکت داده و در نهایت در مسیر و در جهت اصلی جوشکاری بر می گردد . البته ممکن است برای جلوگیری از تاب برداشتن و پیچیدگی قطعه هنگام جوشکاری طول جوش به چند قسمت ۲۰ تـا ۳۰cm تقـسیم شـود و جوشـکاری مطابق شماره های ترتیب داده شده انجام گیرد . در نتیجه تنش های انقباضی طولی و عرضی کاهش می یابند . این عمل به وسیله ی زنجیره های کوتاه جوش که در شکل ۱۹ نمایش داده شده قابل انجام است .



شکل ۱۹: رعایت ترتیب در جوشکاری چدن در روش گام به عقب بر اساس استاندارد AWS [۲]

ح) چکش کاری :

چکش کاری به منظور ایجاد تنش مخالف تنش های پسماند انجام می شود و معمـولاً موجـب کـاهش تـنش هـای ایجاد شده ضمن جوشکاری می شود . چکش زدن آهسته علاوه بر کاهش تنش های انقباضی اگـر بلافاصـله بعـد از جوشکاری انجام شود باعث پخش شدن فلز جوش در اتصال خواهد شد کـه کـاهش پیچیـدگی قطعـه را بـه دنبـال خواهد داشت و در نهایت ساختار کریستالی جوش و HAZ را منظم می کند . چکـش زدن بایـد در فواصـل ۱۰ تـا ۲۰ mm اطراف جوش بلافاصله بعد از اتمام جوشکاری و درحالی که هنز فلز به رنگ قرمز است انجام گیرد . [۲].

خ) عملیات جوشکاری :

به طور کلی در جوشکاری قطعات چدنی با قوس الکتریکی دو تکنیک به کار می رود .

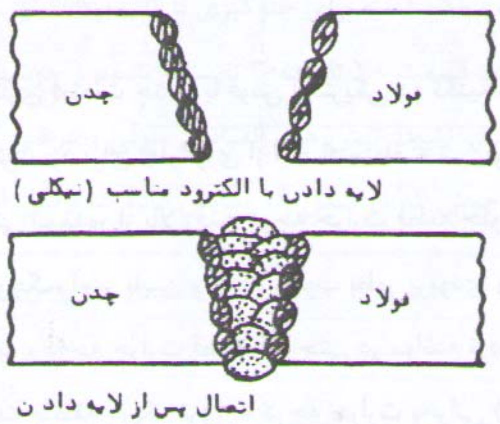
جوش سرد و جوش گرم .

در روش جوش سرد برای جلوگیری از ایجاد منطقه ترد و شکننده در مجاور مسیر جوش سعی می شود تا حتی المقدور از بالا رفتن درجه حرارت قطعه جلوگیری شود ، بدین معنی که با به کار بردن الکترودهای کوچک ، آمپر پائین و انجام رسوب به طور پریودی و زمان های کوتاه و توقف برای سرد شدن منطقه جوش ، درجه حرارت قطعه کار حتی در مواضع نزدیک خط اتصال پائین نگه داشته می شود . بدین صورت منطقه باریک تری به درجه حرارت بحرانی (برای حل شدن کربن در آستنیت و احیاناً برگشت به صورت مارتنزیت و یا فاز ترد دیگر) می رسد . اگر جنس الکترود مناسب انتخاب شود و مشکلی از نظر الماسه شدن فلز جوش یا ایجاد ترک در فلز جوش در پیش نباشد ، احتمال وقوع ترک در منطقه مجاور خط جوش کاهش می یابد و این منطقه بسیار باریک می گردد .

در روش های جوش گرم که اکثر عملیات جوشکاری بر روی چدن با این طریق انجام می گیرد با پیشگرم کردن قطعه تا $200^{\circ}C$ یا بیشتر و کنترل سرعت سرد شدن پس از عملیات جوشکاری ساختار میکروسکوپی زمینه در فلز جوش و به ویژه منطقه ی مجاور خط جوش کنترل می شود . بدین ترتیب از به وجود آمدن فاز ترد و تنش ها جلوگیری می شود [۵].

به طور کلی سه نوع فرایند یا فن جوشکاری برای اتصال قطعات چدنی مورد نیاز است که در ادامه به آنها اشاره شده است :

- جوش های لایه ای یا آستر کشی : گاهی اوقات برای اتصال دو قطعه چدنی هم جنس یا غیر هم جنس ابتدا روی هر یک از لبه های اتصال چندین لایه جوش رسوب می دهند . به این ترتیب ترکیب یک فلز را به کمک الکترود یا مفتول های مورد نظر به ترکیب فلز دیگر نزدیک می نمایند و پس از سنگ زدن ، لایه سازی را روی لایه جدید انجام و سپس جوشکاری را شروع می کنند . استفاده از آسترکشی در شکل ۲۰ نشان داده شده است . استفاده از این تکنیک ، به منظور جلوگیری از ایجاد فازهای ترد و شکننده در جوش های غیر مشابه یا غیر همجنس ، مفید می باشد .

