

به نام خدا

تکنولوژی جوشکاری

محمود نوری زاده

دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمین

پائیز ۱۳۹۱



تکنولوژی جوشکاری

مراجع:

- ۱- تکنولوژی جوشکاری، جلد اول، فرایندها، امیرحسین کوبی، مجید محمودی غزنوی، موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف
- ۲- مبانی تکنولوژی جوشکاری، دکتر ایرج ستاری فر، دانشگاه امیرکبیر

فصل اول

مقدمه و تعاریف اولیه تکنولوژی جوشکاری



فصل اول: مقدمه و تعاریف اولیه

۱-۱- مقدمه

انواع اتصالات در صنعت در یک دسته بندی سه دسته تقسیم می‌شوند:

الف) اتصالات موقت:

- اتصالاتی که به راحتی قابل جدا کردن هستند.
- مانند پیچ و مهره، پین، خار، میخ، قلاب و ...

ب) اتصالات نیمه موقت:

- اتصالاتی که قابل جدا کردن هستند ولی به راحتی دسته اول نیست.
- مانند پرچ، لحیم و بیشتر چسب ها.
- کاربرد لحیم‌کاری در صنایع الکترونیک، استفاده از چسب برای اتصال انواع شیشه ها، سرامیک ها، پلیمرها و ... (جدا کردن چسب با استفاده از حلال یا قراردادن در دمای خاص امکان پذیر است).

ج) اتصالات دائم:

- جدا کردن قطعات با اتصال دائم به راحتی امکان پذیر نبوده و برای تفکیک می بایست اتصال را برید یا خرد کرد که احتمال تخریب بخشی از قطعات نیز وجود دارد.
- مانند اتصالات جوشکاری، برخی چسب ها و لحیم های دیر ذوب.



هریک از انواع اتصالات دارای مزایا و معایب مختص خود می باشند. مثلاً گاهی جنس قطعه مشکلاتی را برای جوشکاری بوجود می‌آورد که اصطلاحاً گفته می‌شود از قابلیت جوش‌پذیری (Weldability) پایینی برخوردار است. برای نمونه برخی آلیاژهای آلومینیوم که در ساخت بدنه هواپیما بکار می‌رود بدلیل جوش‌پذیری پایین برای اتصال آن از روش پرچکاری استفاده می‌شود.

از دیگر موارد محدودیت های روش جوشکاری می توان به اتصال مواد غیر

همجنس (البته در روش‌های نوین جوشکاری این محدودیت تا حدودی برطرف شده است)، مواد چوبی، بسیاری از کامپوزیت



ها و اتصال قطعات بزرگی که در صورت جوشکاری شدن امکان حمل به محل مصرف را ندارند (مانند دکل های برق فشار قوی) اشاره نمود.

در مقابل در مورد اتصالات مورد نیاز در بسیاری از کاربردهای حساس مثل مخازن تحت فشار، بدنه زیردریایی، موشک‌ها و ... استفاده از روش جوشکاری مطمئن‌ترین گزینه است.

گروه طراحی یک محصول بایستی نوع فرایند اتصال مورد نیاز را با توجه به جنبه های مختلف فنی، اقتصادی، سهولت و سرعت فرایند انتخاب نمایند.

انواع اتصالات در صنعت در دسته بندی دیگری به سه دسته زیر تقسیم می‌شوند:

الف) اتصالات مکانیکی:

- مانند انواع پیچ و مهره، پرچ، پین، خار، میخ، قلاب و ...

ب) اتصالات شیمیایی:

- شامل انواع مختلف چسب ها

ج) اتصالات متالورژیکی:

- شامل انواع فرایندهای جوشکاری و لحیم کاری

برخی اتصالات در دو دسته از دسته بندی فوق جای می‌گیرند برای مثال تامین انرژی اتصال در برخی از فرایندهای جوشکاری برعهده روش های مکانیکی است و همچنین در برخی اتصالات هم عوامل مکانیکی و هم عوامل متالورژیکی نقش دارند، مانند ساخت جعبه های فلزی که لبه های ورق را چپ و راست خم و داخل هم قرار داده و می‌کوبند و در پایان لبه های اتصال را لحیم کاری می‌نمایند و یا نمونه دیگر جوشکاری مهره به پیچ را می‌توان نام برد.

۱-۲- کاربرد های تکنولوژی جوشکاری

مهمترین کاربردهای جوشکاری عبارتند از:

۱-۲-۱- اتصال

تقریباً ۸۰ درصد کاربرد روش جوشکاری در صنعت برای اتصال قطعات به یکدیگر است. در علم متالورژی همواره تلاش می‌شود که خواص محل و اطراف محل جوش به خواص فلز پایه نزدیک شود. خواص مورد نظر بستگی به کاربرد دارد.

برای نمونه:



- در ساخت سازه‌ها، مخازن و ... منظور از خواص، **خواص مکانیکی** نظیر استحکام کششی، انعطاف پذیری، چقرمگی، مقاومت خستگی و ... است.
- در صنایع زینتی مثل زیورآلات، لوستر و ...، تطابق رنگ و **زیبایی** خواص مورد نظر است.
- در صنایع الکترونیک **مقاومت الکتریکی** محل اتصال حائز اهمیت است.
- در ساخت مخازن و تجهیزات صنایع غذایی و دارویی **مقاومت به خوردگی** جوش مهمترین مساله است (افزایش دوام تجهیزات و جلوگیری از ورود آلودگی های حاصل از خوردگی).

۱-۲-۲- بازسازی عیوب قطعات ریختگی یا ماشینکاری



عیوبی مانند پرنشدن قالب، کشیدگی، ریزش ماسه و محبوس شدن بیش از حد حباب‌های گازی یا ذرات ناخالصی در قطعه ریختگی از عیوب مرسوم در ریخته گری هستند که کم و بیش در اینگونه قطعات بروز می‌کنند. قطعات معیوب ریختگی در صورتی که کوچک باشند به همراه قراضه ها مجدداً ذوب و قالبگیری می‌شوند، ولی در صورتی که بزرگ یا پیچیده باشند، تا حد امکان برای اصلاح عیوب آنها تلاش می‌شود.

مثلاً در صورت پرنشدن و بوجود آمدن حفره در قطعه، به دو روش می‌توان حفره را پر کرد، نخست ذوب ریزی به روشی همانند ریخته گری که به علت جدایش و عدم همبستگی بخش جدید با قطعه، روش مناسبی نیست و دوم پر کردن حفره بکمک جوشکاری است که اگر ترکیب شیمیایی و نحوه گرم و سرد شدن منطقه ترمیم کنترل شود به ساختار و خواصی مشابه فلز پایه دست خواهیم یافت.



در تولید قطعات به روش ماشینکاری گاهی در اثر کم دقتی، اشتباهات ابعادی و ...، عیوبی در قطعه نهایی بوجود می‌آید که در صورت بزرگ بودن قطعه و یا گران قیمت بودن مواد اولیه، بایستی به روشی این عیوب را برطرف کرد. برای مثال در ساخت قالب، در صورتی که اشتبهاً حفره

ماتریس گشادتر از حد نیاز شود، دو روش برای اصلاح آن متصور است یکی استفاده از بوش با اندازه مناسب در داخل ماتریس است که در این صورت نگرانی از لق شدن بوش در اثر ضربه وجود دارد. دوم اصلاح ماتریس به روش جوشکاری که با رعایت جوانب فنی و ماشینکاری مجدد حفره، که نتیجه بسیار بهتری بدست می‌آید.

۱-۲-۳- بازسازی قطعات فرسوده و مستهلک شده



در صنعت هر روزه قطعات مختلفی بر اثر عواملی مانند خوردگی، سایش، لهیدگی و ... فرسوده شده و غیرقابل استفاده می‌شوند. بخشی از این قطعات بکمک فرآیندهای جوشکاری قابل بازسازی هستند. بازسازی قطعات فرسوده علاوه بر صرفه جویی اقتصادی از نظر زیست محیطی نیز حائز اهمیت است. برای نمونه قالب های ریخته گری گریز از مرکز تولید لوله که اصطلاحاً کوکیل نامیده می‌شوند تحت تنش های مکانیکی و شوک های حرارتی (بعلت جریان مداوم دوش آب در خارج قالب و مواد مذاب در داخل آن) با تولید حدود ۱۰۰۰ عدد لوله دچار ترک های ریز و درشت در سطح می‌شود که می‌توان با تراشیدن داخل قالب و چند لایه جوشکاری و در نهایت تراشکاری، عیوب را بطور کامل برطرف نمود و یک قالب گران قیمت را احیاء نمود.

۱-۲-۴- بهبود خواص موضعی قطعات نو



در بسیاری از قطعات مورد نیاز در صنعت لازم است بخشی از قطعه (یک لبه، یک سطح یا ...) دارای خواص ویژه ای (مقاومت به انواع خوردگی، سایش، له شدن و ...) باشد. انتخاب جنس قطعه بطوری که کل قطعه دارای خواص ویژه مورد نظر باشد گاه از نظر اجرا با مشکلات فنی روبرو است و گاهی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست.

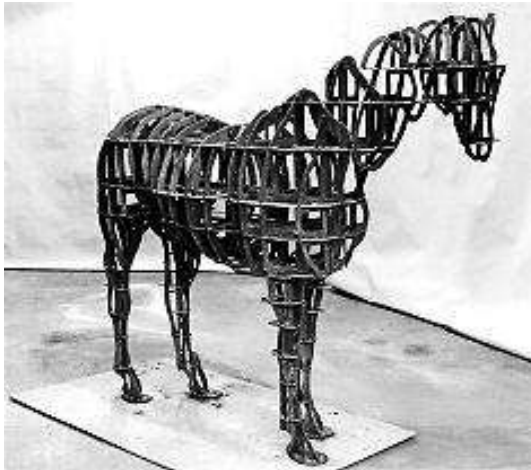


برای نمونه لبه برش در گیوتین یا قالب بایستی دارای قدرت برش باشد (مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک با استحکام و چقرمگی بالا) و زود کند نشود (مقاومت در برابر سایش با سختی مناسب). انتخاب جنس کل قطعه از آلیاژی با مشخصات فوق ممکن است موجب شکستن آن زیر تنش فشاری زیاد شود یا اینکه هزینه ها را خیلی بالا ببرد. بنابراین برای حل این مشکل دو راه حل قابل تصور است:

- استفاده از اینسرت های با خواص ویژه در محل های مورد نیاز و اتصال آنها با استفاده از پیچ و مهره که در این صورت محل سوراخ های مربوط به پیچ بر روی اینسرت و قطعه ممکن است تحت شرایط خستگی و ضربه های وارده دچار ترک و شکستگی شود.
- انجام چندین لایه جوشکاری با ترکیبات مختلف و در نهایت رسیدن به لایه نهایی با خواص مطلوب

همانطور که ملاحظه می‌شود استفاده از روش جوشکاری از حد دوام بالاتری برخوردار خواهد بود.

۱-۲-۵- کاربردهای هنری فرایندهای جوشکاری



یکی از کاربردهای فرایندهای جوشکاری، خلق آثار هنری است که معمولاً از فرایندهای **جوشکاری دستی** بدین منظور استفاده می‌شود. در این کاربرد از فرایندهای جوشکاری برای **اتصال** یا **رسوب دادن فلز** بمنظور خلق مجسمه‌ها و آثار خطاطی و نقاشی برجسته استفاده می‌شود.

۱-۳- تعریف جوش ایده آل



از آنجایی که امکان ارائه تعریفی جامع از جوش با توجه به تنوع کاربرد آن وجود ندارد لذا با توجه به اینکه **بیشترین کاربرد** فرایندهای جوشکاری **اتصال دائم** قطعات هم جنس است، **جوش ایده آل** به محل **اتصال** اطلاق می‌شود که نتوان موضع اتصال را از قسمت‌های دیگر **قطعه تشخیص داد** و به عبارت دیگر، **تفاوتی** در **خواص مکانیکی** و **ترکیب شیمیایی** و همچنین **ساختار کریستالی** مشاهده نشود. در عمل رسیدن به ساختار کریستالی مشابه بسیار دشوارتر است. جوش ایده آل با تعریف فوق فقط در کارهای

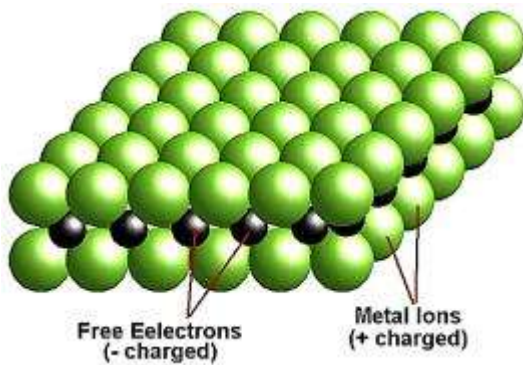
آزمایشگاهی قابل استحصال است و در صنعت تلاش می‌شود با توجه به **حساسیت** و تنها در صورت **ضرورت** به این تعریف **نزدیک** شد و معمولاً بحث **هزینه** و **سرعت اجرا** در خطوط تولید در این زمینه **عامل محدود کننده** ای به شمار می‌رود. برای نمونه در **جوشکاری پروفیل** های فلزی در کارهای ساختمانی **صرفاً استحکام مکانیکی** مد نظر است در حالی که در جوشکاری **پره های توربین گازی** یا **مخازن تحت فشار**، خواص بیشتری از منطقه جوش مورد نیاز است.



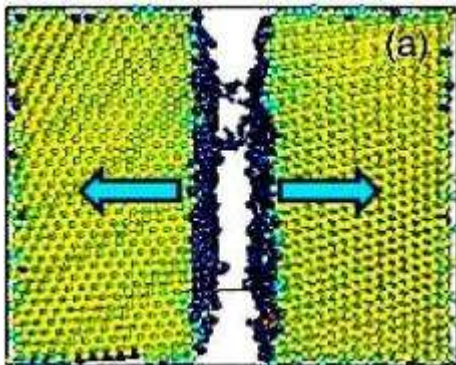
در مقابل، منظور از جوش ایده آل در بهبود خواص موضعی قطعات، رسیدن به ترکیب شیمیایی، خواص مکانیکی و ساختاری متفاوت (بهتر) از قطعه اصلی است.

در رسیدن به یک جوش مطلوب عوامل مختلفی از قبیل نوع و کیفیت ماده مورد جوشکاری، نوع فرایند جوشکاری، متغیرهای جوشکاری (تنظیمات دستگاه و مهارت جوشکار)، آماده سازی قطعات پیش از جوشکاری، عملیات حرارتی پیش و پس از جوشکاری و ... تاثیرگذار است.

۱-۴- دسته بندی فرایندهای جوشکاری



پیش از دسته بندی فرایندهای جوشکاری لازم است بدانیم یک اتصال چگونه شکل می گیرد؟ اتم ها در فلزات و اکثر مواد دارای نظم کریستالی بوده و نسبت به هم نیروی جاذبه اعمال می کنند. وقتی می خواهید بخشی از یک قطعه فلزی را جدا کنید نیروی قابل توجهی بایستی بکار ببرید، این نیرو صرف غلبه بر نیروی جاذبه میان اجزاء تشکیل دهنده ماده می شود. در شرایط واقعی، عواملی مانند نواقص شبکه کریستالی و همچنین افزایش دما موجب کاهش قابل ملاحظه نیروی مورد نیاز برای گسیختگی ماده می شود که در صورتی که ماده ذوب شود، نظم کریستالی به هم ریخته و می توان با غلبه بر نیروی چسبندگی مختصری که در مذاب وجود دارد، ماده را از هم گسیخت.



در صورتی که دو بخش جدا شده از یک ماده را در کنار هم قرار دهیم تا در اثر نیروی جاذبه بین اتمی، میان دو قطعه اتصال ایجاد شود، به خودی خود هیچ اتصالی ایجاد نمی شود، چرا؟ علت عدم برقراری جاذبه بین اتمی و عدم بوجود آمدن اتصال میان دو بخش از ماده است زیرا که ناهمواری های سطح ماده در محل اتصال، هوای محبوس مابین دو قطعه و آلودگی های سطحی قطعات، به اتم های سطح دو قطعه این اجازه را نمی دهد که به میزان کافی به یکدیگر نزدیک شوند تا نیروی جاذبه بین اتمی برقرار شود.



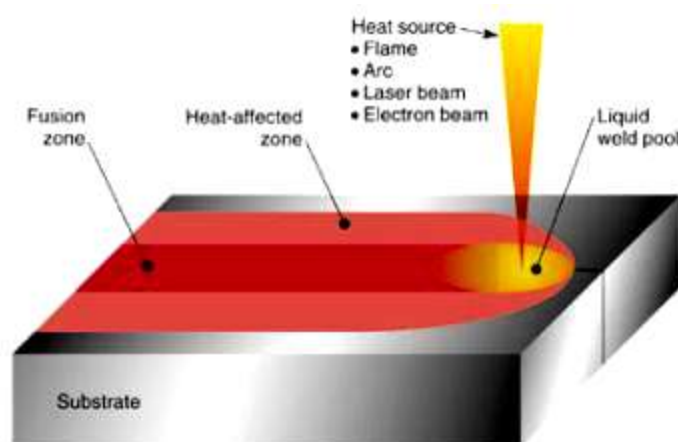
در کارهای آزمایشگاهی می توان سطوح اتصال را در مقیاس کریستالی پرداخت کرده و پس از زدودن لایه اکسیدی و کلیه آلودگی های سطحی، سطوح اتصال را به هم نزدیک نموده و بکمک قرار دادن در خلاء یا اعمال

فشار، لایه هوا را نیز خارج نمود. بدین ترتیب اتم ها می توانند بگونه ای به یکدیگر نزدیک شوند که نیروی جاذبه میان آنها برقرار شده و اتصال انجام گیرد. جوشکاری نفوذی^۱ تا حدودی بر این اساس است.

به طور کلی در فرایندهای مختلف اتصال از سه روش برای برطرف کردن مانع اتصال یعنی ناهمواری ها و آلودگی های سطوح یا لبه ها و لایه هوایی استفاده می شود که دو روش اول دو خانواده مهم از فرایندهای جوشکاری را تشکیل می دهد:

۱-۴-۱- فرایندهای جوشکاری ذوبی

در این گروه از فرایندهای جوشکاری، بکمک یک منبع حرارتی (مانند قوس، شعله، اشعه لیزر و ...) سطوح و لبه های اتصال ذوب شده و با تشکیل حوضچه مذاب، ناهمواری ها و فاصله هوایی میان دو قطعه از بین می رود. همچنین لایه های اکسیدی و آلودگی ها نیز به علت سبک بودن بصورت سرباره از مذاب خارج می شوند. با دور شدن منبع حرارتی، بخشی از حرارت از طریق رسانش به دو قطعه منتقل می شود و بخشی نیز از طریق تشعشع یا جابجایی به محیط انتقال می یابد. با کاهش دما تا دمای انجماد، اتم های فلزی از جداره حوضچه جوش در جهت عمود بر خطوط ایزوترم (همدما) رسوب می کنند و نظم کریستالی به خود می گیرند. گاهی به جای جداره ها از داخل حوضچه جوش نیز دانه ها جوانه می زنند و کریستال شروع به شکل گیری می کنند. پس از پایان انجماد، بیشتر اتم ها نظم کریستالی پیدا می کنند و با برقراری نیروی جاذبه بین اتمی اتصال بوجود می آید.



۱-۴-۲- فرایندهای جوشکاری حالت جامد یا غیر ذوبی

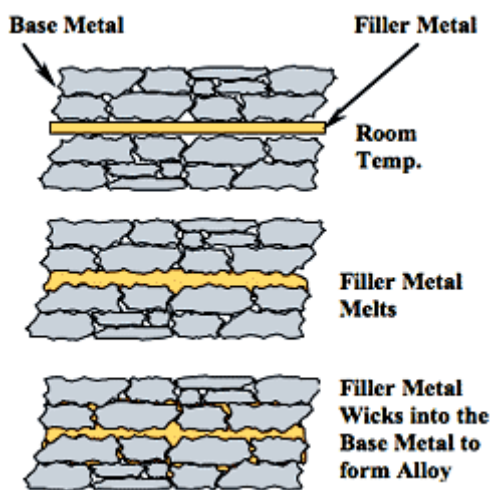
در این گروه از فرایندهای جوشکاری با اعمال فشار و ایجاد تغییر شکل پلاستیک به صورت ماکرو یا میکرو، ناهمواری های سطوح و لبه های مورد اتصال برطرف شده و لایه هوا از بین می رود. در این شرایط لایه اکسیدی و ناخالصی ها نیز خورد شده و از مفصل خارج می شوند. انجام این فرایند برای فلزاتی که در دمای محیط نرم هستند و قابلیت تغییر شکل پلاستیک خوبی دارند امکان پذیر است ولی برای اغلب آلیاژها و مواد این امر مشکل و یا ناممکن است. به هر حال دمای ماده حین فرایند ممکن است دمای محیط باشد یا اینکه تا نزدیک دمای ذوب بالا برود ولی هیچ گونه ذوبی اتفاق نمی افتد و اگر هم اتفاق بیافتد ذوب محل اتصال اساس کار فرایند نیست.

¹Diffusion Bonding

۱-۴-۳- استفاده از ماده واسط

ماده واسط با قرار گرفتن در فاصله دو قطعه در محل اتصال، لایه هوایی را پر می‌کند و سپس براساس چسبندگی یا نفوذ محدود در یک لایه نازک از شبکه کریستالی، با اتم‌های ماده اصلی نوعی جاذبه برقرار می‌کند و اصطلاحاً یک قفل داخلی^۲ ایجاد می‌شود. در این روش بایستی پیش از شروع فرایند، سطوح را از آلودگی‌ها، چربی‌ها، اکسیدها و ... کاملاً پاک کرد. ضخامت ماده واسط در محل اتصال هرچه کمتر باشد اتصال از استحکام بالاتری برخوردار خواهد بود.

اگر ماده واسط غیرفلزی باشد آن را چسب و فرایند را چسبانیدن و اگر ماده واسط فلزی باشد آن را لحیم و فرایند را



لحیم‌کاری می‌نامند. در لحیم‌کاری با توجه به اینکه تمام فلزات (به جزء جیوه) جامد هستند و برای پر کردن فاصله هوایی بایستی به فرم مایع درآیند لذا لازم است در فرایند لحیم‌کاری حرارت به کار رود در حدی که فلز واسط ذوب شده و براساس خاصیت موئینگی در فصل مشترک دو قطعه در محل اتصال نفوذ کند. اما این حرارت به هیچ عنوان نباید در حدی باشد که موجب ذوب لبه‌های قطعات در محل اتصال شود.

با توجه به گستردگی آلیاژهای لحیم، دمای ذوب این آلیاژها معیاری برای تقسیم‌بندی آنها و تشکیل دو گروه مهم از فرایندهای لحیم‌کاری شده است:

لحیم سخت یا دیر ذوب^۳ آلیاژهایی هستند که در دمایی بالاتر از 450°C ذوب می‌شوند و در صورت استفاده از این آلیاژها به عنوان لحیم، فرایند را لحیم‌کاری سخت^۴ می‌نامند.

لحیم نرم یا زود ذوب^۵ آلیاژهایی هستند که در دمایی پایین‌تر از 450°C ذوب می‌شوند و در صورت استفاده از این آلیاژها به عنوان لحیم، فرایند را لحیم‌کاری نرم^۶ می‌نامند.

فرایند اتصال دیگری در صنعت وجود دارد که حالتی بین جوشکاری و لحیم‌کاری سخت است و بسته به نوع آلیاژ به کار برده شده به نام‌های مختلفی نظیر زردجوش یا جوش برنج^۷، نقره جوش^۸ و جوش برنز^۹ شناخته می‌شود. در این فرایندها نیز مشابه لحیم‌کاری سخت از مفتول از جنس آلیاژهای ذکر شده استفاده می‌شود اما تنها تفاوت در این است که میزان حرارت به کار گرفته شده (عمدتاً از طریق شعله) در حدی است که می‌تواند موجت ذوب سطحی یا اصطلاحاً عرق نشستن بر روی قطعه کار نیز شود و به جای رخ دادن پدیده نفوذ (خاصیت موئینگی) عمل رسوب دادن در درز اتصال انجام می‌گیرد (مشابه جوشکاری).

² Inter-Locking

³ Braze

⁴ Brazing

⁵ Solder

⁶ Soldering

⁷ Brass Welding

⁸ Silver Welding

⁹ Bronze Welding

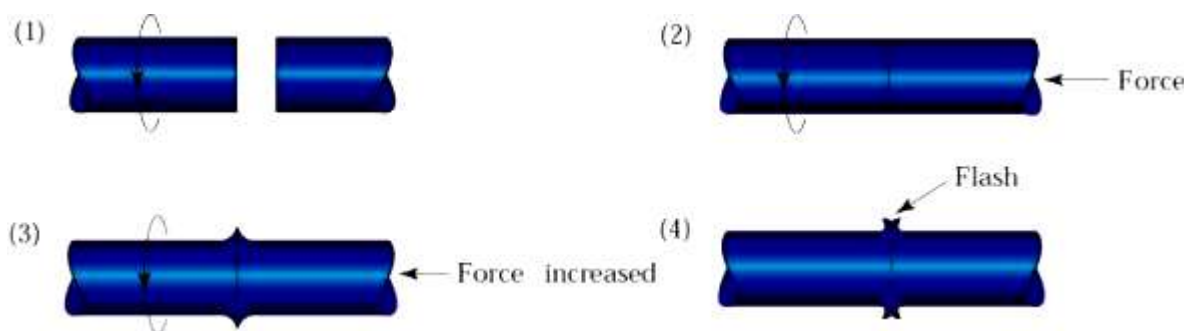
۱-۵-۱- دسته بندی فرایندهای جوشکاری از دیدگاه انرژی به کار برده شده

فرایندهای جوشکاری را از نظر نوع انرژی به کار برده شده می توان به صورت زیر دسته بندی کرد:

۱-۵-۱-۱- انرژی مکانیکی

در برخی فرایندهای جوشکاری، انرژی مکانیکی در اثر اعمال فشار پرس یا غلطک، ضربه، مالش (انرژی جنبشی و اصطکاک)، امواج فراصوتی و امواج انفجاری تولید می شود که می تواند با تغییر شکل پلاستیکی محسوسی یا بدون آن همراه باشد و با تولید حرارت ملموسی یا بدون آن موجب اتصال شود.

اغلب جوشکاری های حالت جامد در این دسته جای می گیرند. از جمله فرایندهایی که از انرژی مکانیکی استفاده می کنند می توان به فرایندهای جوشکاری پتکه ای، جوشکاری فشاری سرد^{۱۰} یا گرم^{۱۱}، جوشکاری اصطکاکی^{۱۲} (شامل روش های جوشکاری اصطکاکی لحظه ای^{۱۳}، پیوسته^{۱۴} و اغتشاشی^{۱۵})، جوشکاری نفوذی و جوشکاری فراصوتی^{۱۶} اشاره کرد.



فرایند جوشکاری اصطکاکی

۱-۵-۱-۲- انرژی شیمیایی

تعدادی از واکنش های شیمیایی به شدت گرمازا هستند و می توان از برخی از آنها به عنوان تامین کننده انرژی جوشکاری استفاده نمود. برای نمونه واکنش اکسید شدن آلومینیم یا سوختن استیلن بسیار گرمازا هستند. فرایندهای جوشکاری که از انرژی شیمیایی استفاده می کنند به دو دسته تقسیم می شوند:

۱-۵-۱-۲-۱- فرایندهای جوشکاری با شعله^{۱۷}

در این فرایندها، ماده سوختنی در ترکیب با اکسیژن می سوزد و ایجاد شعله می کند. از آنجایی که در اکثر موارد ماده سوختنی، گازی شکل است لذا به این فرایندها جوشکاری با گاز نیز گفته می شود. فرایندهای جوشکاری اکسی استیلن، اکسی هیدروژن، اکسی پروپان، اکسی بوتان و اکسی گاز طبیعی از جمله فرایندهای جوشکاری با شعله می باشند.

¹⁰ Cold Pressure Welding

¹¹ Hot Pressure Welding

¹² Friction Welding

¹³ Inertial Friction Welding

¹⁴ Continuous Friction Welding

¹⁵ Friction Stir Welding

¹⁶ Ultrasonic Welding

¹⁷ Flame Welding Processes

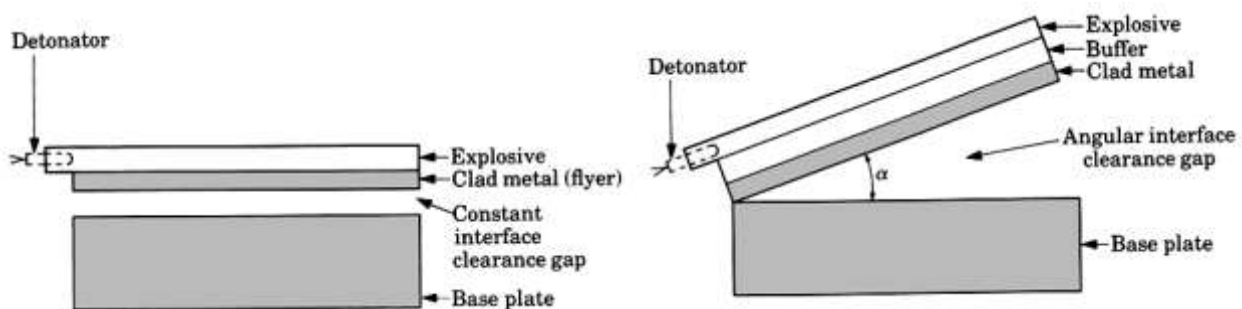
یک مورد از فرایندهای جوشکاری با شعله که دارای ماده سوختنی غیرگازی است یک فرایند جوشکاری ظریف (مورد استفاده در پلاسازی) است که یک سوخت مایع مانند بنزین یا الکل با عبور سریع هوا از مقابل یک نازل (توسط پمپ و با کنترل پدالی)، سوخت مایع از نوک نازل اسپری شده و می سوزد و از حرارت آن برای جوشکاری استفاده می شود.

مورد دیگر فرایند جوشکاری آبی^{۱۸} است که از تجزیه آب گازهای اکسیژن و هیدروژن استخراج و به سمت مشعل هدایت می شوند و در نهایت از شعله و حرارت ناشی از سوختن هیدروژن برای جوشکاری و برشکاری استفاده می شود.

۱-۵-۲-۲- فرایندهای جوشکاری بدون شعله^{۱۹}

در این دسته از فرایندهای جوشکاری در اثر واکنش شیمیایی حرارت ایجاد می شود اما لزوماً با شعله همراه نیست و اگر شعله هم ایجاد شود نقشی اساسی در فرایند جوشکاری ندارد. فرایندهای جوشکاری ترمیت، آلومی ترمیت و منیزی ترمیت در این دسته قرار دارند.

فرایند جوشکاری انفجاری^{۲۰} فرایندی است که حالتی بینابین فرایندهای جوشکاری با انرژی مکانیکی و انرژی شیمیایی دارد. در این فرایند از انرژی حرارتی و مکانیکی انفجار که یک واکنش شیمیایی است برای اتصال دهی استفاده می شود.



فرایند جوشکاری انفجاری

۱-۵-۳- انرژی تشعشعی

این نوع انرژی در فرایندهای پیشرفته جوشکاری از جمله جوشکاری لیزر^{۲۱} و جوشکاری با اشعه الکترونی^{۲۲} مورد استفاده قرار می گیرد.

۱-۵-۴- انرژی الکتریکی

بسیاری از فرایندهای جوشکاری از انرژی الکتریکی استفاده می کنند. با توجه به نحوه تبدیل انرژی الکتریکی به گرمایی، این فرایندها به دو دسته تقسیم می شوند:

¹⁸ Water Welding

¹⁹ Non-Flame Welding Processes

²⁰ Explosive Welding

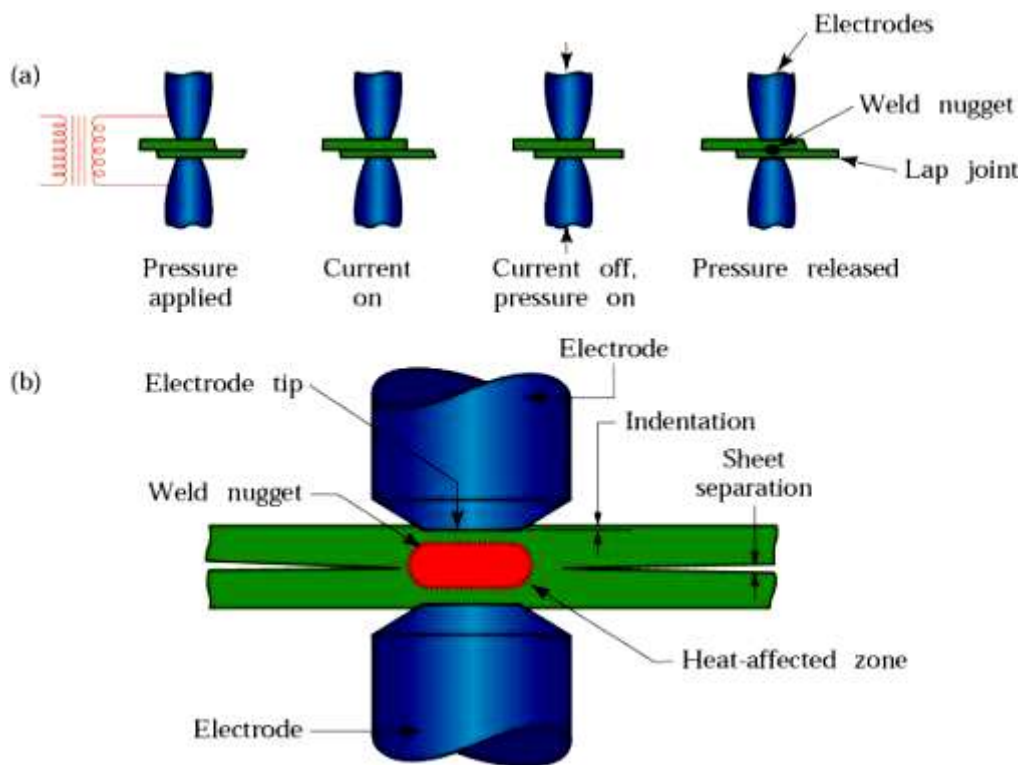
²¹ Laser Beam Welding

²² Electron Beam Welding

۱-۴-۵-۱- فرایندهای جوشکاری مقاومتی

در این فرایندها اساس کار، عبور جریان الکتریکی از یک مقاومت الکتریکی که خود بخشی از اتصال است و تولید گرما در این مقاومت براساس قانون ژول می باشد. حرارت بوجود آمده موجب خمیری یا ذوب شدن موضع اتصال می شود و همزمان اعمال فشار موجب شکل گرفتن اتصال می شود.

فرایندهای جوشکاری نقطه ای^{۲۳} (شامل روش های جوشکاری نقطه ای چند الکتروده^{۲۴}، بخیه ای^{۲۵}، له کردنی^{۲۶} و پیش طرحی یا پرسی^{۲۷})، جوشکاری مقاومتی نواری^{۲۸}، جوشکاری القایی^{۲۹}، جوشکاری مقاومتی فرکانس بالا^{۳۰} و جوشکاری مقاومتی سر به سر^{۳۱} از جمله فرایندهایی هستند که در این دسته قرار می گیرند.



فرایند جوشکاری نقطه ای

²³ Spot Resistance Welding

²⁴ Multiple Electrode Spot Resistance Welding

²⁵ Stitch Spot Resistance Welding

²⁶ Mush Resistance Welding

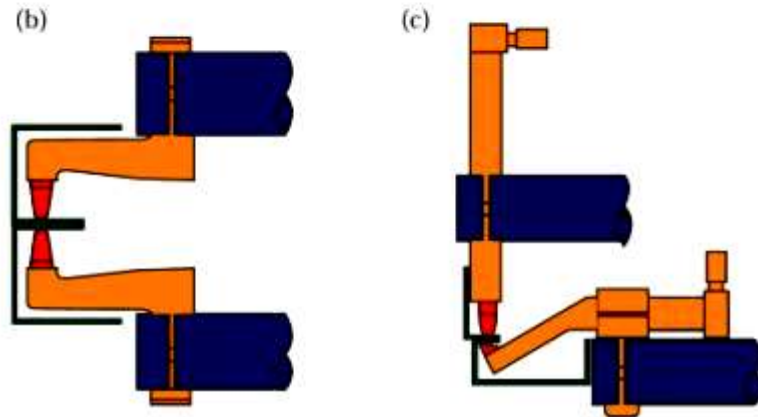
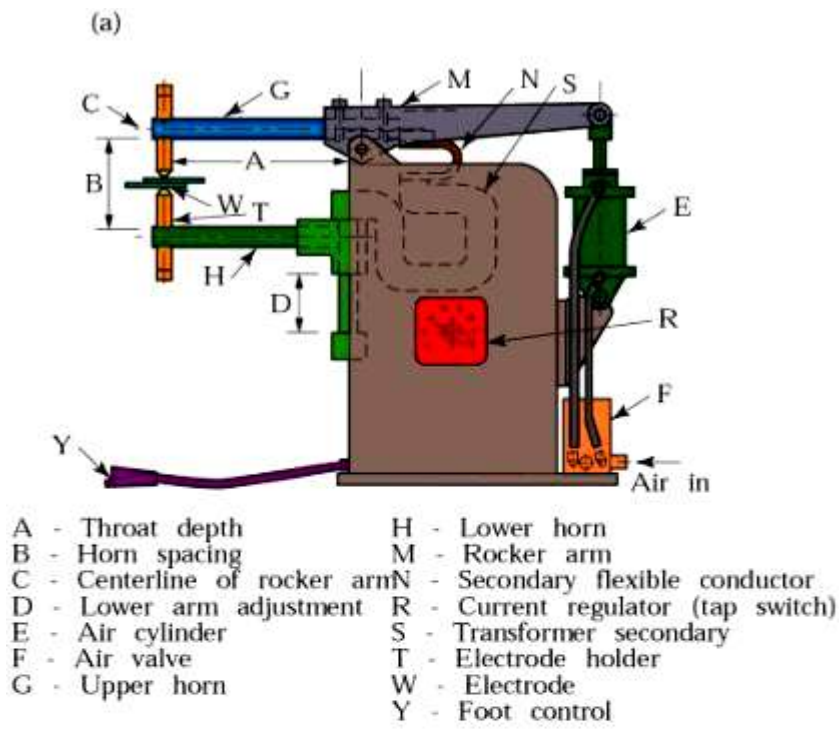
²⁷ Projection Resistance Welding