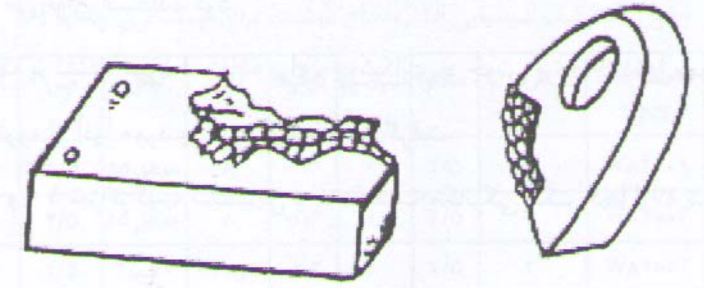


شکل ۲۰: روش جوشکاری لایه ای یا آسترکشی برای اتصال یک قطعه فولادی به یک قطعه چدنی [۲]

- جوش های آسترکشی تک لایه ای : در این نوع عملیات جوشکاری ، هرچند ممکن است تعداد پاس های جوش زیاد باشد اما همه پاس ها در یک لایه انجام می شوند و لایه ای بالای آن قرار نخواهد گرفت . در این فن جوشکاری ، تمامی فلز جوش به صورت یک لایه روی فلز پایه پهن می شود . این عمل ممکن است برای پیشگرم کردن به کار رود .
- جوش های آسترکشی چند لایه ای : در این روش چندین لایه یا قشر روی هم رسوب داده می شود که گاهی به دلایل متالوژیکی ممکن است لایه های دارای ترکیبات و خواص مختلف باشند . این روش برای اهداف زیر استفاده می شود :

- جوشکاری قطعه فولادی به یک قطعه چدنی یا قطعه ی چدنی به فلزات دیگر :

یکی از کاربردهای روش جوش های چند لایه ای اتصال مستقیم قطعه فولادی یا غیره به قطعه چدنی است . در این عمل باید از اتصال مستقیم فولاد به چدن جلوگیری شود زیرا فلز جوش حاصل از ذوب شدن و امتزاج دو فلز (کربن فولاد ۰/۲ درصد و کربن چدن حدود ۳/۵ درصد) با کربن معادل ۱/۸ درصد ، با ترکیب شیمیایی هیچکدام از الکترودهای پایه نیکلی همخوانی ندارد و تردی و شکنندگی جوش بسیار زیاد خواهد شد . در نتیجه ابتدا چندین لایه جوش روی هر یک از لبه های چدن و فولاد به طور جداگانه رسوب داده می شود و سپس بعد از لبه سازی روی لایه های جدید جوشکاری شروع می شود . (شکل ۲۱) .



شکل ۲۱: استفاده از فرآیند آسترکشی چند لایه ای برای جوشکاری چدن های خاکستری [۲]

از مهمترین مزایای این روش می توان به موارد زیر اشاره نمود :

۱- از آنجایی که تنش های انقباضی ناشی از سرد شدن فلز جوش در لایه های زنجیره جوش های بعدی خنثی می شوند با کاهش تمرکز تنش خطر بروز ترک ها نیز به حداقل می رسد .

۲- حرارت ناشی از زنجیره های جوش های بعدی منطقه HAZ ناشی از لایه های پیشین را آنیل نموده و با کاهش تمرکز تنش ، خطر بروز ترک ها را به این طریق نیز تقلیل می دهد .

- بازسازی سطوح بزرگ و پهناور آسیب دیده و خورده شده یک قطعه بزرگ چدنی :

برای این منظور نیز روش کار شبیه حالت قبلا است فقط باید نوع مواد مصرفی با توجه به خورندگی محیط کاری قطعه انتخاب شود . از مهره جوش یا دانه زنجیره جوش های رگه ای کوتاه استفاده شده ، سپس چکش زدن انجام می گیرد و از ساده ترین فرآیندهای جوشکاری نیز کمک گرفته می شود . همچنین باید سعی کرد که تمامی زنجیره جوش های جدید از نظر فیزیکی اتصال کاملی با جوش قبلی یا لایه ی پیشین برقرار کند تا خود نیز موجب فراهم شدن محیطی مناسب برای بروز خوردگی نباشد .

- جایگزین کردن یک قطعه پوسیده یا تخریب شدن با یک ورق فولاد کربنی [۲].

جوشکاری با فرایند قوس الکتریکی و الکترود دستی (MMAW)

در جوشکاری با قوس الکتریکی قطعات چدنی با توجه به خواص فلز جوش و کاربرد از فلزات پرکننده مختلفی می توان استفاده کرد .

در جدول ۸ ، فلزات پرکننده مورد استفاده برای جوشکاری و جوش برنج چدن ها معرفی شده اند . در ادامه خـواص هر گروه از آنها مورد بررسی قرار خواهد گرفت .

در جداول ۹ و ۱۰ نیز ترکیب شیمیایی و مشخصات مکانیکی الکترودها ارائه شده است .

جدول ۸: فلزات پرکننده مورد استفاده برای جوشکاری و جوش برنج چدنها [۳]

Description	Form	Applicable process[a]	AWS Specification	AWS Classification
		Cast iron		
Gray iron	Welding rod	OAW	A5.15	RCI
Gray iron	Bare electrode	BMAW	-	-
Alloy gray iron	Welding rod	OAW	A5.15	RCI-A
Ductile iron	Welding rod	OAW	A5.15	RCI-B
		Steel		
Carbon steel	Covered electrode	SMAW	A5.15	ESt
Carbon steel	Covered electrode	SMAW	A5.1	E7018
Carbon steel	Bare electrode	GMAW	A5.18	E70S-2
		Nickel alloys		
93% Ni	Bare electrode	GMAW	A5.14	ERNi-1
				ENi-CI
95% Ni	Covered electrode	SMAW	A5.15	ENi-CI-A
				ENiFe-CI
53 Ni-45 FE	Covered electrode	SMAW	A5.15	ENiFe-CI-A
53 Ni-45 Fe	Flux cored electrode	FCAW	-	-
55 Ni-40 Cu-4 Fe	Covered electrode	SMAW	A5.15	ENiCu-A
65 Ni-30 Cu-4 Fe	Covered electrode	SMAW	A5.15	ENiCu-B
		Copper alloys		
Low fuming brass	Welding rod	OAW	A5.27	RCuZn-B
Low fuming brass	Welding rod	OAW	A5.27	RCuZn-C
Nickel brass	Welding rod	OAW	A5.27	RBCuZn-D
Copper-tin	Covered electrode	SMAW	A5.6	ECuSn-A
Copper-tin	Bare electrode	GMAW	A5.7	ERCuSn-A
Copper-aluminum	Covered electrode	SMAW	A5.6	ECuAl-A2
Copper-aluminum	Bare electrode	GMAW	A5.7	ERCuAl-A2

a. OAW–oxyacetylene welding
BMAW–bare metal arc welding
SMAW–shielded metal arc welding
GMAW–gas metal arc welding