²⁸ Seam Resistance Welding

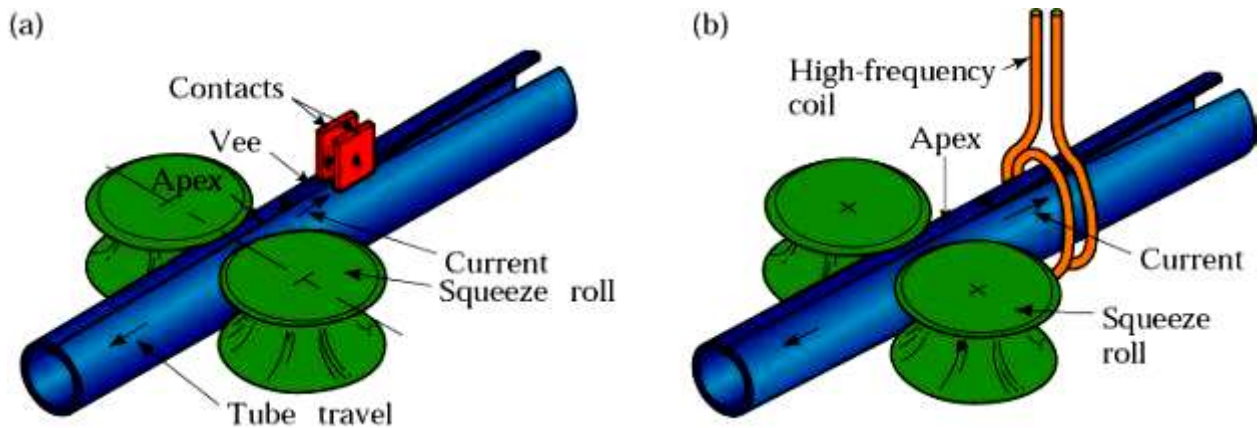
²⁹ Induction Welding

³⁰ High Frequency Resistance Welding

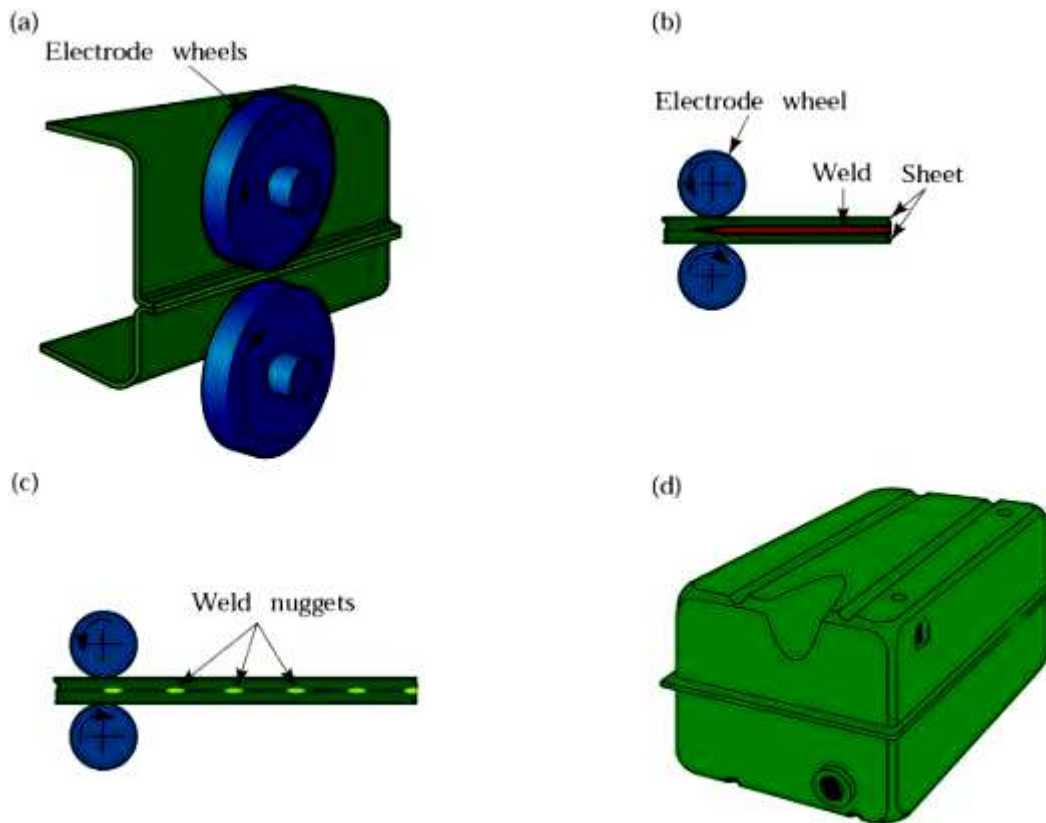
³¹ Upset Resistance Welding



دستگاه جوشکاری نقطه ای



جوشکاری مقاومتی فرکانس بالا



جوشکاری مقاومتی نواری

۱-۲-۴-۵-۱- فرایندهای جوشکاری قوسی^{۳۲}

در این فرایندها با عبور جریان الکتریکی قوی از یک فاصله هوایی، در اثر یونیزه شدن هوا، یک کانال شکل می گیرد و جریان را از خود عبور می دهد. در اثر عبور جریان از این کانال، حرارت و نور ایجاد می شود و از حرارت آن برای ذوب کردن موضع اتصال و الکتروود یا فلز پرکننده به کار گرفته می شود. در این فرایندها با توجه به ذوب شدن فلز در اثر دمای بالای فرایند و اکسایش شدید فلز در دماهای بالا، به نحوی بایستی منطقه جوش (فلز مذاب) را از اکسایش محافظت کرد. براین اساس فرایندهای جوشکاری قوسی خود به دو دسته تقسیم می شوند:

۱-۲-۴-۵-۱- فرایندهای جوشکاری با محافظت سرباره^{۳۳}

فرایندهایی که در آنها محافظت منطقه جوش با استفاده از لایه ای از سرباره انجام می شود. فرایندهای جوشکاری قوسی الکتروود دستی^{۳۴}، جوشکاری زیر پودری (قوس مخفی)^{۳۵}، جوشکاری الکتروود مداوم پوشش دار^{۳۶} و جوشکاری با الکتروود درون پودری^{۳۷} نمونه ای از این فرایندها هستند.

³² Arc Welding Processes

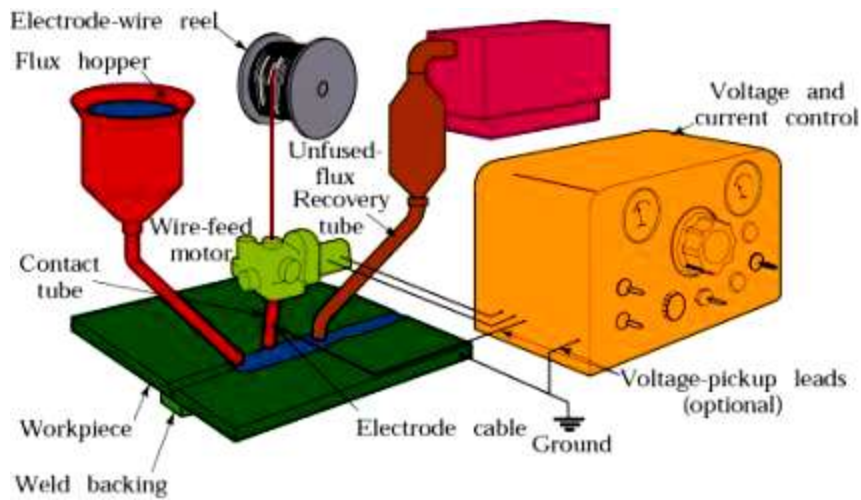
³³ Flux-Shielded Arc Welding Processes

³⁴ Manual Metal Arc Welding Or Shielded Metal Arc Welding

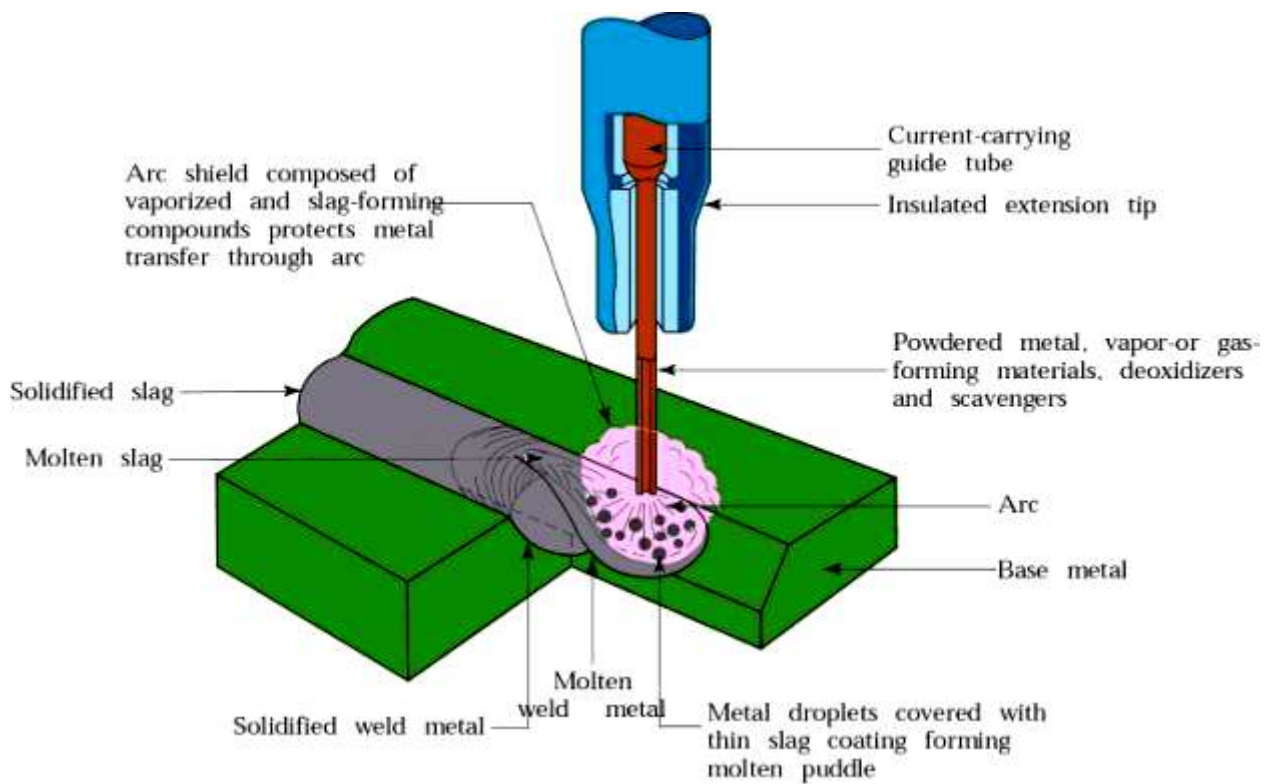
³⁵ Submerged Arc Welding

³⁶ Continouse Metal Arc Welding

³⁷ Flux-Cored Wire Arc Welding



فرایند جوشکاری زیر پودری (قوس مخفی)



فرایند جوشکاری با الکتروود درون پودری

۱-۵-۴-۲- فرایندهای جوشکاری با گاز محافظ^{۳۸}

فرایندهایی که در آنها محافظت منطقه جوش با استفاده از هاله ای از گاز انجام می‌شود. فرایندهای جوشکاری گاز الکتریکی^{۳۹}، جوشکاری با الکتروود تنگستن و گاز خنثی^{۴۰}، جوشکاری الکتروود مصرفی با گاز خنثی^{۴۱}، جوشکاری الکتروود مصرفی با گاز CO_2 ، جوشکاری زائده ای^{۴۲}، جوشکاری جرقه ای^{۴۳} و جوشکاری با قوس پلاسما^{۴۴} در این گروه جای می‌گیرند.

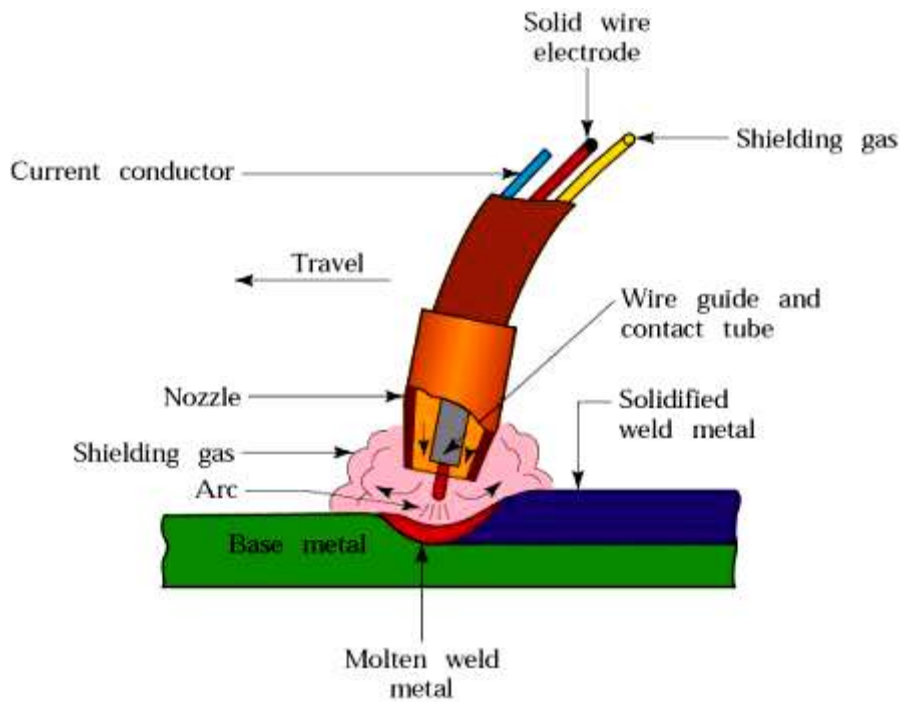
³⁸ Gas-Shielded Arc Welding Processes

³⁹ Electro Gas Welding

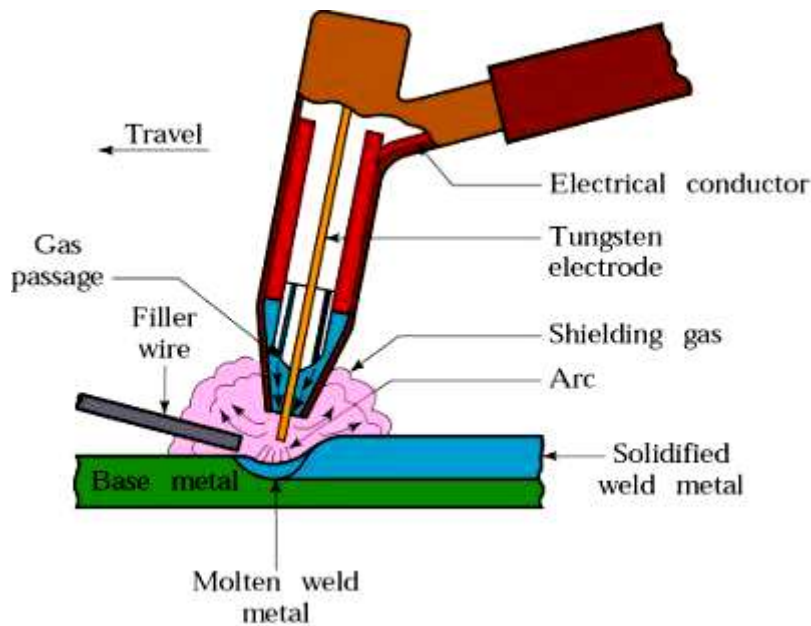
⁴⁰ Tungsten Inert Gas (TIG) Or Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)

⁴¹ Metal Inert Gas (MIG) Welding

⁴² Stud Welding



جوشکاری الکتروود مصرفی با گاز خنثی (MIG)



جوشکاری با گاز محافظ

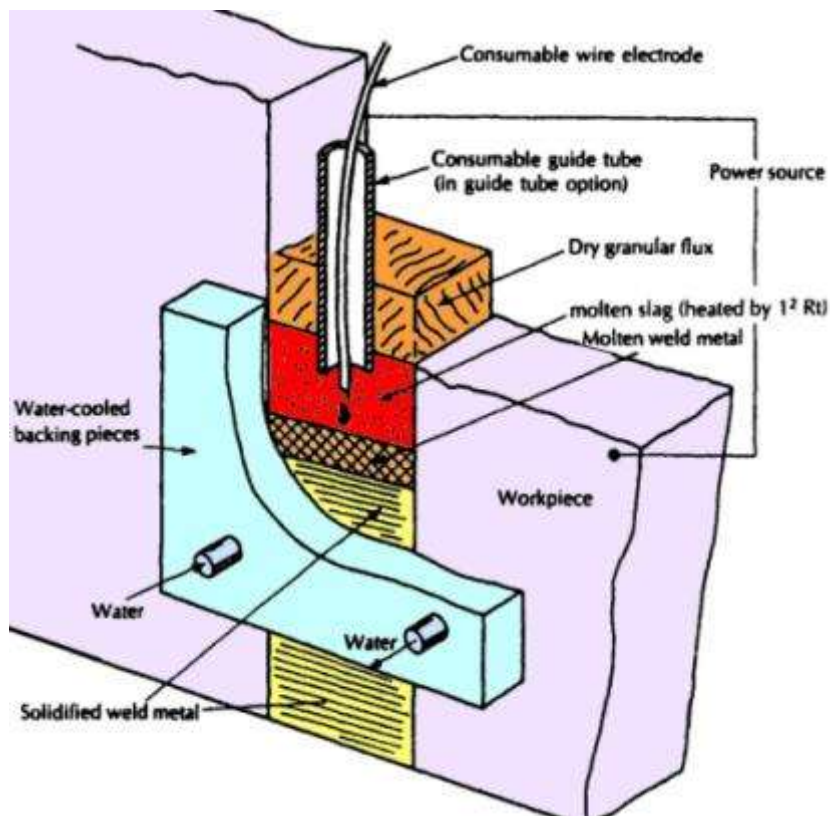
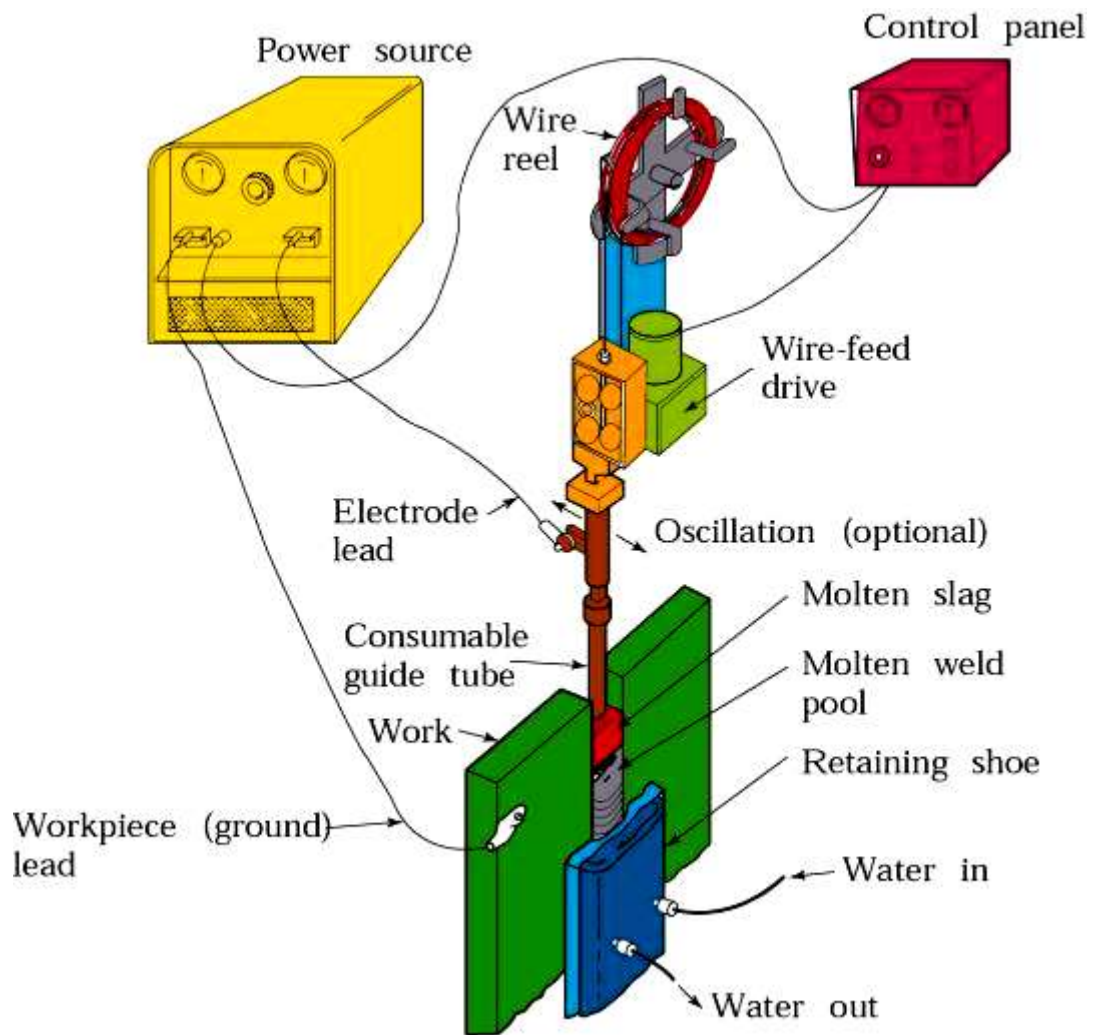
در فرایندهای جوشکاری قوسی گاهی زمان ذوب آنچنان کوتاه است که ممکن است محافظت با سرباره یا گاز اساساً ضرورتی نداشته باشد.

فرایند جوشکاری با سرباره الکتریکی^{۴۵} فرایندی بینابین فرایندهای مقاوتی و قوسی است. بدین ترتیب که ابتدا با ایجاد قوس، جوشکاری شروع می‌شود و سپس با استفاده از مقاومت الکتریکی سرباره، حرارت مورد نیاز برای ادامه جوشکاری تامین می‌شود.