جدول ۹: ترکیب شیمیایی الکترودهای مناسب برای جوشکاری چدنها [۸]

الکترود	حدداستاندارد UNS	کربن	منگنز	سیلیسیم	گوگرد	آهن	نیکل	مس	آلومینیم	دیگرعناصر (مجموع)
ENi-CI	W۸۲۰۰۱	۲	۲/۵	۴	۰/۰۳	۸	حداقل ۸۵	۲/۵	۱	۱
ENi-CI-A	W۸۲۰۰۳	۲	۲/۵	۴	۰/۰۳	۸	حداقل ۸۵	۲/۵	۱-۳	۱
ENiFe-CI	W۸۲۰۰۲	۲	۲/۵	۴	۰/۰۳	باقی مانده	۴۵-۶۰	۲/۵	۱	۱
ENiFe-CI-A	W۸۲۰۰۴	۲	۲/۵	۴	۰/۰۳	باقی مانده	۴۵-۶۰	۲/۵	۱-۳	۱
ENiFeMn-CI	W۸۲۰۰۶	۲	۱۰-۱۴	۱	۰/۰۳	باقی مانده	۳۵-۴۵	۲/۵	۱	۱
ENiCu-A	W۸۴۰۰۱	۰/۳۵-۰/۵۵	۲/۳	۰/۷۵	۰/۰۲۵	۳-۶	۵۰-۶۰	۳۵-۴۵	–	۱
ENiCu-B	W۸۴۰۰۲	۰/۳۵-۰/۵۵	۲/۳	۰/۷۵	۰/۰۲۵	۳-۶	۶۰-۷۰	۲۵-۳۵	–	۱
Est	K۰۱۵۲۰	۰/۱۵	۰/۶	۰/۱۵	۰/۰۴	باقی مانده	–	–	–	–

جدول ۱۰: مشخصات مکانیکی الکترودهای روکش دار طبقه بندی شده در استاندارد SFA-۵.۱۵ [۸].

الکترود	استحکام کشش		تنش تسلیم		انعطاف پذیری	سختی برینل BHN
	KSI	MPa	KSI	MPa	درصد	
ESt	–	–	–	–	–	۲۵۰-۴۰۰
ENi-CI	۴۰-۶۵	۲۷۶-۴۴۸	۳۸-۶۰	۲۶۲-۴۱۴	۳-۶	۱۳۵-۲۱۸
ENi-CI-A	۴۰-۶۵	۲۷۶-۴۴۸	۳۸-۶۰	۲۶۲-۴۱۴	۳-۶	۱۳۵-۲۱۸
ENiFe-CI	۵۸-۸۴	۴۰۰-۵۷۹	۴۳-۶۳	۲۹۶-۴۳۴	۶-۱۸	۱۶۵-۲۱۸
ENiFe-CI-A	۵۸-۸۴	۴۰۰-۵۷۹	۴۳-۶۳	۲۹۶-۴۳۴	۴-۱۲	۱۶۵-۲۱۸
ENiFeMn-CI	۷۵-۹۵	۵۱۷-۶۵۵	۶۰-۷۰	۴۱۴-۴۸۳	۱۰-۱۸	۱۶۵-۲۱۰
ENiFeT3-CI	۶۵-۸۰	۴۴۸-۵۵۲	۴۰-۵۵	۲۷۶-۳۷۹	۱۲-۲۰	۱۵۰-۱۶۵

الف) الکترود چدنی :

الکترود چدنی با هسته ی چدنی و پوشش نسبتاً ضخیم ، محتوی مقدار کافی سیلیسیم و گرافیت مـی باشـد . ایـن الکترود برای تولید فلز جوش چدنی ، برای هر دو جریان متناوب و دائـم قطـب معکـوس مناسـب مـی باشـد . ایـن الکترود غالباً با کد EC_1 مشخص می شود . کاربرد آن بیشتر در تعمیرات بعضی عیوب ریخته گی می باشد و تحـت شرایط معینی می توان به فلز جوشی با استحکام و قابلیت ماشین کاری در مقایسه بـا قطعـه کـار رسـید . پیـشگرم کردن قطعه بین 150 تا $700^{\circ}C$ بسته به پیچیدگی ، وزن قطعه و مشخصات مورد درخواست برای جـوش مناسـب می باشد . فلز جوش مذاب از این نوع الکترود بسیار روان است و پس از انجماد حدود ۱۷۰ تـا ۲۳۰ برینـل سـختی خواهد داشت .

معمولاً میزان شدت جریان لازم بر حسب اندازه الکترود انتخاب شده و در کارخانه های سازنده آن را بـر روی بـسته های الکترود درج می کنند . اما ارقام جدول ۱۱ هم می تواند به عنوان راهنما مورد استفاده قرار گیرد (میزان ولتـاژ حدود ۳۰- ۲۵ ولت در نظر گرفته شده است) .

بهتر است حتی المقدور از الکترودهای کوچک استفاده کرده و طول قوس ، متوسط تـا بلنـد نگـه داشـته شـود . در انتهای مسیر جوش بهتر است قوس در یک لحظه خاموش نشود ، بلکه با کـشیدن آرام الکتـرود بـه عقـب اجـازه ی خنک شدن آهسته به جوش داده شود و حفره انتهایی به وجود نیاید . تکنیک خاصی نیز برای نیل بـه نـرخ رسـوب بالا هست که در آن از الکترودهای بزرگ به قطر 8mm و جریان ۴۰۰ تا ۵۰۰ آمپر بر روی قطعه پیـشگرم شـده تـا 650 تا $760^{\circ}C$ استفاده می شود و قبل از سرد شدن کامل آن را در حدود $540^{\circ}C$ تنش گیری می کنند .