⁴³ Flash Arc Welding

⁴⁴ Plasma Arc Welding (PAW)

⁴⁵ Electro-Slag Welding



جوشکاری با سرباره الکتریکی

فصل دوم: فرایندهای جوشکاری ذوبی

۲-۱- مقدمه

فرایندهای جوشکاری ذوبی فرایندهایی هستند که مستلزم ذوب و گداز جزئی موضع اتصال میان دو قطعه هستند. در این فرایندها ممکن است از فلز پرکننده استفاده شود یا نشود. در جدول زیر ویژگی های انواع فرایندهای جوشکاری ذوبی باختصار آورده شده است.

Joining process	Operation	Advantage	Skill level required	Welding position	Current type	Distortion*	Cost of equipment
Shielded metal-arc	Manual	Portable and flexible	High	All	ac, dc	1 to 2	Low
Submerged arc	Automatic	High deposition	Low to medium	Flat and horizontal	ac, dc	1 to 2	Medium
Gas metal-arc	Semiautomatic or automatic	Most metals	Low to high	All	dc	2 to 3	Medium to high
Gas tungsten-arc	Manual or automatic	Most metals	Low to high	All	ac, dc	2 to 3	Medium
Flux-cored arc	Semiautomatic or automatic	High deposition	Low to high	All	dc	1 to 3	Medium
Oxyfuel	Manual	Portable and flexible	High	All	—	2 to 4	Low
Electron-beam, Laser-beam	Semiautomatic or automatic	Most metals	Medium to high	All	—	3 to 5	High

* 1, highest; 5, lowest.

در ادامه به تشریح اصول فرایندهای جوشکاری ذوبی پر کاربرد می پردازیم.

۲-۲- جوشکاری گاز اکسیژنی^{۴۶}

جوشکاری گاز اکسیژنی واژه ای کلی است برای بیان هرگونه فرایند جوشکاری که در آن از یک گاز سوختی استفاده می شود که برای ایجاد شعله با اکسیژن ترکیب می شود.

۲-۲-۱- انواع فرایندهای جوشکاری گاز اکسیژنی

متداولترین فرایند در این دسته، فرایند جوشکاری اکسی استیلن است و اغلب برای ساخت سازه های ورقی، بدنه خودرو، کاربردهای تعمیراتی و ... به کار می رود. در این فرایند دمای شعله ممکن است تا 3300°C برسد.

⁴⁶ Oxyfuel Gas Welding

در فرایندهایی دیگر جوشکاری گاز اکسیژنی از گازهای سوختی دیگری مانند **هیدروژن** و **متیل استیلن پروپادین** نیز استفاده می‌شود. شعله گاز اکسیژن خالص بیرنگ است و بنابراین تنظیم چشمی شعله آن دشوار است. **دماهای** حاصل از سوختن این گازها **پایین** است و برای جوشکاری دو گروه زیر مناسبتر هستند:

(۱) فلزات با دمای ذوب **پایین** مانند سرب

(۲) قطعات **کوچک** و **نازک**

گازهایی مانند **گاز طبیعی**، **پروپان** و **بوتان** نیز در فرایندهای جوشکاری گاز اکسیژنی قابل استفاده هستند ولی با توجه به این که **شعله آنها اکسید کننده** است، استفاده از آنها **توصیه نمی‌شود**.

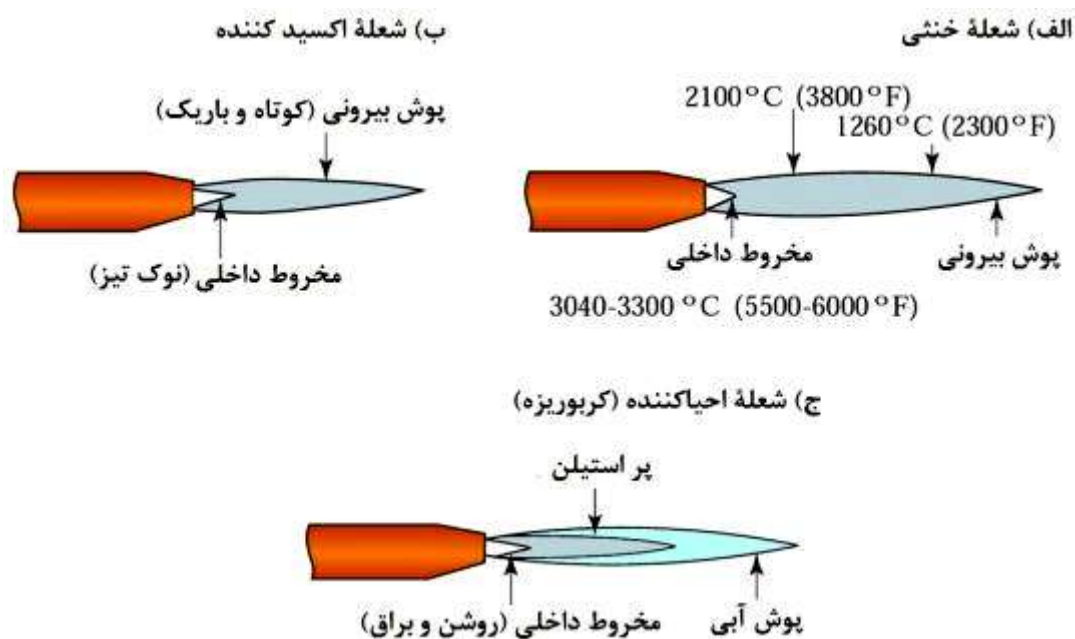
۲-۲-۲- انواع شعله

با توجه به **نسبت** گاز اکسیژن به **گاز سوختی** (غالباً استیلن) در مخلوط گازی، **سه نوع شعله** بوجود می‌آید:

شعله خنثی^{۴۷}: اگر نسبت گاز اکسیژن به گاز سوختی در مخلوط گازی، **یک به یک** باشد یعنی **اکسیژن** به میزان **کافی** موجود باشد و هیچ گونه اکسیژن **اضافی** نیز موجود **نباشد** در این صورت شعله خنثی بوجود می‌آید.

شعله اکسید کننده^{۴۸}: اگر **اکسیژن اضافی** در مخلوط گازی موجود باشد در این صورت شعله اکسید کننده بوجود می‌آید. این شعله برای **فولادها مناسب نیست** و موجب اکسایش آنها می‌شود ولی در مورد **مس** و آلیاژهای آن می‌توان از شعله اکسید کننده استفاده نمود چون در این مورد **یک لایه نازک سرباره روی فلز مذاب** تشکیل و از اکسایش آن **جلوگیری** می‌کند.

شعله احیا کننده (کربوریزه)^{۴۹}: اگر **اکسیژن** موجود در مخلوط گازی **کافی نباشد** در این صورت شعله احیا کننده بوجود می‌آید. **دمای** شعله احیا کننده **پایین تر** از دمای دو نوع دیگر است. بنابراین این نوع شعله برای **کاربردهایی** که به **دمای کمتری** نیاز دارند مناسب است (مانند **لحیم کاری**).



⁴⁷ Neutral Flame

⁴⁸ Oxidizing Flame

⁴⁹ Carburizing (Reducing) Flame

۲-۲-۳- فلزات پرکننده

فلزات پرکننده بمنظور تامین ماده اضافی در موضع جوش به کار می روند و معمولاً به صورت سیم یا مفتول از جنس فلزاتی همساز با فلز پایه در اتصال تهیه می شوند. این مفتول های پرکننده ممکن است **لخت** یا **پوشیده با گداز آور (فلاکس)** باشند. وجود فلاکس به **روش های زیر، حفاظت** از جوش را انجام می دهد:

- ۱) با متصاعد کردن گاز و **ایجاد حفاظ گازی** در اطراف منطقه جوشکاری، اکسیداسیون سطوح قطعات را به **تاخیر** می اندازد.
- ۲) با **انحلال و دفع اکسید ها و آلودگی های سطحی** (به صورت **سرباره**) موجب **افزایش کیفیت** اتصال می شود.
- ۳) با **تشکیل سرباره، مذاب** را از اکسید شدن حفظ می کند.

۲-۲-۴- محدوده کاربرد و قابلیت های انواع فرایندهای جوشکاری گاز اکسیژنی

این فرایندها را برای جوشکاری بیشتر فلزات **آهنی و غیرآهنی، تقریباً با هر ضخامتی** می توان بکار برد، ولی **محدودیت گرمای تولیدی** در این فرایند عملاً کاربرد آن را به ضخامت های **کمتر از 6mm** محدود کرده است. با استفاده از این فرایندها انواع اتصالات جوشکاری را می توان ایجاد کرد.

این فرایند در اصل **دستی** است و بنابراین **سرعت پایینی** دارد، هرچند **امکان مکانیزه کردن** آن هم وجود دارد. این فرایند برای کارهای **ساخت و تعمیر** قابل استفاده است. آموزش درست و **مهارت** کافی جوشکار برای این فرایند الزامی است. از مزایای آن می توان به **ارزان بودن تجهیزات** (کمتر از ۵۰۰ دلار برای دستگاه های کوچک)، **قابلیت حمل و اقتصادی** بودن فرایند برای کارهای ساده و با **حجم تولید پایین** است.

۲-۲-۵- شرح عملیات جوشکاری گاز اکسیژنی

مراحل اساسی فرایندهای جوشکاری گاز اکسیژنی به شرح زیر است:

- ۱) **لبه های** از قطعه کار که باید جوشکاری شود را **آماده** کرده و در **وضعیت مناسب** قرار داده و با **گیره** یا **فیکسچر** مناسب **ثبیت** کنید.
- ۲) ابتدا **شیر گاز استیلن** را **باز** کرده و با **ایجاد جرقه** (توسط فندک) در جلوی مشعل، آن را **شعله ور** کنید.
- ۳) **شیر اکسیژن** را **باز** کنید و **شعله** مناسب عملیات مورد نظر را **تنظیم** کنید.
- ۴) **شعله** را تحت **زاویه** حدودی 45° نسبت به سطح قطعه کار نگه دارید به طوری که **شعله مرکزی نزدیک سطح قطعه** کار قرار گیرد و **مفتول پرکننده** را نیز تحت زاویه 30° تا 40° نگه دارید.
- ۵) **مفتول پرکننده** را به محل اتصال **مماس** کرده و **حرکت** آن را با توجه به **آهنگ ذوب شدن** و **پر شدن خط جوش** تنظیم کنید.

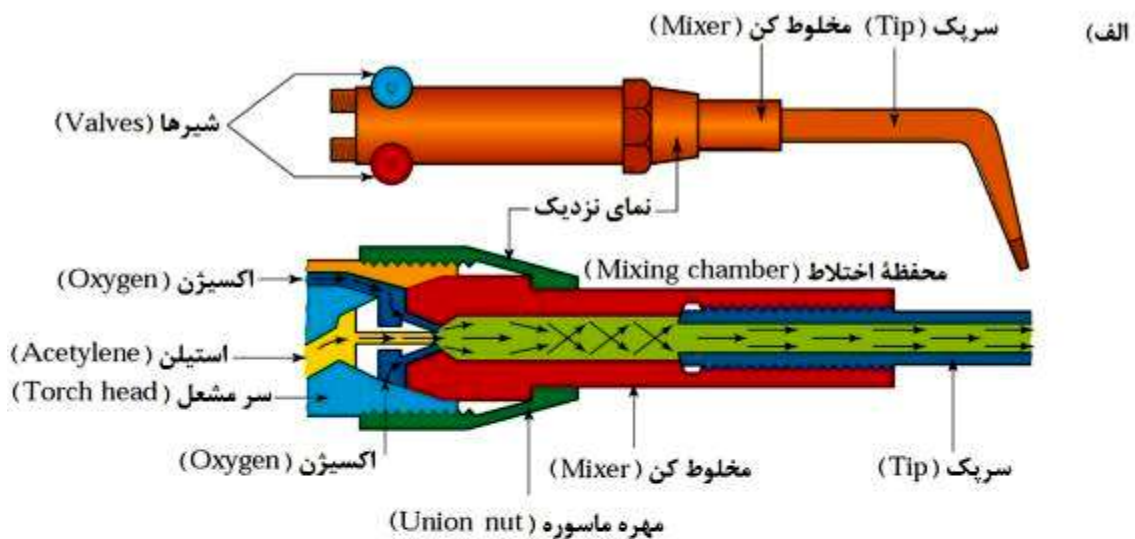
اتصالات کوچک تنها با یک پاس شکل می گیرند ولی اتصالات با شیار جناغی (V-شکل) عمیق با چند پاس تکمیل می شوند. تمیزکاری سطوح و خط جوش در هر پاس جوشکاری برای جلوگیری از بروز عیوب در جوش حائز اهمیت است. بدین منظور معمولاً از برس های سیمی دستی یا برقی استفاده می شود.

۲-۲-۶- تجهیزات جوشکاری گاز اکسیژنی

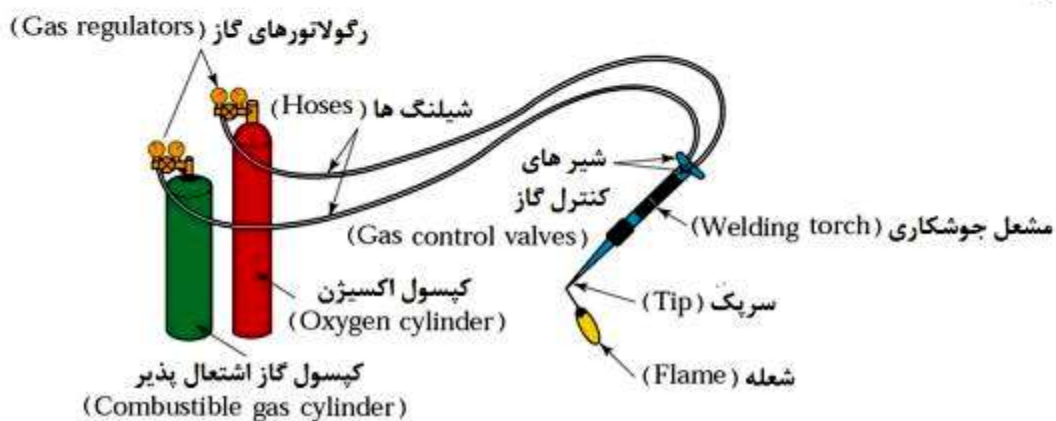
تجهیزات مورد استفاده در فرایندهای جوشکاری گاز اکسیژنی، شامل یک مشعل جوشکاری است که از طریق شیلنگ های مخصوص به کپسول های گاز تحت فشار و اکسیژن مجهز به رگولاتور و فشارسنج وصل می شود.

اتصال درست شیلنگ به کپسول ها از لحاظ ایمنی اهمیت دارد. لذا جهت حصول اطمینان از اتصال صحیح، کپسول های اکسیژن و استیلن رزوه های متفاوتی هستند به طوری که اتصالات استیلن چپگرد هستند در صورتی که اتصالات اکسیژن راستگرد می باشند. کپسول ها بایستی قلاب بند شده و از زمین افتادن یا حمل نادرست آنها بایستی خودداری شود.

در شکل زیر نمای کلی و مقطع یک مشعل مورد استفاده در جوشکاری استیلن و تجهیزات اساسی مورد استفاده در فرایندهای جوشکاری گاز اکسیژنی نشان داده شده است.



(ب)

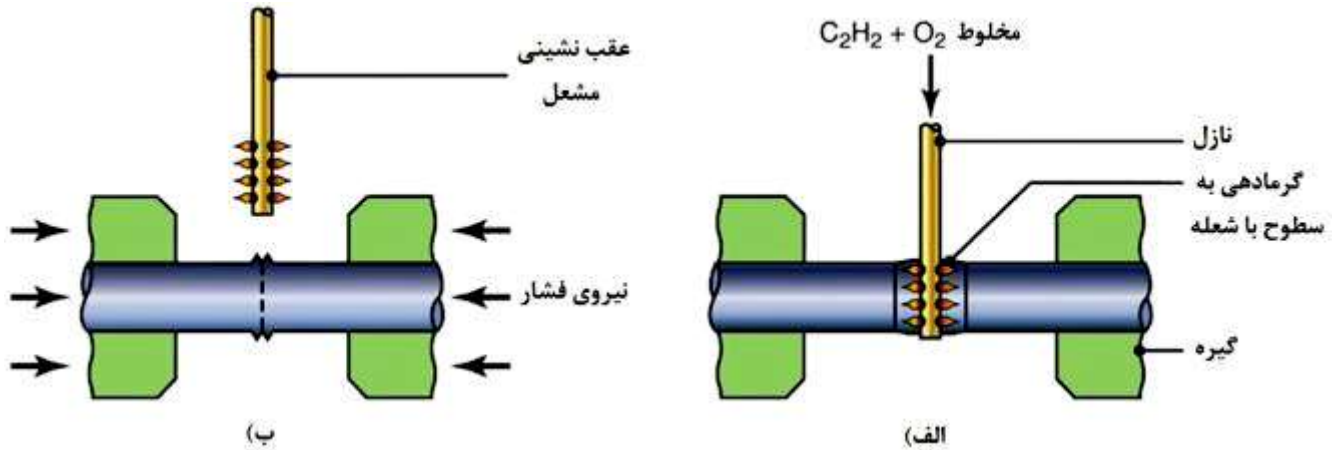


الف) نمای کلی و مقطع یک مشعل مورد استفاده در جوشکاری استیلن

ب) تجهیزات اساسی مورد استفاده در فرایندهای جوشکاری گاز اکسیژنی

۷-۲-۲- فرایند جوشکاری گازی فشاری^{۵۰}

فرایند جوشکاری گازی فشاری یکی از فرایندهای جوشکاری گاز اکسیژنی است که در آن با گرمایش فصل مشترک دو قطعه توسط مشعل (اغلب گاز استیلن) و آغاز ذوب آن، مشعل عقب کشیده می‌شود و با اعمال نیروی محوری، دو قطعه به هم پرس می‌شوند. نیروی محوری آنقدر حفظ می‌شود تا فصل مشترک منجمد شود و اتصال شکل بگیرد. در موضع اتصال در اثر چاق شدن ناشی از اعمال فشار به مذاب، پلیسه شکل می‌گیرد.



فرایند جوشکاری گازی فشاری

۳-۲- فرایندهای جوشکاری قوسی با الکتروود مصرف شدنی

در این فرایندها که در اواسط دهه ۱۸۰۰ میلادی ابداع شدند با اعمال یک جریان الکتریکی مستقیم یا متناوب، قوسی بین سر الکتروود و قطعه کار مورد جوشکاری پدیدار می‌شود که دمایی تا حد $30,000^{\circ}\text{C}$ تولید می‌کند که این دما از دمای جوشکاری گاز اکسیژنی بسیار بالاتر است. در یک دسته از فرایندهای جوشکاری قوسی، الکتروود حین جوشکاری ذوب شده و به عنوان پرکننده مصرف می‌شود که به این فرایندها جوشکاری قوسی با الکتروود مصرف شدنی می‌گویند و در دسته دیگر، الکتروود از جنس فلزات دیرذوب انتخاب می‌شود و در حین جوشکاری ذوب نخواهد شد و برای تامین پرکننده از سیم یا مفتول در کنار الکتروود استفاده می‌شود. در ادامه برخی فرایندهای جوشکاری قوسی با الکتروود مصرف شدنی را شرح خواهیم داد.

۱-۳-۲- اصول قوس الکتریکی^{۵۱}

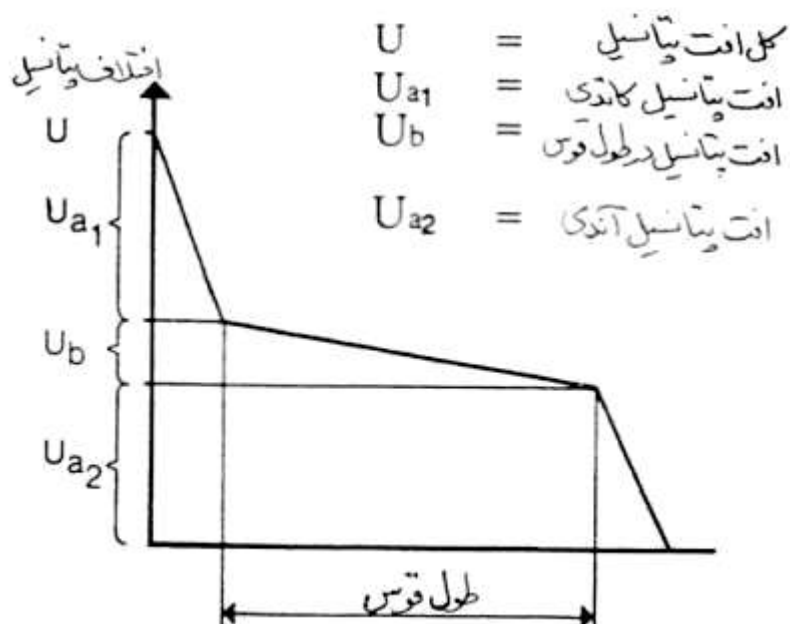
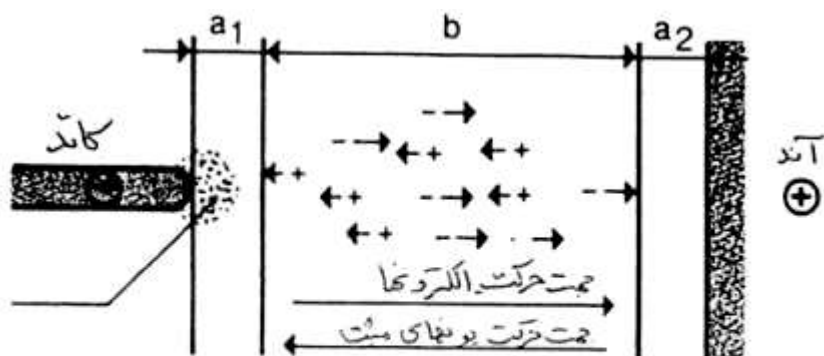
جریان الکتریکی از جاری شدن الکترونها در یک مسیرهادی بوجود می‌آید. هرگاه در مسیر مزبور یک شکاف هوا (گاز) ایجاد شود، جریان الکترونی و در نتیجه جریان الکتریکی قطع خواهد شد. چنانچه شکاف هوا باندازه کافی باریک بوده و اختلاف پتانسیل و شدت جریان به حد کافی بالا باشند، هوای مزبور در شکاف یونیزه شده و جریان الکتریکی مجدداً برقرار می‌گردد. همراه با یونیزه شدن هوا، برخی از الکترونها امتهای تشکیل دهنده هوا از مدار اصلی خود خارج شده و به لایه‌های با انرژی پائین‌تر نزول کرده و انرژی آزاد می‌کنند که به امواج

⁵⁰ Pressure-Gas Welding

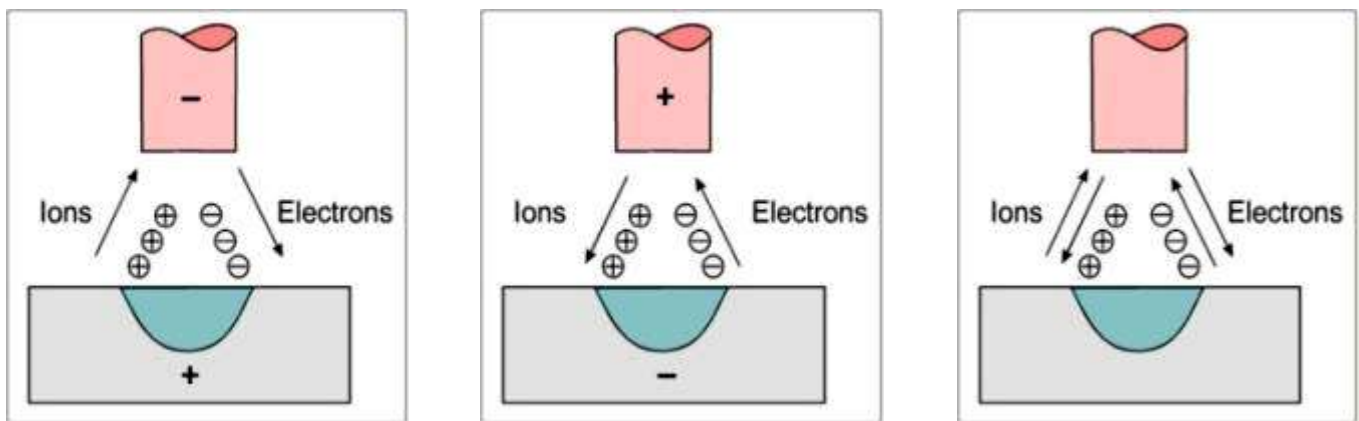
⁵¹ Electric Arc Fundamentals

الکترومغناطیسی تبدیل می‌شود. نوری که در این رابطه در شکاف هوا بوجود می‌آید، فوس الکتریکی نامیده می‌شود. خواص فوس الکتریکی نقش مهمی در روشهای جوشکاری با فوس الکتریکی دارد. از نظر اصولی برای ایجاد فوس الکتریکی به اختلاف پتانسیلی در حد ۵۰۰۰ ولت بر میلیمتر هوا نیاز می‌باشد. از طرفی از نقطه نظر ایمنی، حداکثر ولتاژ مجاز در دستگاههای جوشکاری جریان مستقیم ۱۲۰ ولت و جریان متناوب ۸۰ ولت می‌باشد. بنابراین فوس الکتریکی را باید به یک نحوه دیگری بوجود آورد.

هنگامیکه یک میله فلزی متصل به قطب منفی یک مدار الکتریکی (کاتد) گرم می‌شود، از خودش الکترون ساطع می‌کند. میزان این الکترونها به جنس میله و درجه حرارت آن بستگی دارد. این الکترونها همچون ابری در اطراف کاتد مجتمع می‌شوند (شکل زیر). اگر یک پتانسیل الکتریکی بین این میله و قطعه کار برقرار شود، الکترونها شروع به ترک کاتد نموده و به سمت قطب مثبت (آند) حرکت خواهند نمود. در مسیر بین کاتد و آند، حرکت الکترونها ستاب یافته و بعد از طی مسافت a_1 انرژی جنبشی آنها بحدی می‌رسد که می‌توانند در اتمهای موجود در هوای شکاف اختلال بوجود آورند. در فاصله b ، اتمهای هوا با یونیزه شده (حداقل یک الکترون از دست داده و یا اضافه می‌گیرند) و با اینکه الکترونها آنها تغییر لایه داده و انرژی بصورت نور مرئی (و غیر مرئی) ساطع می‌کنند. گاز یونیزه شده به اینصورت راپلازما می‌گویند. رنگ نور حاصله بستگی به عوامل مختلفی از



جمله نوع گاز موجود در شکاف هوا دارد. الکترونها به طرف آند رفته و در آنجا متوقف شده و انرژی جنبشی آنها به انرژی حرارتی تبدیل می شود. این حرارت باعث افزایش درجه حرارت کاند و در نتیجه ساطع شدن الکترونهاى بیشتری شده و فرآیند تشدید می شود. تشدید فرآیند منجر به افزایش درجه حرارت در کاند و آند می شود. درجه حرارت در طول قوس الکتریکی (منطقه b در شکل بالا) بستگی به شرایط پلاسمای ایجاد شده داشته و برای فلزات آسان یونیزه شده نظیر سدیم و کلسیم (در الکترودهای مصرفی پوشش دار) حدود ۶۰۰۰ درجه سانتیگراد و برای گازهای خنثی نظیر آرگون و هلیوم (در جوشکاری TIG و پلاسما) بالغ بر ۲۰۰۰۰ درجه سانتیگراد می باشد. حرارت ایجاد شده در کاند و آند به عوامل مختلفی از جمله نوع محافظ قوس (پوشش الکتروده، پودریاگاز) و قطبی الکتروده دارد. بعنوان مثال در جوشکاری قوس الکتریکی بروش TIG (بدون فیلر مصرفی) چنانچه جریان از نوع مستقیم بوده و الکتروده به قطب منفی متصل باشد، از آنجائیکه بمباران الکترونی روی قطب مثبت شدیدتر از بمباران یونها روی قطب منفی می باشد، قطعه کار (آند) گرم تر از الکتروده (کاند) خواهد شد. بدیهی است که در جوشکاری با جریان متناوب (تغییر متناوب جهت جریان الکتریکی) توزیع حرارت در کاند و آند یکسان خواهد بود.

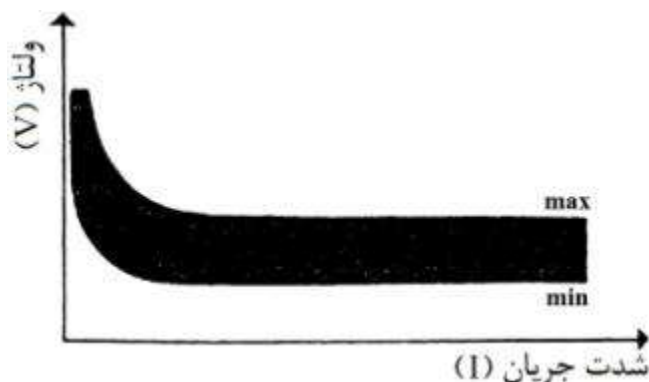


جریان مستقیم با قطبیت مستقیم (DCSP) جریان مستقیم با قطبیت معکوس (DCRP) جریان متناوب (AC)

فاصله بین نوک الکتروده و قطعه کار را می توان به سه ناحیه؛ آند، کاند و طول یا ستون قوس مطابق شکل فوق تقسیم نمود) بیشترین افت پتانسیل در نزدیکی آند و کاند صورت می گیرد. مجموع این دو افت پتانسیل، که به افت کاندی و آندی معروف بوده و بطور کلی بستگی به طول قوس ندارد. حداقل اختلاف پتانسیلی است که یک قوس الکتریکی می تواند دارا باشد. مجموع این دو افت با اضافه افت ناشی از طول قوس الکتریکی، اختلاف پتانسیل قوس الکتریکی را تشکیل می دهد.

$$(2:1) \quad U_{arc} = U_{a1} + U_{a2} + U_b$$

همانطور که از رابطه فوق ملاحظه می شود، افزایش طول قوس باعث افزایش U_b و در نتیجه افزایش پتانسیل قوس خواهد شد. از نقطه نظر فیزیکی، طول قوس از یک حد مشخصی نمی تواند بلندتر باشد، که در روش های معمول جوشکاری بین ۴-۱ برابر قطر الکتروده می باشد. در شکل زیر رابطه حداقل و حداکثر پتانسیل و شدت جریان مصرفی در یک دستگاه جوشکاری بطور شماتیک نشان داده شده است.

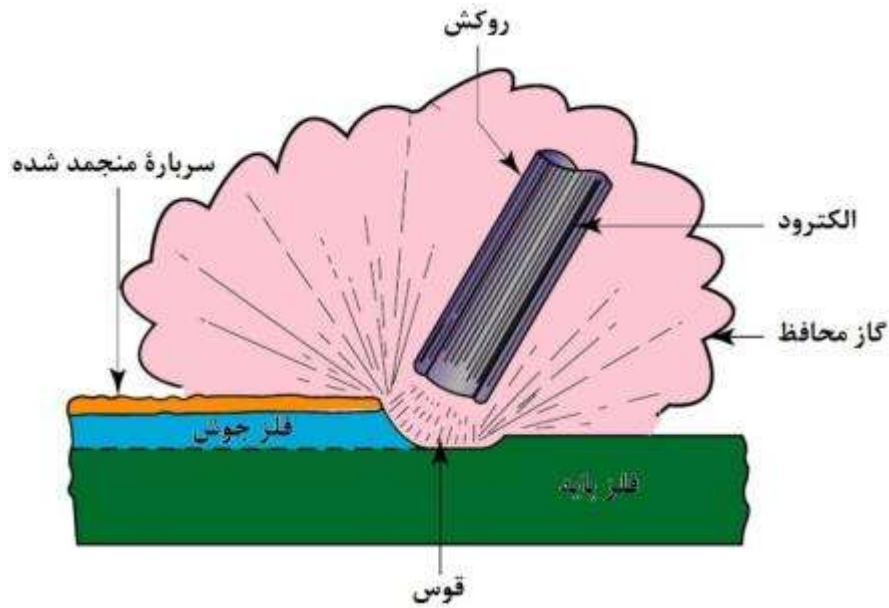


با توجه به مطالب فوق‌الذکر، قوس الکتریکی را می‌توان بدو صورت زیر بوجود آورد (شروع نمود) در معمولی‌ترین روش آن، بین نوک الکترود و قطعه کار، از طریق کشیدن الکترود روی قطعه کار، اتصال کوتاه (صفر شدن اختلاف پتانسیل) بوجود می‌آورند. با توجه به نازک بودن نوک الکترود، اتصال کوتاه باعث ذوب موضعی آن شده و یک شکاف کوچک هوا بوجود آورده و اتصال کوتاه را از بین می‌برد. گرم شدن نوک الکترود و اجتماع الکترونها در اطراف آن همراه با افزایش سریع اختلاف پتانسیل (بواسطه قطع اتصال کوتاه) باعث یونیزه شدن هوا و ایجاد فرایندی در رابطه با افزایش درجه حرارت کاند و آند مطابق آنچه قبلاً ذکر شد خواهد شد. در روش دیگری که بعضاً در روشهای مدرنتر جوشکاری بکار می‌رود، یک ترانسفورمانور فرکانس بالا، اختلاف ولتاژ بالایی را در زمان خیلی کوتاه بین نوک الکترود و قطعه کار بوجود آورده که باعث جرقه زدن و یونیزه شدن هوای شکاف و در نتیجه شروع فرایند ایجاد قوس الکتریکی می‌شود. این روش بعنوان نمونه در جوشکاری قوس الکتریکی با محافظ گاز (TIG) و جوشکاری پلاسما که در آنها الکترود غیر مصرفی می‌باشد، بکار می‌رود. انرژی توسعه یافته در قوس الکتریکی متناسب با اختلاف پتانسیل و شدت جریان بوده و از پارامترهای اصلی در ایجاد یک جوش با کیفیت مطلوب می‌باشد که در فصول بعد مورد بحث قرار خواهد گرفت.

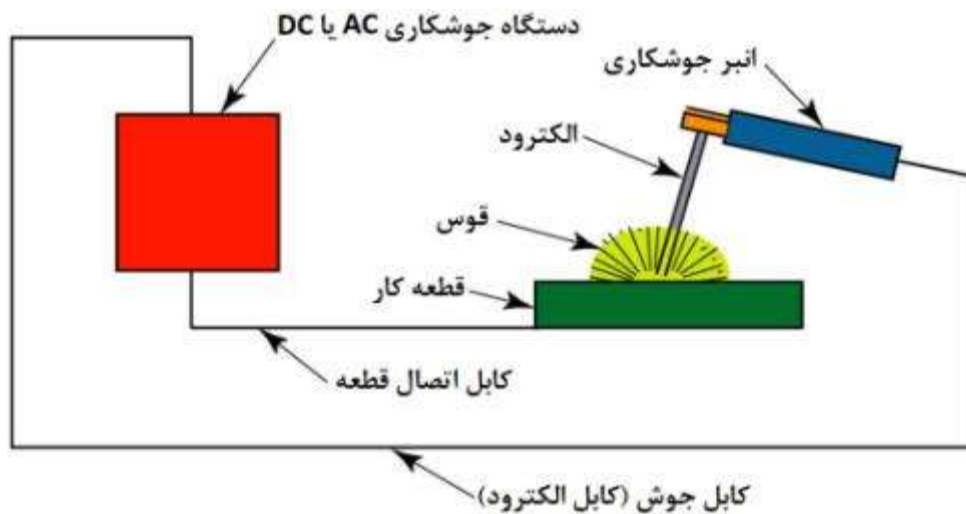
۲-۳-۲- جوشکاری قوس الکترود دستی (SMAW)

جوشکاری قوس الکترود دستی یکی از قدیمی‌ترین، ساده‌ترین و پرکاربردترین روش‌های جوشکاری است. هم‌اکنون حدود 50% از کل جوشکاری‌های صنعتی و تعمیر و نگهداری با این فرایند صورت می‌گیرد.

در این فرایند، قوس الکتریکی از تماس انتهای الکترود پوشش دار با قطعه کار و سپس عقب کشیدن سریع آن تا فاصله ای کافی برای حفظ قوس تشکیل می‌شود. گرمای ایجاد شده، موجب ذوب انتهای الکترود و روپوش آن و همچنین فلز پایه در موضع جوش خواهد شد. پوشش الکترود، اکسیژن را از موضع جوش دور می‌کند و روکشی گازی برای محافظت جوش از اکسیژن محیط تشکیل می‌دهد. در نهایت مخلوطی از فلز پایه، فلز الکترود و عناصری از پوشش الکترود یک خط جوش را در محل اتصال تشکیل می‌دهد.



در این فرایند قطعه کار توسط کابل به یک ترمینال منبع قدرت (دستگاه جوشکاری) متصل می‌شود و الکتروود نیز از انتهای لخت آن توسط انبر به ترمینال دیگر متصل می‌شود. شدت جریان برق معمولاً بین 50A تا 300A است. توان مورد نیاز اغلب کمتر از 10kw است. جریان برق مورد استفاده در جوشکاری ممکن است DC یا AC باشد. بر این اساس جوشکاری قوس الکتروود دستی به دو دسته زیر تقسیم می‌شوند:

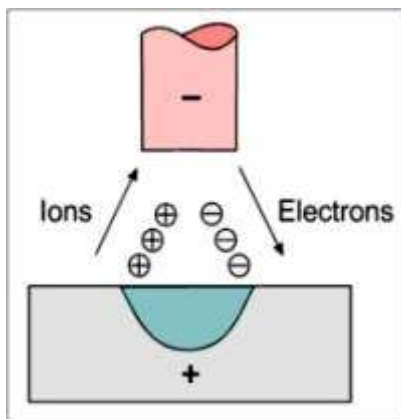


۲-۳-۱- جوشکاری با جریان DC

در جریان DC جهت جریان یکسو است و همواره از قطب مثبت به قطب منفی در نظر گرفته می‌شود (البته حرکت الکترون ها به عنوان حامل های جریان از قطب منفی یا کاتد به قطب مثبت یا آند است). بدین ترتیب **قوس پایدار** با استفاده از جریان DC شکل می‌گیرد و به همین دلیل برای جوشکاری **ورق های فلزی** بسیار مناسب است. از دیگر مزایای جریان DC می‌توان به **امکان استفاده انواع مختلف الکتروود** و **خطرات کمتر** آن و امکان **کار در محیط های مرطوب** اشاره کرد. بر اساس اینکه قطب مثبت الکتروود است یا قطعه کار، استفاده از جریان DC به دو دسته مستقیم و معکوس تقسیم می‌شود.

۲-۳-۱-۱ - قطبیت مستقیم

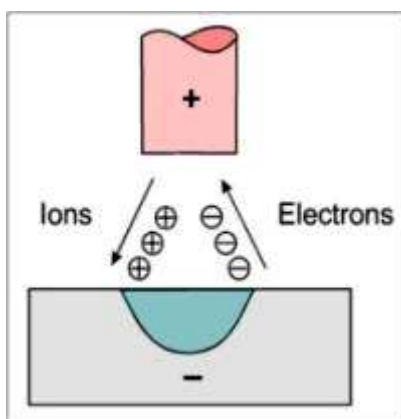
در قطبیت مستقیم به قطعه کار قطب مثبت و به الکتروود قطب منفی متصل می‌شود (شکل زیر). در این وضعیت نفوذ جوش کم و سرعت آن زیاد است و حدود $\frac{2}{3}$ حرارت در قطعه کار و $\frac{1}{3}$ در الکتروود ایجاد می‌شود و بنابراین ذوب قطعه کار بیشتر می‌شود. با توجه به نفوذ کم، این نوع قطبیت برای جوشکاری ورق های فلزی و جوشکاری اتصالات با فاصله هوایی زیاد بین دو لبه مناسب است.



قطبیت مستقیم

۲-۳-۱-۲ - قطبیت معکوس

در قطبیت معکوس به الکتروود قطب مثبت و به قطعه کار قطب منفی متصل می‌شود (شکل زیر). در این وضعیت نفوذ جوش زیاد و سرعت آن متوسط است و حدود $\frac{1}{3}$ حرارت در قطعه کار و $\frac{2}{3}$ در الکتروود ایجاد می‌شود و بنابراین ذوب الکتروود بیشتر می‌شود.