جدول ۱۱ : مشخصات فنی و چگونگی کارکرد با الکترودهای چدنی EC_1 [۲].

قطر الکترود (mm)	شدت جریان (A)	ولتاژ (V)
۳	۱۵۰-۱۷۵	۲۵-۳۰
۴	۱۷۵-۲۰۰	۲۵-۳۰
۶	۲۰۰-۲۵۰	۲۵-۳۰
۸	۴۰۰-۵۰۰	۳۰-۳۲

ب) الکترود فولادی :

چدن های خاکستری ، نشکن و چکش خوار را می توان با الکترود فولادی کم کربن Est کربن ۰/۱۵٪) و الکترودهای کم هیدروژن مثل E۷۰۱۸ جوش داد اما به علت الماسه و سخت شدن فلز جوش از این الکترود بیشتر در تعمیرات بعضی عیوب کوچک ریخته گری که به ماشین کاری نیازی ندارد استفاده می شود . محدودیت دیگر این الکترودها احتمال ترک برداشتن جوش به ویژه در مقاطع با درجه مهار بالا است .

در بعضی موارد به هنگام جوشکاری چدن های چکش خوار فریتی به فولاد از الکترودهای فولادهای استفاده می شود . البته سطح مورد اتصال تا عمق معینی (حدود وسعت منطقه متاثر از سیکل جوشکاری) کاملاً دکربوره شده و سپس عملیات جوشکاری با الکترود فولادی انجام می گیرد .

ج) الکترودهای پایه نیکلی :

یکی از الکترودهای معمول که به طور وسیع و موفق در جوشکاری با قوس الکتریکی قطعات چدن های خاکستری ، نشکن و چکش خوار به کار می رود ، الکترودها با پایه ی نیکل می باشد . فلز رسوب داده شده هر کدام از الکترودهای نیکلی دارای میزان کربنی است که بالاتر از حد حلالیت است .

بنابراین در زمان جوشکاری وقتی نیکل توسط فلز پایه (چدن) رقیق می شود ، کربن اضافی هنگام انجماد پس زده می شود و گرافیت تشکیل می گردد و زمینه نیکلی باقی می ماند .

فرآیند تشکیل گرافیت همراه با یک انبساط حجمی است که با انقباض ناشی از سرد شدن جبران می گردد و این امر موجب کاهش تنش های انقباضی ناشی از سرد شدن خواهد گشت . الکترودهای نیکلی به چند دسته تقسیم می شوند که در استاندارد AWS با کدهایی به ترتیب زیر مشخص شده اند :

$ENiC_1$: هسته ی آن تقریباً نیکل خالص (۹۵ - ۹۹٪) بوده و حاوی مقدار کمی سیلیسیم و کربن می باشد . این الکترود علاوه بر این که در مورد اتصالات و تعمیرات قطعات چدنی کاربرد دارد ، از آن برای اتصالات قطعات چدنی به فلزات غیر آهنی و فولادی هم استفاده می کنند . در مواردی که استحکام جوش موضوع جدی و مهمی نباشد می توان از این الکترود برای قطعات سبک و متوسط استفاده کرد . چدن های فسفر بالا را نباید با این الکترود جوش داد.

$ENiFe\text{-}C_1$: الکترود با هسته ی نیکل و آهن (حدود ۵۵ درصد نیکل ، ۴۰ درصد آهن ، ۴ درصد سیلیسیم و ۲ درصد کربن) است . این الکترود به ویژه برای اتصالات و رفع عیوب در چدن چکش خوار بسیار مناسب است و البته

برای جوشکاری قطعات متوسط و سنگین چدن خاکستری هم به طور موفقیت آمیز استفاده می شود . بهتر است که چدن های با فسفر بالا (بیش از ۰/۲٪) با این الکترود جوش داده شوند . به طور کلی چدن با فسفر بیش از ۰/۵٪ را نمی توان به طور رضایت بخش با روش قوس الکتریک جوش داد . درصد بالای سیلیسیم تا حدودی مشکل فسفر را تقلیل می دهد .

مزایای الکترودهای $ENiFe\text{-}C_1$ نسبت به $ENi\text{-}C_1$ عبارتند از :

- میزان کمتر ضریب انبساط فلز جوش .
- افزایش استحکام فلز جوش
- کاهش حساسیت در مقابل ایجاد ترک گرم در فلز جوش

الکترودهای $ENi\text{-}C_1$ این برتری را دارد که فلز جوش نرم تری (در شرایطی که عمق لایه ی جوش کم و جوش بر روی قطعه نازک باشد) تولید می کند . که از نظر ماشین کاری قابل توجه است . البته در شرایطی که چندین پاس جوش بر روی هم باید رسوب داده شوند ، الکترود $ENiFe\text{-}C_1$ ارجعیت دارد . پیشگرم کردن قطعات در محدوده ی 300 تا $600^{\circ}C$ در مورد هر دو الکترود به کاهش درجه های حرارتی کمک می کند .

ENiCu الکترود با هسته ی نیکل و مس (۷۰٪ نیکل و ۳۰٪ مس) را در بسیاری موراد می توان به جای الکترود های $ENi\text{-}C_1$ و $ENiFe\text{-}C_1$ به کار گرفت . این الکترود ها خود دو نوع هستند با درصد مس بالاتر ENiCu-B که هر دو فلز جوشی با قابلیت ماشینکاری خوب ایجاد می کنند .