قطبیت معکوس

۲-۳-۲-۲ - جوشکاری با جریان AC

در جریان AC جهت جریان متناوب است و مدام قوس ضریان می‌کند. این نوع جریان برای جوشکاری مقاطع ضخیم و استفاده از الکتروودهای با قطر زیاد و استفاده از جریان های زیاد مناسب است.

۲-۳-۲-۳ - دستگاه های جوشکاری قوس الکتریکی دستی

مهمترین دستگاه های رایج در جوشکاری قوس الکتروود دستی در دسته بندی زیر جای میگیرند.

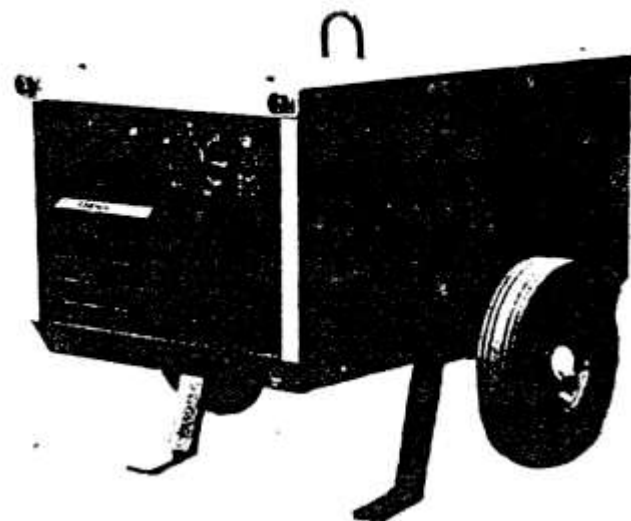
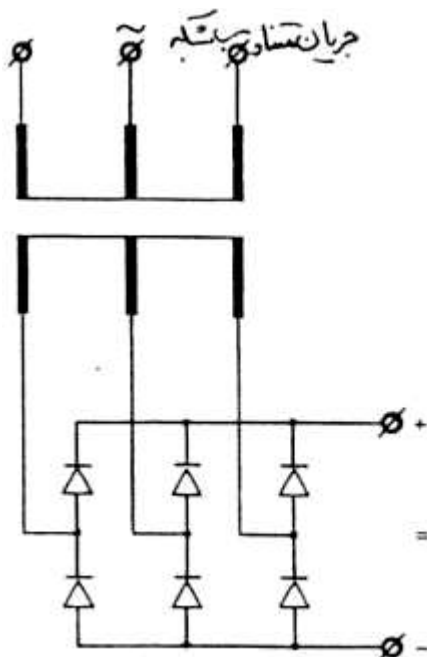
۲-۳-۲-۳-۱ - ژنراتور جریان مستقیم

در این نوع دستگاه ها، چرخش روتور یک ژنراتور جریان مستقیم، ولتاژ و جریان مورد نیاز جوشکاری را تامین می کند. انرژی محرکه ژنراتور توسط جریان برق یا موتورهای احتراق داخلی تامین می شود. در نوع برقی این دستگاه ها، موتور محرک و ژنراتور دارای محور و استاتور مشترک هستند. راندمان الکتریکی این دستگاه ها حدود ۵۰-۵۵ درصد است. ولتاژ و جریان خروجی این دستگاه ها، با تغییر تعداد حلقه های ترانسفورماتور و تغییر شدت جریان تغذیه موتور قابل تنظیم است.

نوع سیار این دستگاه ها از نوع موتورهای احتراق داخلی است که در محل هایی که دسترسی به انرژی الکتریکی دشوار باشد مورد استفاده قرار می گیرند. استفاده از این نوع دستگاه ها در جوشکاری اسکلت های ساختمانی بسیار مرسوم است.

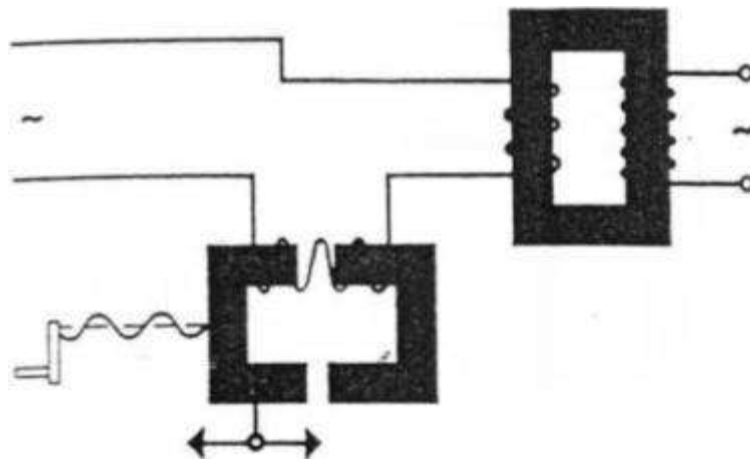
۲-۳-۲-۳-۲ - یکسوسازها

یکسوسازها (Rectifier): برای تبدیل جریان متناوب به جریان مستقیم می توان از ترانسفورماتورهای یکسوساز استفاده نمود. راندمان الکتریکی در این مبدلها، بجهت عدم انجام کار مکانیکی، بالا بوده و بین ۷۵ - ۷۰ درصد می باشد. یکسوسازها عمده‌تاً از یک ترانسفورماتور و یک پل الکتریکی یکسوکننده تشکیل شده‌اند. ترانسفورماتور به برق شبکه (متناوب) وصل شده و یکسوکننده جریان متناوب را به جریان مستقیم (بعضاً بصورت پالسی ضعیف Weak Pulsing) تبدیل می کند. شکل زیر اصول این دستگاهها و همچنین نمونه‌ای از آنان را نشان می دهد. جریان الکتریکی جوشکاری به طرق مختلفی از جمله استفاده از یک هسته مغناطیسی متغیر در مسیر ترانسفورماتور کنترل کننده، تنظیم می شود، که اصول آن در شکل بعد نشان داده شده است. یکسوسازها با تجهیزات اضافی برای ایجاد جریان پالسی نیز در جوشکاری استفاده می شوند. به کمک سیستم پالسی می توان جریان الکتریکی را بین دو سطح با فرکانسی تا حد ۱۰ هرتز تنظیم نمود. جریان الکتریکی با این خصوصیت، جوشکاری مسیرهائیکه پهنای جوش و یا ضخامت قطعه متغیر بوده و یا جوشکاری عمودی و زیر سقفی را سهولت می بخشد.



۳-۳-۲-۳-۲ - ترانسفورماتور جوشکاری

ترانسفورماتور جوشکاری: جوشکاری با جریان متناوب توسط ترانسفورماتورهای جوشکاری صورت می‌گیرد. این ترانسفورماتورها ولتاژ شبکه را بحدی که برای جوشکاری لازم است تقلیل می‌دهند. راندمان الکتریکی در این دستگاهها بالا بوده و به ۸۵ درصد نیز می‌رسد. جریان الکتریکی جوشکاری از طریق استفاده از یک هسته مغناطیسی متحرک و یا تعبیر تعداد سیم‌پیچها در مدار کنترل ترانسفورماتور تنظیم می‌شود. شکل زیر نمونه‌ای از این ماشین همراه با اصول تنظیم جریان آنرا نشان می‌دهد. جریان الکتریکی حاصله در این ماشینها دارای خصوصیات سرانمایی تند (Drooping) می‌باشد. این دستگاهها هم در نوع تک فاز و هم در نوع سه فاز وجود دارند.



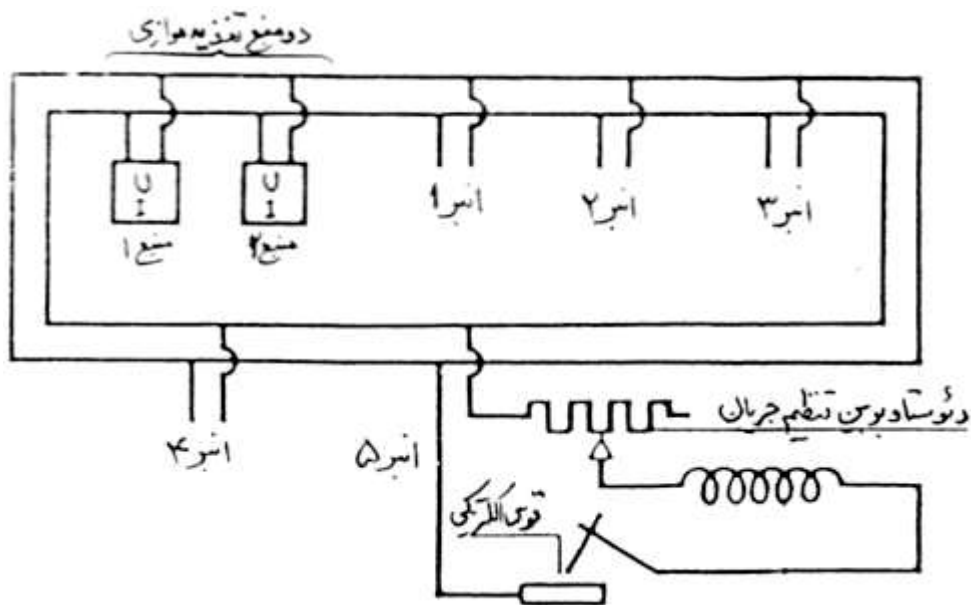
۳-۳-۲-۳-۲ - دستگاه جوشکاری دوگانه

دستگاه جوشکاری دوگانه: این دستگاهها هم دارای یکسوساز و هم ترانسفورماتور تقلیل دهنده می‌باشد. در موقع جوشکاری با جریان مستقیم، دستگاه نظیر یک مبدل یکسوساز عمل کرده و چنانچه جریان متناوب مورد نیاز باشد، پل یکسوساز از مدار خارج شده و دستگاه همانند یک ترانسفورماتور جوشکاری عمل می‌کند. چنانچه از جریان متناوب تک فاز استفاده شود، جریان خروجی مستقیم این دستگاهها معمولاً بشدت پالسی بوده که می‌توان با استفاده از بوبین (Inductor) از شدت پالسی آن کاست. با استفاده از جریان سه فاز می‌توان بهترین جریان مستقیم از نقطه نظر پالسی در این دستگاهها بوجود آورد.

۳-۳-۲-۳-۲ - دستگاه های چند انبره

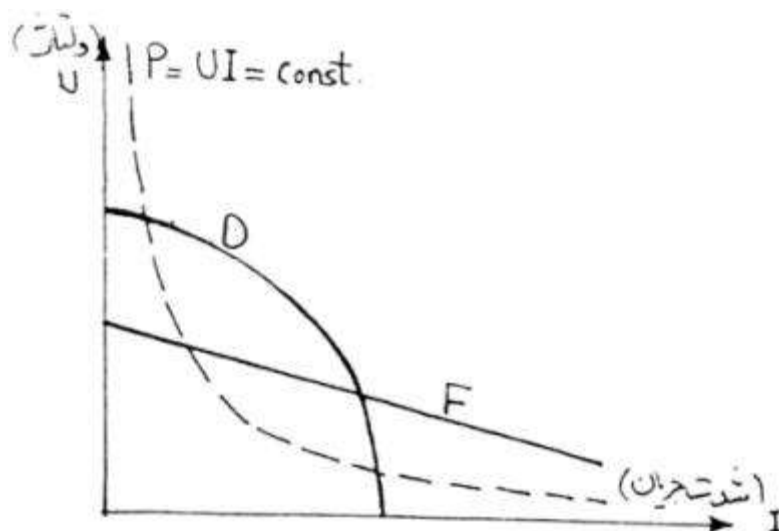
دستگاههای چند انبره: در کارگاههاییکه عملیات جوشکاری گسترده بوده و بعضاً چندین جوشکار همزمان عملیات جوشکاری مشابهی را انجام می‌دهند، می‌توان تحت شرایطی از دستگاههاییکه امکان استفاده همزمان چندین جوشکار را دارا می‌باشند، استفاده نمود. این دستگاهها به ماشینهای جوشکاری چند انبره معروف می‌باشند. شکل ۲-۱۰ اصول استفاده از این دستگاهها را نشان می‌دهد. هر جوشکار دارای یک تنظیم کننده بوده که بتوسط آن میزان جریان را در حد نیاز تنظیم می‌نماید. منبع جریان سیستم میتواند یک یا چند منبع جریان باشد که بصورت موازی در سیستم قرار قرار میگیرند. ایده ساخت چنین دستگاههایی به آنجا بر می‌گردد که

معمولاً ضریب زمانی قوس (نسبت زمانی که قوس الکتریکی روشن بوده، به کل زمان جوشکاری) برای یک جوشکار معمولاً از ۳۰ درصد تجاوز نمی‌کند. در نتیجه، چنانچه چند جوشکار در کارگاهی کار نسبتاً مشابهی را انجام بدهند، می‌توان بجای چند منبع از یک منبع جریان استفاده کرده که دارای قدرتی در حد نهایتاً سوم مجموع قدرت مورد نیاز برای تک تک جوشکارها باشد. دستگاههای جوشکاری چند انبری هم می‌توانند ثابت بوده (با جریان الکتریکی بالغ بر ۲۰۰۰ آمپر) و یا سیار (برای جریان تا ۱۰۰۰ آمپر) باشند. این گونه دستگاهها را می‌توان برای استفاده همزمان ۸-۱۲ جوشکار (بستگی به قطر الکتروود مصرفی) طراحی نمود. در انتخاب بین یک دستگاه چند انبری و چند دستگاه تک انبری، باید به هزینه‌های مربوط به سرمایه گذاری اولیه، تعمیرات و نگهداری در هر مورد توجه نمود و انتخاب اصلح را صورت داد.



۲-۳-۲-۴ - منحنی ولتاژ-آمپر

ویژگی‌های قوس الکتریکی یک دستگاه جوشکاری به منحنی ولتاژ-آمپر دستگاه بستگی دارد. هر دستگاه جوشکاری، منحنی ولتاژ-آمپر خاص خود را دارد. تغییر طول قوس موجب تغییر ولتاژ و در نتیجه آن تغییر آمپراژ می‌شود. یک نمونه منحنی ولتاژ-آمپر در شکل زیر آورده شده است.



نمودار نقطه چین، منحنی ایده آل را نشان می دهد که برای رسیدن به آن، لازم است ولتاژ خیلی بالا باشد که عملی نیست. در عمل دستگاه های جوشکاری دارای یکی از دو نمودار با سراشیبهی تند (منحنی D) و یا نمودار مسطح (منحنی F) می باشند. در حالت مدار باز (قطع مدار یا $I=0$) ولتاژ منحنی D بیشتر از F است و در حالت مدار بسته (اتصال کوتاه یا $V=0$) آمپراژ منحنی F خیلی بیشتر از D است. اگر ولتاژ مدار باز پایین باشد برقراری قوس (با ایجاد جرقه) به سختی صورت می گیرد و اگر جریان مدار بسته خیلی بالا باشد الکتروود به سطح کار می چسبد. همچنین تغییرات طول قوس موجب تغییر ولتاژ می شود و در منحنی D، این تغییرات کمتر موجب تغییر و نوسان در آمپراژ می شود و به عبارت دیگر در منحنی D دامنه نوسان آمپراژ کمتر است. لذا منحنی D نسبت به منحنی F برتری دارد و در دستگاه های دارای این منحنی، قوس الکتریکی دارای ثبات بیشتری است.

۲-۴- جوشکاری زیر پودری

در جوشکاری به طریق زیر پودری، قوس الکتریکی بین الکترود بی پوشش و قطعه کار در زیر پودر مخصوص جوشکاری تشکیل شده و حوضچه جوش را بوجود می آورد. قطرات مذاب الکترود و حوضچه جوش توسط پودر جوش از اتمسفر محیط محافظت می شود. جریان الکتریکی حاصل از منبع قدرت (جریان مستقیم یا متناوب) از طریق سیم الکترود به قوس و قطعه کار هدایت می شود. (حرارت حاصل از قوس الکتریکی باعث ذوب الکترود، پودر جوش و موضع جوش شده و حوضچه جوش را بوجود می آورد. الکترود مصرفی بطور خودکار و مداوم از طریق یک سیستم مکانیکی به محل ذوب تغذیه شده و پس از ذوب در سرتاسر محل اتصال رسوب داده می شود. موضع جوش (قوس الکتریکی و حوضچه جوش) کاملاً توسط پودر جوش پوشانده می شود. اصول جوشکاری به طریق زیر پودری در شکل ۲:۱۱ نشان داده شده است. پودر جوش در پیشاپیش قوس ریخته شده و پس از جوشکاری و انجماد جوش، قسمتی از آن که ذوب نشده است، جمع آوری شده و مجدداً استفاده می شود. در اثنای جوشکاری، بخشی از پودر ذوب شده و بصورت سرباره بر روی جوش باقی می ماند که پس از انجماد از روی جوش جدا می شود. پودر یا فلاکس (Flux) جوشکاری آثار الکتریکی، فیزیکی و متالورژیکی بر روی خصوصیات قوس و جوش دارد که عمدتاً عبارتند از:

(- پوشاندن و محافظت نوک الکترود (قطرات مذاب) و حوضچه جوش از اتمسفر محیط.

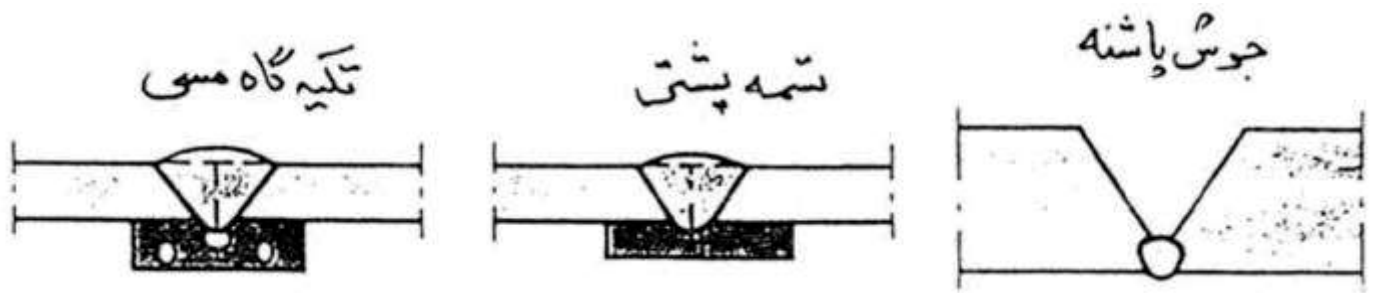
- پایدار نمودن قوس الکتریکی بواسطه حضور برخی ترکیبات معدنی مناسب در پودر.

- واکنش سرباره-گاز-مذاب فلز که باعث تصفیه و تصحیح ترکیبات شیمیایی فلز جوش می شود.

- کنترل شکل گرده جوش.

جوشکاری زیر پودری معمولاً با آمپر نسبتاً بالا (حدود ۳۰-۴۰ آمپر در میلیمتر مربع سطح مقطع الکترود) صورت میگیرد که منجر به نرخ رسوبی بالاتر و عمق نفوذی بیشتر در مقایسه با دیگر روشهای مرسوم جوشکاری می شود. شدت جریان بالا و عمق نفوذ زیاد در این روش، لزوم پخ زدن ورقهای یا ضخامت کمتر از ۸ میلیمتر با جوش یکطرفه و کمتر از ۱۶ میلیمتر با جوش دو طرفه را منتفی می سازد. ورقهای ضخیمتر مستلزم پخ زنی بصورت یکطرفه و یا دو طرفه (با توجه به ضخامت قطعه) بوده که با چند پاس جوش به کمک یک یا چند الکترود (همزمان) جوش داده می شوند.