وضعیت عمده ی این الکترودها مقاومت خوردگی بهتر فلز جوش است و برای بعضی چدن های آلیاژی آستنیتی مناسب می باشند .

نکته ی مهم که در استفاده از الکترودهای پایه نیکلی باید در نظر گرفت ، تاثیر تغییرات میزان رقت بر روی کیفیت فلز جوش است . به عنوان مثال در میزان رقت بالا و جوش تک پاسی سختی فلز جوش ۳۵۰ برینل است . در حالی که در جوش چندین پاسی که میزان رقت پائین است این عدد به ۲۰۰ - ۱۷۵ برینل تقلیل پیدا می کند . برای تقلیل آلیاژ شدن فلز جوش با فلز قطعه کار ، گاهی اوقات سعی می شود تا جوش را حتی المقدور سرد نگه داشت . شدت جریان برای جوشکاری در وضعیت عمودی تقریباً ۲۵٪ و برای بالای سر ۱۵٪ کمتر از وضعیت مسطح و افقی انتخاب می شود .

پهنای فلز جوش رسوب داده شده نباید از سه برابر قطر الکترود بیشتر باشد . بعلاوه باید کوچکترین اندازه ی ممکن برای الکترود انتخاب شود تا میزان حرارت ورودی کم باشد . عملیات رسوب دادن را می توان به تدریج از کناره ی یک فرو رفتگی تحت تعمیر ، به طرف مرکز به صورت محیطی انجام داد.طول قوسی کوتاه (حدود ۱/۵mm) برای

پائین نگه داشتن حرارت پیشنهاد می شود بهتر است در طول های کوتاه (حدود ۵۰mm) فلز جوش رسوب داده شده و سپس با چکش های مخصوص با مقطع کروی شکل با دقت خاصی کو.بیده شده و پس از سرد شدن کامل و برطرف کردن پیوسته سرباره یک خاک جوش (گل جوش) ، طول کوتاه دیگر د رکنار یا ادامه ی آن رسوب داده شود . این نکات تقریباً همان تکنیک جوش سرد است .

واضح است که سختی و کیفیت منطقه ی مجاور جوش به سرعت گرم و سرد شدن منطقه ی جوش و ترکیب شیمیایی چدن قطعه ی کار بستگی دارد . همانطور که قبلاً اشاره شد چدن ها با زمینه ی پرلیتی شانس تشکیل مارتنزیت در منطقه ی مجاور خط جوش افزایش می دهند که مارتنزیت به وجود آمده را توسط عملیات حرارتی تمپر کرده و سختی و تردی آن را کاهش داده و بدین ترتیب قابلیت ماشینکاری آن را بهبود بخشید در جوش های چندین پاسی قالباً عمل تمپر کردن توسط سیکل حرارتی پاس بعدی اجرا می شود [۵].

در جداول ۱۲ و ۱۳ شدت جریان های معمولی برای اندازه های مختلف الکترودها با عنصر پایه ی نیکل آورده شده است .

جدول ۱۲: مشخصات فنی و چگونگی کارکرد با الکترودهای پایه نیکل ($ENi\text{-}C_1$) [۲]

قطر الکترود (mm)	شدت جریان (AC) (A)	شدت جریان (DC) (A)
۲/۵	۴۰-۸۰	۴۰-۸۰
۳/۲	۷۰-۱۱۰	۸۰-۱۱۰
۴	۱۱۰-۱۵۰	۱۱۰-۱۴۰
۵	۱۲۰-۱۷۰	۱۲۰-۱۶۰

جدول ۱۳: مشخصات فنی و چگونگی کارکرد با الکترودهای پایه نیکل- آهن دار ($FeNiFe\text{-}C_1$) [۲]

قطر الکترود (mm)	شدت جریان (AC) (A)	شدت جریان (DC) (A)
۲/۵	۴۰-۷۰	۴۰-۷۰
۳/۲	۷۰-۱۰۰	۷۰-۱۰۰
۴	۱۱۰-۱۴۰	۱۰۰-۱۴۰
۵	۱۳۰-۱۸۰	۱۲۰-۱۸۰

- **نکات تکنیکی**

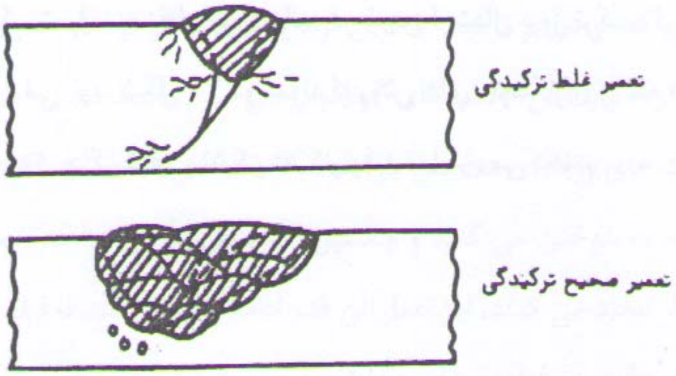
۱- اولین لایه ی جوش معمولاً حاوی خلل و فرج است . بنابراین بهتر است آن را سنگ زد و دوباره یک پاس جوش روی آن رسوب داد در بعضی مواقع لازم است که این عمل چند بار تکرار گردد تا پاس جوش ، بدون خلل و فرج به دست آمده سپس لایه های بعدی به طور معمولی روی آن رسوب داده شوند . برخی از جوشکارها ، برای ایجاد حرارت بیشتر و سرد شدن آرامتر فلز جوش به ایجاد حوضچه های جوش بزرگ و عمیق تر مبادرت می نمایند .