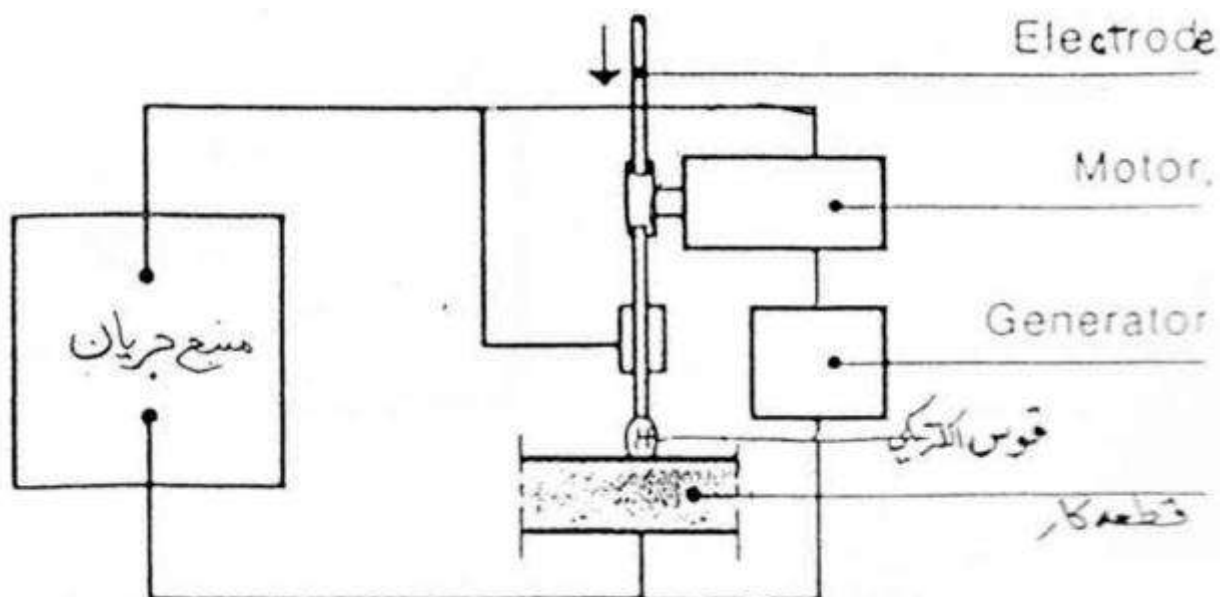
در فرایند جوشکاری زیر پودری حوضچه جوش نسبتاً حجیم بوده و فلز مذاب روان می باشد. در نتیجه در مواردی که عمق نفوذ کامل است، برای جلوگیری از جاری شدن مذاب به پشت درز جوش لازم است از تکیه گاه یا جوش پشتی (Weld backing) استفاده شود. اینگونه تکیه گاهها به اشکال مختلفی قابل طراحی و کاربرد می باشند. تسمه پشتی (Backing strip)، پشتی مسی (Copper backing) که معمولاً با آب خنک می شود و جوش با تسمه (Toe weld) از مرسومترین اینگونه تکیه گاهها می باشند که در شکل ۲:۱۲ بصورت شماتیک نشان داده شده اند.



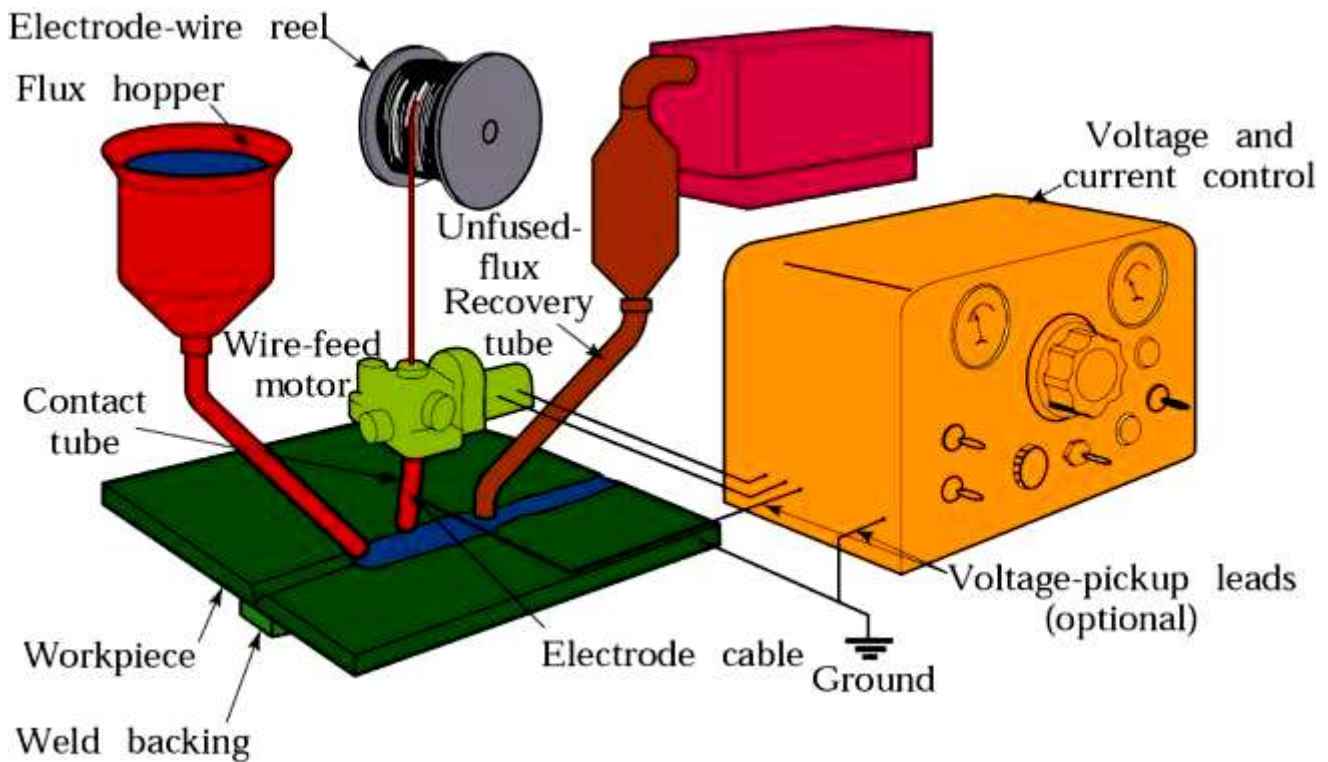
انواع تکیه گاه یا پشتی برای جوشکاری زیرپودری با نفوذ کامل

۲-۴-۱- تجهیزات جوشکاری زیرپودری

جوشکاری زیر پودری هم با جریان مستقیم و هم با جریان متناوب قابل انجام می باشد، بنابراین منبع جریان آن نظیر جوشکاری قوس الکتریکی دستی می تواند زئرا توره، یکسوساز یا ترانسفورماتور باشد. جوشکاری با جریان مستقیم مرسوم تر بوده و بسته بنوع کاربرد روش (نفوذ زیاد یا رسوب جوش زیاد) الکتروود به قطب منفی یا مثبت متصل می شود. منحنی مشخصه ولت-آمپر معمولاً از نوع سراسیبی می باشد. برای بدست آوردن جوش با کیفیت مورد قبول لازم است که جریان و ولتاژ (و در نتیجه طول قوس) در حین جوشکاری ثابت باشند. بنابراین طول قوس باید در رابطه با هر گونه تغییر موضعی ارتفاع (برآمدگی یا فرورفتگی) در طول مسیر جوشکاری تنظیم شود. این تنظیم با بصورت دستی بوده و یا در دستگاههای با منحنی مشخصه ولت-آمپر از نوع سراسیبی ضعیف بصورت خود تنظیمی (Self-adjusting) صورت می گیرد. در دستگاههای با منحنی مشخصه سراسیبی تند، که معمولترین دستگاههای جوشکاری زیر پودری هستند از یک سیستم جنبی کنترل کننده (Regulator) برای حفظ طول قوس استفاده می شود که اصول آن در شکل ۲:۱۳ نشان داده شده است. در این سیستم، یک زئرا توره تنظیم کننده همراه با مونتور تغذیه الکتروود بطور سری در مدار قرار می گیرد. ولتاژ زئرا توره تنظیم کننده ثابت نگه داشته می شود. در حین جوشکاری چنانچه تغییر طول قوسی بواسطه برآمدگی یا فرورفتگی در مسیر جوشکاری حاصل شد، سرعت تغذیه الکتروود کم یا زیاد شده و تغییر مربوطه را جبران می کند.



فسمتهای اصلی در یک دستگاه جوشکاری زیر پودری از منبع جریان، الکتروود و سیسمنم تغذیه آن، پودر و سیسمنم تغذیه آن، سیسمنم محرکه برای حرکت انتقالی ماشین جوش در حین جوشکاری و همچنین سیسمنمهای تنظیم و کنترل برای ولتاژ، آمپر و سرعت پیشروی جوشکاری تشکیل شده است. جوشکاری زیر پودری معمولاً بصورت انوماتیک (و بعضاً نیمه انوماتیک) استفاده می شود که بسته بنوع کاربرد آن می تواند بصورت مسطح به کمک چرخ روی قطعه کار حرکت کرده و یا بر روی تیرک افقی سوار شده در جهت مسیر جوشکاری هدایت شود.



الکتروود مصرفی در جوشکاری زیر پودری بصورت کلاف ۱۰۰-۲۵ کیلوئی با پوشش نازک مسی (برای هدایت بهتر جریان الکتریکی) بوده که توسط یک موتور الکتریکی از میان مجرای هدایت کننده (Guide nozzle) عبور کرده به محل جوش تغذیه می شود. برای جوشکاری اتصال و یا در برخی از جوشکاریهای پوششی از الکتروود با قطر ۶-۴/۲ میلیمتر استفاده می شود. در جوشکاری پوششی، برای پوشش دادن لایه ای سخت و با رنگ تیره بر روی قطعه کار استفاده از الکتروودهای نواری نازک (بعنوان نمونه، با سطح مقطع ۵/۰۶ میلیمتر مربع) نیز معمول می باشد که جوشی با نفوذ کم و پهنای زیاد بر روی قطعه کار رسوب می دهند. برای جوشکاری فولادها، معمولاً ترکیب شیمیایی الکتروود نظیر ترکیب شیمیایی فلز پایه مسی باشد. برای جوشکاری بمنظور سخت کردن سطح قطعات (سخت جوشی) از الکتروودهای مغزپر (Cored electrodes) استفاده می شود. اینگونه الکتروودها از عناصر آلیاژی و تنبیت کننده بصورت پودر پر شده و خواص مورد نظر را بجوش می دهند. پودرهای جوشکاری مورد استفاده در فرآیند جوشکاری زیر پودری، بسته بنحوه تهیه آنها به سه گروه تقسیم می شوند.

۱- پودر جوش ذوب شده (Prefused flux) که از طریق ذوب مخلوط مواد اولیه و سپس خرد کردن و ریز کردن آن تهیه می‌شود. این نوع پودر دارای مزایایی از قبیل ترکیب شیمیایی بسیار همگون و یکنواخت، جذب رطوبت کم و استفاده مجدد پودر بعد از عملیات جوشکاری می‌باشد.

۲- پودر بهم چسبیده شده (Bonded flux) که از طریق مخلوط کردن مواد اولیه بوسیله ترکیباتی از قبیل سیلیکات سدیم (آب شیشه) بهم چسبیده و پس از خشک کردن در درجه حرارت نسبتاً پایینی خرد و دانه بندی می‌شود. از مزایای این پودر امکان افزایش عناصر آلیاژی و اکسیژن زدا، پایین بودن چگالی پودر و سهولت جداسازی سرباره جوش می‌باشد.

۳- پودر جوش آگلوموریت (Agglomerated Flux) از طریق مخلوط کردن مواد اولیه و استفاده از مواد چسبنده سرامیکی با درجه حرارت بالا تهیه می‌شود. انعطاف پذیری اینگونه پودر در رابطه با تنوع ترکیبات مواد اولیه از دو نوع دیگر پودر بیشتر است.

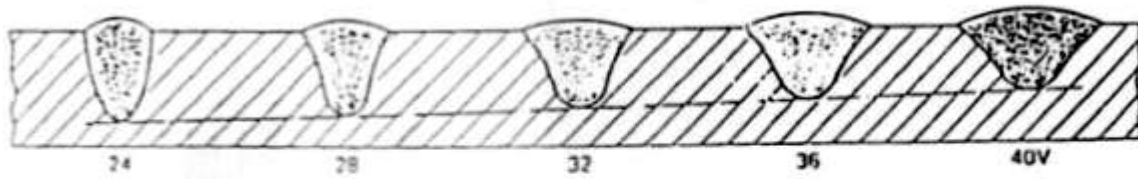
۲-۴-۲ کاربرد جوشکاری زیر پودری

فرآیند جوشکاری زیر پودری عمدتاً برای جوشکاری بانرخ رسوب بالا ویا جوشکاری با نفوذ زیاد در سازه‌های بزرگ فولادی که مساعد برای جوشکاری اتوماتیک می‌باشند بکار می‌رود. در برخی موارد جوشکاری فولادهای زنگ نزن نیز توسط این روش صورت می‌گیرد. در صنعت کشتی سازی و ساخت مخازن ذخیره‌ای و تحت فشار از این روش بصورت گسترده‌ای استفاده می‌شود. روش مزبور استفاده همزمان دو یا سه الکتروود را ممکن می‌سازد. این روش بطور کلی برای جوشکاری در وضعیت مسطح مناسب می‌باشد. این روش همچنین برای جوشکاری پوششی و عملیات سخت کردن سطحی (رویه سختی) بکار برده می‌شود. از جمله برای پوشاندن فلز پایه (فولادهای کم آلیاژی با استحکام بالا) با یک لایه فولاد زنگ نزن (Cladding) در تولید مخازن تحت فشار (بالایگاهها، راکتورهای نیروگاههای هسته‌ای) از فرآیند جوشکاری زیر پودری استفاده می‌شود. از محاسن

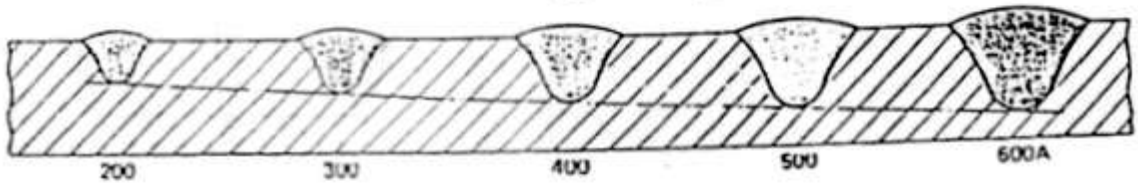
عمده این روش، ایجاد جوش با نرخ رسوب بالا ویا نفوذ زیاد همراه با خواص مکانیکی خوب می‌باشد. از محدودیتهای این فرآیند می‌توان از درشت ساختاری در ساختار میکروسکوپی اتصال (بویژه در منطه مؤثر از جوش HAZ) بواسطه بالا بودن انرژی جوشکاری نام برد.

در میان متغیرهایی که برای ایجاد جوش با کیفیت مناسب باید کنترل شود، شدت جریان، نوع و قطب جریان الکتریکی، ولتاژ جوشکاری و سرعت جوشکاری از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد. شکل ۲:۱۵ تأثیر برخی از پارامترهای جوشکاری را در ظاهر و عمق جوش نشان می‌دهد. ترکیب شیمیایی فلز قطعه کار، الکتروود و پودر مصرفی نیز بر کیفیت نهایی جوش مؤثر هستند.

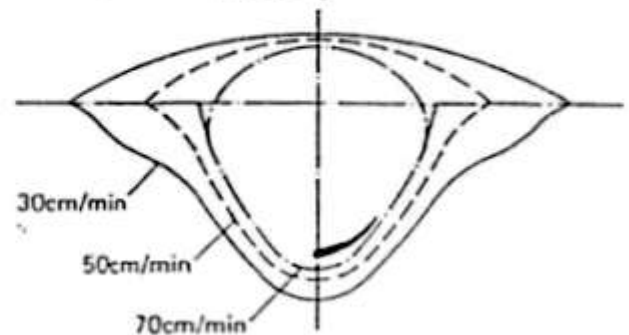
(اثر ولتاژ)



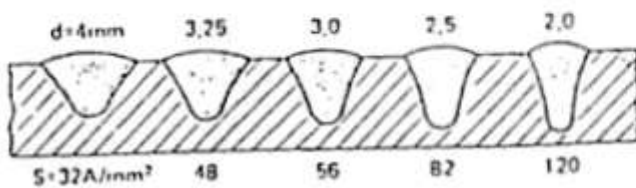
(اثر شدت جریان)



اثر سرعت پیشروی الکترود



(اثر قطر الکترود)

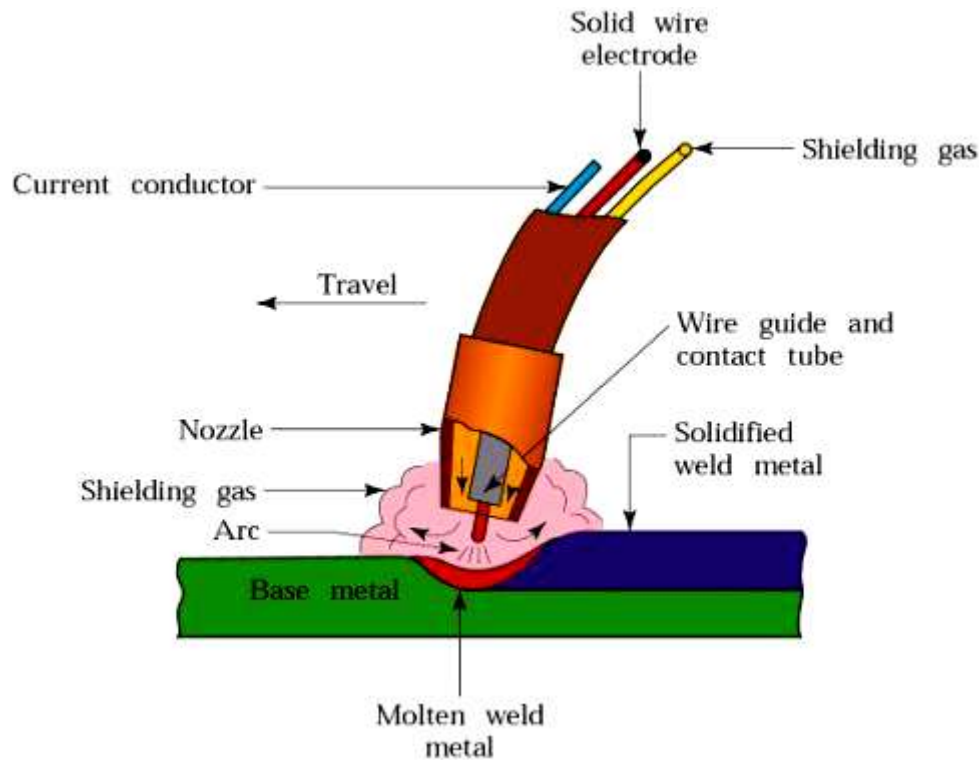


۲-۵- جوشکاری MIG/MAG

جوشکاری قوس الکتریکی با محافظ گاز (Gas metal arc) شامل دو روش MIG و MAG می‌باشد. تفاوت بین این دو روش در نوع گاز مصرفی بوده که برای محافظت جوش بکار می‌رود. در روش MIG (Metal Inert Gas) گاز محافظ از نوع گاز خنثی (آرگون یا هلیوم) بوده، در حالی که در روش MAG (Metal Active Gas) گاز محافظ فعال بوده (نظیر CO_2 یا ترکیبی از آن با آرگون) و بر مذاب فلز اثر می‌گذارد. پوششهای MIG/MAG نیمه انوماتیک (به این معنا که الکترود مصرفی بصورت خودکار به محل جوش تغذیه می‌شود) بوده و قابلیت بسیار خوبی برای جوشکاری مکانیزه (مثلاً اتوماسیون بوسیله رباتهای جوشکاری) دارد. اصول و تجهیزات این دو روش کاملاً شبیه بهم بوده که در شکل ۲:۱۶ نشان داده شده است.