واضح است که هر اندازه حجم مذاب بیشتر باشد ، آرامتر سرد می شود و در حوضچه های گرد از تمرکز تنش در گوشه ها جلوگیری می شود اما نباید فراموش کرد که هرچه حوضچه ی مذاب وسیع تر و عمیق تر باشد احتمال تماس هوا و عدد محافظت کامل مذاب کمتر و احتمال محبوس شدن حباب های گاز در آن بیشتر خواهد شد . بنابراین باید بین این دو عامل تعادل برقرار کرد و این مسئله را درWPS جوشکاری منظور کرد .

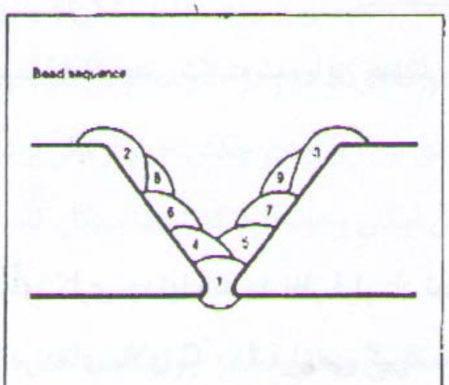
۲- در مواقعی که ترکی در سطح قطعه ی چدنی دیده شود که هنوز قطعه را به دو نیم نکرده باید ابتدا و انتهای ترک را به وسیله ی مته سوراخ کرد تا جلوی پیشرفت ترک گرفته شود (سوراخی به قطر تقریباً ۳mm) برای این کار کافی است . مسیر جوشکاری همواره باید در جهت یا امتداد ترک باشد تا تنش های حاصل از جوشکاری ، تنش های پسماند ناشی از ریخته گری و انجماد قطعه ی چدنی را خنثی نماید .

۳- قطعات تعمیری که پس از جوشکاری نیاز به ماشینکاری داشته و تحت بارهای فشاری قرار می گیرند باید قبل از جوشکاری کاملاً محکم و توسط فیکسچر طراحی شده ی ویژه ، مهار شوند در غیر این صورت پس از خاتمه ی جوشکاری در یک راستا قرار نگرفته و علاوه بر مشکلاتی که برای مردم ماشینکاری ایجاد می شود مقدمات بروز ترک جدید (در اثر کاهش انعطاف پذیری) در قطعه به وجود می آید .

۴- در خصوص تعمیر ترکیدگی های موضعی باید یادآور شد که لازم است مناطق اطراف ترکیدگی تا انتهای عمق آن با سنگ زدن برداشته شود . از محبوس شدن هر گونه حباب گاز ، ماسه و مواد خارجی دیگر بر عمق ترک جلوگیری شده و از ادامه ی پیشرفت ترک نیز ممانعت به عمل آید (شکل ۲۲) .



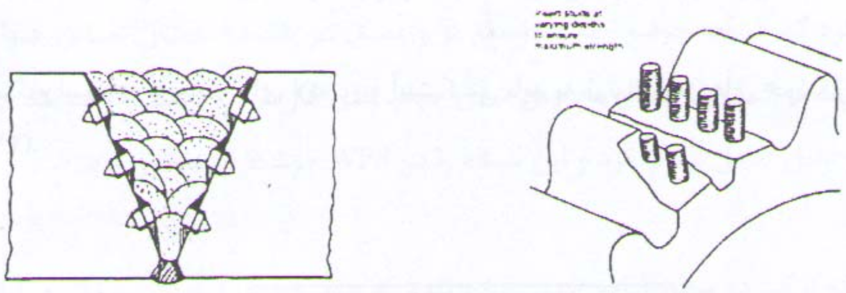
شکل ۲۲: تعمیر غلط و صحیح ترک در قطعه چدنی به وسیله جوشکاری [۲]



شکل ۲۳: ترتیب زنجیره های جوش در جوشکاری لایه ای چدن خاکستری [۲]

۵- در هنگام استفاده از جوش های لایه ای و آستر کشی باید به ترتیب پاس های جوشکاری دقت کرد (شکل ۲۳) .

۶- یکی از روش های موثر در تعمیر قطعات بزرگ و سنگین چدنی که دچار کندگی یا شکستگی شـده انـد ، روش جوشکاری زائده ای یا دوختن به وسیله ی میخ است . در این روش ابتـدا تعـدادی سـوراخ در محـل شکستگی موضع اتصال ایجاد می کند . سپس میخ ، پیچ یا میله هایی هـب قطـر ۶ تـا ۱۰ میلـی متـر از جنس فولاد کربنی درون آنها قرار داده و تا عمق ۳ تا ۷/۵ میلی متر در آنها فرو می کنند . سـپس اطـراف میخ های زائده ای را به وسیله ی الکترود های فـولادی معمـولی ماننـد E7015 و E7016 یـا E7018 جوشکاری می نمایند . پس از سرد شدن جوش ها و تمیزکاری اطراف آنها جوشکاری اصلی توسط الکترود های چدنی و به صورت لایه ای (با رعایت ترتیب گفته شده) انجام می گیرد . به این ترتیب تنش هـا در محل قرار گرفتن میخ ها متمرکز می شوند و چون این محل دارای استحکام بالایی است خطر بروز ترک و شکست را به حداقل می رساند . در ضمن احتمال بروز ترکیدگی در منطقه ی مجاور خـط جـوش نیـز از بین می رود . (شکل ۲۴) دو نمونه از روش های جوشکاری زائده ای چدن ها را که بـرای تعمیـر قطعـات چدن خاکستری و نشکن به کار رفته نمایش می دهند .



شکل ۲۴: تعمیر قطعات چدنی شکسته شده با فن جوشکاری زائده ای [۲]

۷- یکی دیگر از نکاتی که در جوشکاری چدن ها باید مد نظر قرار داد تعمیر سوختگی چدن های ریخته گری است . وقتی قطعه ی چدنی در دمای بالای $۴۰۰^\circ C$ قرار می گیرد ، شروع به سوختن یا اکسید شدن می کند . به طور کلی سوختگی یا اکسید شدن ها به دو دسته ی اصلی تقسیم می شوند :

الف) پوسته های اکسیدی در سطح چدن : این پوسته ها اغلب شامل ترکیب اکسیدی Fe_2O_3 و Fe_2O_4 و FeO و Fe_2O_3 و FeO هستند که در سطح خارجی چدن قرار می گیرند . این اکسیدها در سطح چدن تورم ایجاد کرده و وقتی با مواد خارجی و چربی همراه باشند ، عملیات جوشکاری با مشکل مواجه می شود . برای حل این مشکل باید به وسیله ی سنگ زدن یا شیار زنی لایه ی اکسیدی را برداشته سپس سطح را به وسیله ی الکترود فولاد کربنی یک لایه جوش داد ، سپس با الکترودهای پایه نیکل مانند ENiFe-C1 جوشکاری نمود .

ب) اکسید های درونی : اکسیژن از طریق گرافیت های ورقه ای و در اثر افزایش دما به سرعت به داخل چدن نفوذ می کند و در اثر ترکیب با کربن آزاد یا گرافیت موجود در چدن خاکستری یا نشکن ، تولید CO یا CO_2 کرده و با آهن ، اکسیدهای گوناگونی می سازد . اکسید های آهن در یک محدوده ی مشخص بین گرافیت های ورقه ای محبوس می شوند اگر افزایش دما و نفوذ اکسیژن ادامه پیدا کند گرافیت ها نیز شروع به سوختن می کنند و جانشین اکسیدهای آهن خواهند شد بنابراین فضاهای خالی در بین ساختار ایجاد می کنند . این عمل آنقدر ادامه پیدا می کنند تا قطعه دچار شکستگی و تخریب شود در این حالت نیز قطعه ی چدنی دچار تورم و بادکردگی در بعضی مواضع می گردد که مشخصه ی عینی بروز عیب مزبور است در این شرایط برای تعمیر درست مانند آنچه برای پیوسته های اکسیدی سطحی گفته شد ولی در عمق بیشتر باید عملکرد [۲].

*** نکاتی در ارتباط با جوشکاری چدن های دیگر :**

اگر عملیات جوشکاری با الکترود چدنی بر روی چدن نشکن و یا چکش خوار انجام شود کربن جدا شده در فلز جوش به صورت ورقه ای است و در نتیجه خواص فلز جوش با بقیه فلز قطعه کار قابل مقایسه نخواهد بود . اگر فلز جوش بر روی چدن چکش خوار از نظر ترکیب شیمیایی کاملاً با بقیه ی چئدن قطعه کار یکسان باشد این امکان وجود دارد که تحت سیکل کامل مالیبل کردن به گرافیت برفکی در فلز جوش دست یافت .

مشکل دوم ساختار میکروسکوپی منطقه ی مجاور جوش است که در درجه ی حرارت بالا از سیکل حرارت جوشکاری ، این زمینه تبدیل به آستنیت شده و در صورتی که این زمینه ی پرلیتی باشد آستنیت با کربن بالا ضمن سرد شدن سریع تبدیل به مارتنزیت می شود و منطقه ی مجاور جوش همچون چدن خاکستری ترد و شکننده می شود . عملیات پسگرم کردن در ۵۴۰ تا ۶۵۰°C مارتنزیت سخت را تمپر می کند اما برای نرم کردن به عملیات آنیل کردن کامل در ۸۷۰°C نیاز است .

به هر حال شانس بازگشت خواص ابتدایی به این منطقه کم است هر چند پیشگرم کردن ۱۲۰°C و حتی تا ۶۵۴°C هم می تواند انجام شده و کمکی در این مورد انجام دهد .

الکترود نیکل – آهن ENiFe-C1 با ۵۵٪ نیکل ، الکترود بسیار مناسبی برای رفع عیوب و اتصالات قطعات چدن نشکن است . در قطعات کوچک نیازی به پیشگرم کردن نیست اما عموماً لازم است که انواع چدن نشکن فریتی در محدوده ی ۱۲۰ تا ۱۸۰°C و نوع پرلیتی آن در ۲۰۰ تا ۳۰۰°C پیشگرم شوند تا احتمال ترک برداشتن منطقه ی مجاور جوش کاهش یابد .

پیشنهاد می شود جریان دائم قطب معکوس با آمپر پائین وهمچنین الکترود خشک یا پخته شده به کار رود . برای دستیابی به قابلیت ماشینکاری خوب در منطقه ی مجاور جوش عملیات حرارتی ، آنیل کردن کامل یا نرمال کردن ضروری است .

در جوشکاری چدن چکش خوار انعطاف پذیری منطقه ی مجاور جوش شدیداً کاهش می یابد زیرا گرافیت حل شده و به مارتنزیت سخت تبدیل می شود . اگر چه عملیات آنیل کردن پس از جوشکاری این منطقه سخت را نرم تر می کند اما به هر حال انعطاف پذیری کمی در مقایسه با بقیه ی قطعه کار خواهد داشت . علی رغم این محدودیت در حالت های خاصی چدن مالیبل را با توجه به نکات تکنیکی می توان با الکترود دستی جوش داد . برای تعمیرات مواضع شکسته شده ناشی از تنش بر روی قطعه چدن مالیبل ، عملیات جوشکاری توصیه نمی شود . چون بیشتر قطعات چدن مالیبل کوچک هستند معمولاً نیازی به پیشگرم کردن ندارند و در صورت نیاز عملیات تنش گیری تا ۵۴۰°C انجام می گردد . برای قطعات بزرگ و درجه ی مهار بالا پیشگرم کردن تا ۳۰۰ تا ۴۰۰°C و عملیات آنیل کردن یا سیکل کامل مالیبل کردن پیشنهاد می شود البته این عملیات مستلزم هزینه بوده و در بعضی قطعات که برای استحکام خاصی طرح شده اند محدودیت کاهش استحکام وجود دارد . چدن مالیبل فریتی نوع ۳۲۵۱۰ ، ۱۳۵۰۱۸ بهترین نوع چدن مالیبل از نظر قابلیت جوشکاری می باشند اگر چه مقداری از استحکام ضربه ای خود را از دست می دهند چدن مالیبل پرلیتی به دلیل مقدار بالاتر کربن ترکیبی دارای مقاومت ضربه ی کمتری پس از جوشکاری است برای پرکردن وتعمیر بعضی حفره های کوچک