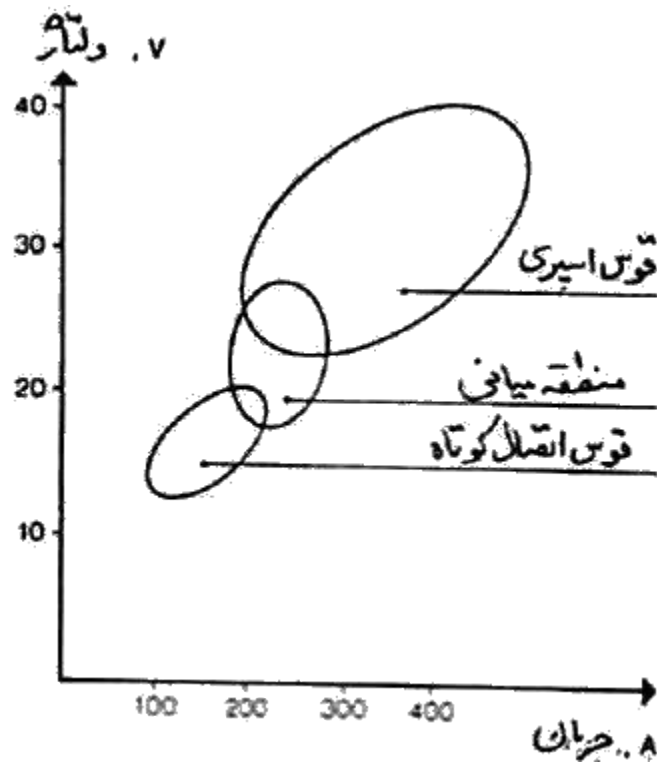
اصول

در جوشکاری بروس MIG/MAG، قوس الکتریکی بین قطعه کار و الکترود مصرفی که بصورت پیوسته بمحل اتصال تغذیه میشود بوجود می آید، انتقال جریان الکتریکی به الکترود توسط یک اتصال دهنده در مشعل با نگهدارنده الکترود (Torch) صورت گرفته که معمولاً به قطب مثبت جریان مستقیم متصل می باشد. الکترود مصرفی بصورت کلاف بوده که از طریق یک سیستم تغذیه مکانیکی از میان مشعل به محل جوش تغذیه شده و پس از ذوب در قوس الکتریکی بصورت قطره های ریز یا درشت به حوضچه جوش ملحق میشود. گاز مصرفی که

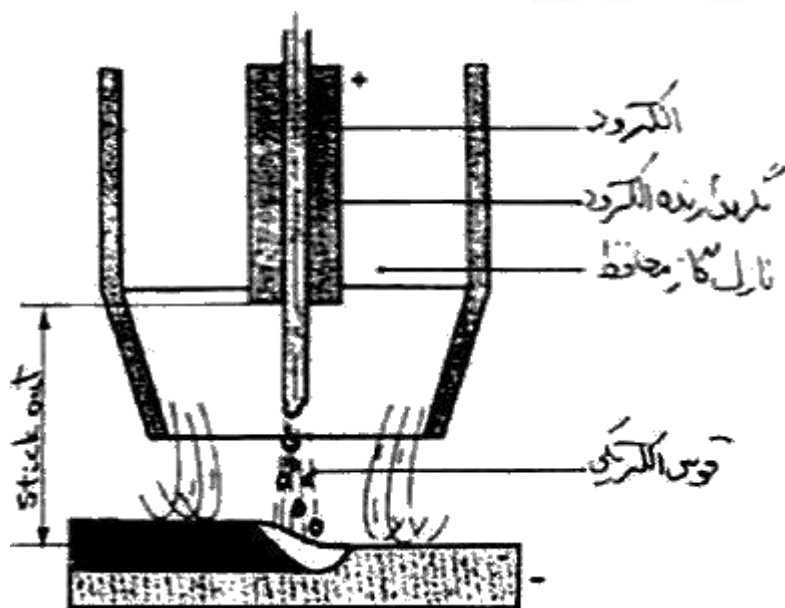


جوشکاری الکترود مصرفی با گاز خنثی (MIG)

بصورت پیوسته در اطراف الکترود تغذیه میشود، قوس الکتریکی و حوضچه جوش را از آتمسفر محیط محافظت می کند. بسته به ولتاژ و آمپر مصرفی، مکانیزم انتقال مذاب الکترود به حوضچه جوش میتواند بصورت قطرات درشت (که بطور لحظه ای باعث اتصال کوتاه در مدار شده) و بارش قطرات کوچک صورت گیرد. شکل ۲:۱۷ حوزه وجودی این دو مکانیزم را در رابطه با آمپر و ولتاژ مربوطه نشان میدهد. در یک منطقه میانی (Transition) ترکیبی از دو مکانیزم مزبور امکان فعالیت خواهد یافت. قوس الکتریکی مربوط به این دو مکانیزم به قوس اتصال کوتاه (برای قطرات درشت) و قوس اسپری (برای قطرات ریز) معروف بوده که ذیلاً باختصار توضیح داده میشود.



فوس اسپری (Spray arc): این نوع فوس هنگامی وجود دارد که انتقال الکتروود مذاب به حوضچه جوش بصورت بارشی از قطرات بسیار ریز (بمراتب کوچکتر از قطر الکتروود) صورت می‌گیرد. از آنجائیکه انتقال مذاب به این صورت به تشکیل اتصال کوتاه در مدار منجر نمیشود، فوس الکتریکی مربوطه باصطلاح "آرام" بوده و فاقد هرگونه ناشی به اطراف می‌باشد. برای نیل به این حالت لازم است که ولتاژ و آمپر مصرفی از حد مشخصی بالاتر بوده تا انرژی بیشتری در فوس توسعه یابد. روش فوق برای جوشکاری قطعات ضخیم‌تر از ۵ میلیمتر در وضعیت افقی مناسب می‌باشد. لازم باشد که گاز محافظ در روش فوس اسپری ترجیحاً باید گاز خنثی (آرگون) و یا مخلوطی از آرگون و CO_2 (حداکثر ۲۵٪) باشد. جوشکاری MIG با این نوع فوس برای جوشکاری آلومینیوم و انواع فولاد زنگ نزن مناسب می‌باشد.



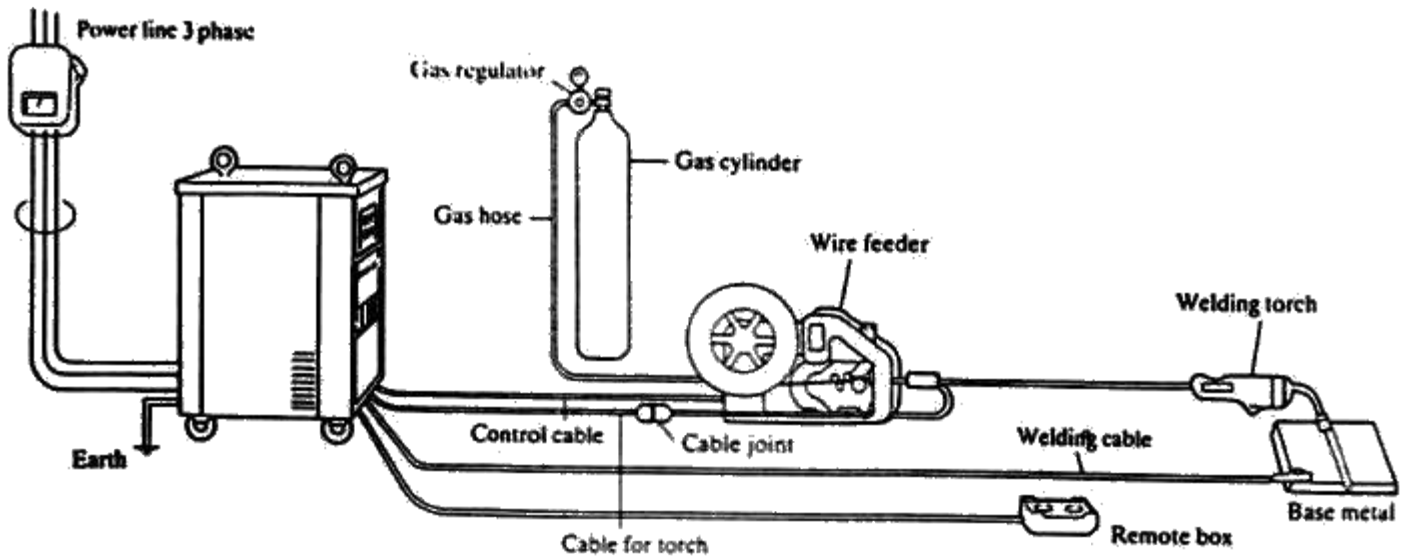
قوس اتصال کوتاه (Short-circuiting arc): انرژی توسعه یافته در این نوع قوس از قوس اسپری پائین تر بوده و لذا روش مناسبی برای جوشکاری قطعات نازک می باشد. مشخصه این روش این است که انتقال مذاب توسط قطرات بزرگ صورت گرفته که در نوک الکتروود تشکیل شده و تا قطری بزرگتر از قطر الکتروود رشد نموده و با پل زدن به حوضچه جوش به آن ملحق میشوند (شکل ۲:۱۸). گذر قطرات مذاب از نوک الکتروود به حوضچه جوش به این صورت همراه با ایجاد اتصال کوتاه در مدار و در نتیجه خاموش شدن قوس می باشد. نیروهای کشش سطحی و الکترومغناطیسی باعث تسریع در کنده شدن قطرات مذاب از الکتروود و باز شدن مجدد مدار میشوند، بطوریکه تعداد دفعات قطع و وصل مدار معمولاً بالغ بر ۲۰۰ بار در ثانیه میشود. شدت جریان اتصال کوتاه بستگی به دستگاه جوش و منحنی مشخصه ولت-آمپر آن داشته و چنانچه از میزان مشخصی بالاتر باشد منجر به جرقه خواهد شد. دستگاههای مدرن جوشکاری MIG/MAG میتوانند قوس اسپری را در آمپرهای نسبتاً پائین نیز ایجاد کنند که در قسمت تجهیزات توضیح داده خواهد شد.



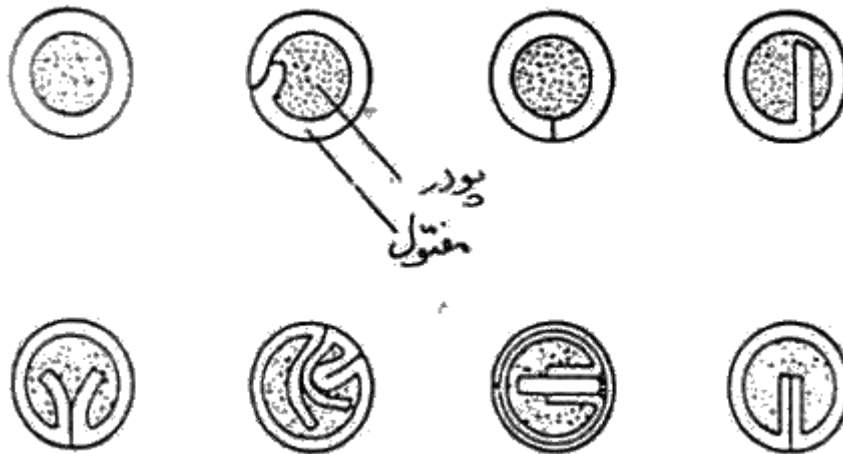
انتقال مذاب به حوضچه جوش در قوس اتصال کوتاه (از چپ به راست)

تجهیزات

دستگاه جوشکاری MIG/MAG از قسمت های اصلی زیر تشکیل شده است (شکل ۲:۱۶): منبع جریان، سیستم تغذیه الکتروود، مشعل یا تریچ جوشکاری (Torch)، سیستم تغذیه گاز و بعضاً سیستم خنک کننده مشعل. الکتروود مصرفی (بدون پوشش) از کلاف الکتروود با یک سرعت ثابت از میان مشعل گذشته و به محل جوش تغذیه میشود. بین مشعل و کلاف الکتروود یک دستگاه دور شمار و تنظیم وجود داشته که به کمک آن میتوان سرعت تغذیه الکتروود را تنظیم نمود. جریان الکتریکی از نوع مستقیم بوده که معمولاً از طریق یکسو سازها تأمین شده و دارای منحنی مشخصه ولت آمپر از نوع مسطح و یا سراسیمبی ضعیف می باشد. خروجی الکتروود (Stick out)، فاصله نازل الکتروود در مشعل تا قطعه کار) معمولاً حدود ۱۵-۱۰ برابر قطر الکتروود انتخاب



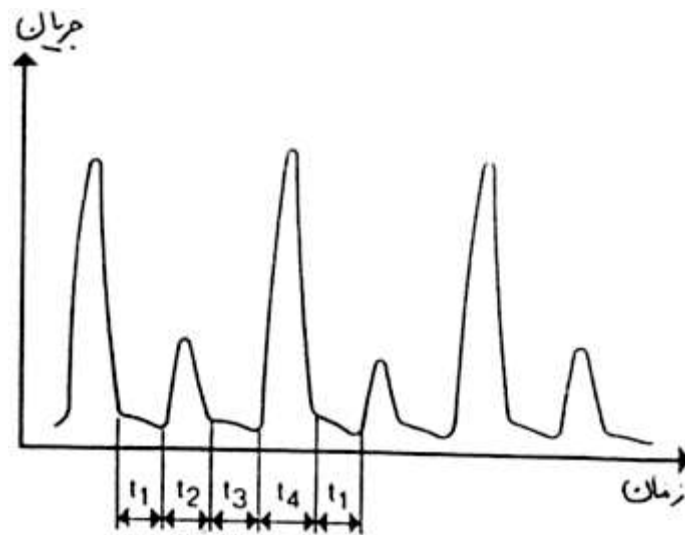
میشود. سرعت تغذیه الکتروود در روش MIG/MAG بالا بوده و بسته به آمپر مصرفی بین ۲۰-۲ متر در دقیقه می‌باشد. الکتروود مصرفی میتواند از نوع همگون بوده یا توپودری (Cored electrodes) باشد. گاز محافظ از طریق سیلندر و اتصالات مربوطه به مشعل جوشکاری هدایت شده و قوس الکتریکی و حوضچه جوش را پوشش میدهد. برای جریانهای بالاتراز ۲۵۰ آمپر معمولاً مشعل و کابلهای اتصال آنرا بوسیله آب خنک می‌کنند. در این مواقع یک سیستم خنک کن مشکل از پمپ و متعلقات مربوط به مدار دستگاه اضافه میشود. تنظیم دستگاه جوشکاری MIG/MAG به این صورت است که سرعت تغذیه الکتروود و ولتاژ دستگاه توسط جوشکار تعیین شده و دستگاه خود شدت جریانی متناسب با این دو پارامتر انتخاب مینماید، بنحویکه قوس الکتریکی پایداری بوجود آید، در این رابطه لازم است که تغذیه الکتروود دارای سرعتی ثابت بوده تا از تغییرات آمپر اعمالی که تغییرات در نرخ رسوب جوش را بهمراه دارد، جلوگیری شود.



سطح مقطع انواع الکتروودهای توپودری

با توجه به محاسن جوشکاری با قوس اسپری (که معمولاً در شدت جریانهای بالا بکار میرود)، دستگاههایی وجود دارند که امکان کاربرد قوس اسپری در آمپرهای نسبتاً پائین را نیز دارا می‌باشند. این نوع دستگاهها، جریان

مستقیم بشکل پالسی با فرکانس بین ۲۰۰-۳۰۰ هرتز ارائه میدهند. جریان پالسی به این شکل باعث میشود که قطرات مذاب قبل از اینکه بیش از حد بزرگ شده و منجر به اتصال کوتاه شوند، از الکتروود کنده شده و به حوضچه جوش ملحق شوند. شکل ۲:۱۹ اصول این نوع جریان را نشان میدهد. در فاصله t_3-t_2 شدت جریان نسبتاً پائین بوده و تنها در حد گرم و ذوب کردن الکتروود می باشد. در فاصله t_4 شدت جریان یکدفعه افزایش یافته که منجر به آزاد شدن قطره مذاب از نوک الکتروود و الحاق آن به حوضچه جوش میشود. لازم باشماره می باشد که دستگاههای مدرن جوشکاری MIG/MAG طوری طراحی شده اند که میتوانند با توجه به اطلاعات ورودی مربوط به جنس قطعه، نوع گاز و قطر الکتروود خود راساً پارامترهای جوشکاری از جمله فرکانس پالس ها را با توجه به سرعت تغذیه الکتروود تعیین و تنظیم کنند. هماهنگی بین پارامترهای مربوطه به این شکل را در دستگاههای مزبور "قوس پالسی هماهنگ" (Synergic pulsing arc) می نامند. روش مزبور منجر به ایجاد قوس اسپری در جریانهای نسبتاً پائین شده که پایدار بوده و برای ضخامت های نازک از جمله جوشکاری آلومینیوم و انواع فولاد زنگ نزن مناسب می باشد.



مواد مصرفی

الکتروود مصرفی در جوشکاری MIG/MAG دارای قطری بین $2/4 - 3/6$ میلیمتر بوده که معمولاً بصورت کلاف ارائه شده و بطور پیوسته بمحل جوش تغذیه میشود. بجهت پائین آوردن مقاومت الکتریکی الکتروود هنگام عبور از اتصالات مختلف (در سیستم تغذیه) و همچنین بالا بردن خواص خوردگی آن، معمولاً الکتروودهای مصرفی MIG/MAG دارای پوشش مسی می باشد. در جوشکاری MIG/MAG هم از الکتروود همگن و هم از الکتروودهای نوپودری (Cored electrodes) استفاده میشود. الکتروودهای نوپودری از مواد معدنی و آلیاژی پر شده اند و اصول کار آنها شبیه الکتروودهای پوشش دار می باشد. بسته به ترکیب پودر پر شده در این نوع الکتروودها میتوان آنها را به دو گروه زبر تقسیم نمود.

- ۱- الکتروودهای نوپودری که نیاز به گاز محافظ (مثلاً CO_2 با ترکیب آرگون و CO_2 دارند.
- ۲- الکتروودهای نوپودری که خود تولید گاز محافظ کرده و نیاز به گاز محافظ اضافی ندارند.

استفاده از الکترودهای نوپودری، بویژه در موارد اتوماسیون جوشکاری، روز افزون بوده و در مقایسه با سایر انواع الکتروود پوششی و مفتولی میتوانند سرعت رسوب جوش بیشتری را دارا باشند. شکل ۲:۲۰ سطح مقطع نمونه‌های مختلف این نوع الکتروود را نشان میدهد.

گاز محافظ مصرفی در جوشکاری MIG یک گاز خنثی (آرگون یا هلیوم) می‌باشد. مخلوط دیگر گازها با این دو گاز نیز بعضاً مورد استفاده قرار می‌گیرد. بعنوان مثال اضافه کردن ۵٪ اکسیژن به آرگون باعث تقویت خواص کشش سطحی و ویسکوزیته قطرات مذاب شده و نتیجتاً اندازه بحرانی آنها را در رابطه با کنده شدن از الکتروود کاهش میدهد که این امر به پایداری قوس کمک می‌کند.

مهمترین گاز محافظ مصرفی در جوشکاری MAG، کربن دی‌اکسید (CO_2) و با ترکیبی از آن با آرگون به نسبت ۸۰٪ آرگون و ۲۰٪ CO_2 می‌باشد.

کاربرد

روشهای جوشکاری MIG/MAG عمدتاً برای جوشکاری ضخامت‌های نازک ($t < 3 \text{ mm}$)، بعنوان مثال در صنعت خودرو سازی، بکار می‌روند. از مزایای این روش پائین بودن انرژی جوش بوده که منجر به محدود شدن تغییر شکلها و تنش‌های پسماند جوش شده، مونتاژ نهائی قطعات را آسانتر می‌کند. از آنجائیکه این روش محدودیت طول الکتروود، که در روش جوشکاری الکتروود دستی وجود دارد، را ندارد، سرعت جوشکاری بالاتری نسبت به روش الکتروود دستی دارا می‌باشد. برای جوشکاری ضخامت‌های نازک از تکنیک قوس کوتاه استفاده میشود. جوشکاری MIG/MAG برای جوشکاری ضخامت‌های متوسط ($t = 3-8 \text{ mm}$) در تولید ماشین آلات صنعتی نیز کاربرد گسترده ای داشته و در این رابطه از تکنیک قوس اسپری استفاده میشود. جوشکاری MAG عمدتاً برای جوشکاری فولادهای غیر آلیاژی استفاده شده و MIG برای جوشکاری انواع فولادهای زنگ نزن و فلزات غیر آهنی بکار می‌رود. جوشکاری MIG/MAG برای کارگاههای روباز، بواسطه امکان وزش باد و تأثیر در جریان گاز محافظ، مناسب نمی‌باشد. دستگاههای جوشکاری MIG/MAG نیمه خودکار بوده (در رابطه با تنظیم پارامترهای جوشکاری) و این روش‌ها قابلیت بسیار خوبی برای اتوماسیون دارند.