در چدن مالیبل ۳۲۵۱۰ و ۳۵۰۱۸ روش قو.س الکتریکی با الکترود نیکل مناسب است . اگر چه از الکترود فولاد کم کربن و کم هیدروژن هم می توان استفاده کرد اما عملیات آنیل کامل حتما باید انجام شود . چدن مالیبل پرلیتی را می توان به سختی جوش داد چون لایه ی ترد چدن سفید بدون گرافیت در مجاورت جوش ایجاد می شود . این نوع چدن ها را در صورت می توان جوش داد که سطح یا لبه ی مورد اتصال قبلاً کاملاً دکربوره شود (ذرات گرافیت در لایه ی سطح سوزانده شود)

چدن های آلیاژی معمولاً برای مقاومت در مقابل سایش ، حرارت و خوردگی طرح و تولید می شوند برخی از این چدن ها قابل جوشکاری بوده و بعضی نیستند . چدن های سفید و سریع سرد شده و دارای مقاومت سایشی بسیار خوبی هستند و ساختار میکروسکوپی بدون گرافیت آزاد دارند . این چدن به علت تردی و شکنندگی بسیار بالا تقریباً غیر قابل جوشکاری می باشد . چدن های مقاوم در مقابل خوردگی معمولاً با سیلیسیم بالا ، کرم بالا یا نیکل بالا شناخته می شوند . برای تعمیرات بعضی عیوب در برخی از این چدن ها می توان جوشکاری کرد اما نکته ی مهم و حساس در این موارد خواص و شرایط کاربرد این گونه آلیاژها و قطعات می باشد . بنابراین پیدا کردن الکترود مناسب که فلز جوشی تولید کند تا بتواندپاسخگوی آن شرایط باشد قدری پیچیده و مشکل است و اطلاعات چندانی نیز در این زمینه وجود ندارد . در مورد چدن های مقاوم در برابر حرارت هم مشکل ذکر شده در بالا صادق است . جدول ۱۴ حدود خواص مکانیکی فلز جوش حاصل از چند نوع الکترود بر روی چدن خاکستری را نشان می دهد .

جدول ۱۴: خواص مکانیکی فلز جوش تحت آزمایش کشش [۵]

نوع الکترودوقطرآن اینچ	نوع	وضعیت (۲)	استحکام کششی (psi)	نقطهٔ تسلیم (psi)	درصد تغییرطول نسبی اینچ	درصد تغییرمقطع
ENiFe-Cl ۱/۸	A	جوش ناتابیده ۱۶۵۰	۵۷۰۶۰۰	۴۳۰۰۰۰	۱۰/۰	–
ENiFe-Cl ۱/۸	B		۶۵۰۲۰۰	۵۲۰۰۰۰	۸/۰	–
ENiFe-Cl ۵/۳۲	B	جوش ناتابیده ۱۶۵۰	۶۶۰۹۰۰	۵۰۰۰۰۰	۱۱/۵	–
ENiFe-Cl ۵/۳۲	B		۷۱۰۵۰۰	۴۶۰۰۰۰	۱۶/۵	–
ENiFe-Cl ۳/۱۶	B	جوش ناتابیده ۱۶۵۰	۷۱۰۷۰۰	۴۸۰۰۰۰	۱۳/۰	–
ENiFe-Cl ۳/۱۶	B		۷۲۰۵۰۰	۴۵۰۰۰۰	۱۹/۰	–
ENi-Cl (۳) ۳/۱۶	C	۱۶۵۰	۴۶۰۸۰۰	۳۶۰۰۰۰	۵/۰ (۴)	۶/۰
ENi-Cl (۳) ۳/۱۶	A	۱۶۵۰	۴۶۰۸۰۰	۳۴۰۰۰۰	۷/۰ (۴)	۱۰/۰
ENi-Cl (۳) ۳/۱۶	B	۱۶۵۰	۴۹۰۰۰۰	۳۷۰۰۰۰	۷/۰ (۴)	۶/۰

منابع

۱-ویلیام اسمیت،"ساختار وکاربرد الیازهای مهندسی"،ترجمه علی اکبر اکرامی،سید مرتضی سید ریحانی،انتشارات

علمی دانشگاه سنعتی شریف،۱۳۸۰ چاپ اول.

۲-مهرداد معینیان،"کلید جوشکاری"،جلد اول،انتشارات آزاده ،۱۳۸۲،چاپ اول.

3-AWS handbook,1997,vol.’’cast irons’’.

۴-امیر حسین کوکبی،"جوشکاری چدن و آلومینیم"

۵- امیر حسین کوکبی،"تکنولوزی جوشکاری "،انتشارات ازاده،۱۳۸۲،چاپ پنجم

6-Heat Resistant Materil,ASM SPECIALLY HAND BOOK,1993.

۷-مهرداد دمعینیان،"کلید جوشکاری"،جلد دوم،انتشارات آزاده،۱۳۸۲،چاپ اول.