

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

فرآیند های جوشکاری ذوبی

محمد رضا صمدی

(عضو هیأت علمی دانشگاه فنی و حرفه ای)

حسین نوروزی فروشانی

(کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیر کبیر)

محمود افشاری

(کارشناسی ارشد مهندسی جوش دانشگاه صنعتی امیرکبیر)

سرشناسه: صمدی، محمدرضا،
 عنوان و نام پدیدآور: فرآیندهای جوشکاری ذوبی/محمدرضا صمدی، حسین
 نوروزی فروشانی، محمود افشاری،
 وضعیت فهرست نویسی: فیپا
 موضوع: جوشکاری، Welding
 شناسه افزوده: نوروزی فروشانی، حسین، ۱۳۶۱، افشاری، محمود، ۱۳۶۵
 رده بندی کنگره: ۲۲۷TS
 رده بندی دیویی: ۶۷۱/۵۲
 شماره کتابشناسی ملی: ۶۱۱۰۰۱۰



عنوان کتاب:فرآیندهای جوشکاری ذوبی
 نویسندگان: محمدرضا صمدی، حسین نوروزی فروشانی، محمود افشاری
 ویراستار فنی: محبوبه محمدنیا
 ویراستار ادبی: نسیم سبجانی
 طرح روی جلد: محمدرضا صمدی
 ناشر: انتشارات کتاب شهر علم
 شمارگان: ۱۰۰۰ جلد
 نوبت چاپ: اول
 سال چاپ: ۱۳۹۹
 قیمت: ۴۵۰۰۰۰ ریال
 شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۹۵۵۶۳-۴-۴

کلیه حقوق چاپ برای ناشر محفوظ است.

آدرس: تهران، خیابان انقلاب، خیابان دوازده فروردین، نبش کوچه بهشت آیین، پلاک ۷ طبقه ۲
 تلفن: ۰۹۰۳۲۹۵۸۸۳۱ - ۶۶۵۸۳۰۳۰

فهرست مطالب

پیشگفتار	۱
----------------	---

فصل اول: مقدمه ای بر فرآیند جوشکاری ذوبی

۱-۱ مقدمه	۳
۱-۲ تاریخچه	۵
۱-۳ فرآیندهای جوشکاری ذوبی	۷
۱-۴ چگالی انرژی منبع حرارتی	۹
۱-۵ انواع اتصالات جوش	۱۰

فصل دوم: فرآیندهای مبتنی بر قوس الکتریکی

۲-۱ قوس الکتریکی	۱۵
۲-۲ جوشکاری با قوس الکتریکی دستی	۳۲
۲-۳ جوشکاری تحت حفاظت گاز با الکتروود مصرف شدنی	۵۳
۲-۴ جوشکاری با الکتروود تنگستن	۷۸
۲-۵ جوشکاری پلاسما	۹۹
۲-۶ جوش قوسی با الکتروود توپودری	۱۱۳
۲-۷ جوشکاری زیر آب	۱۱۹
۲-۸ جوشکاری زیر پودری	۱۳۳

فصل سوم: فرآیندهای شیمیایی

۳-۱ فرآیندهای شیمیایی گرماده	۱۵۵
۳-۲ جوشکاری اکسی گاز	۱۵۶
۳-۳ جوشکاری با فشار و شعله ی گاز	۱۷۴
۳-۴ جوشکاری ترمیت	۱۷۶

فصل چهارم: فرآیندهای مبتنی بر مقاومت الکتریکی

۴-۱ جوشکاری مقاومتی	۱۸۳
۴-۲ جوشکاری مقاومتی نقطه ای	۲۲۰
۴-۳ جوشکاری زائده ای	۲۳۳
۴-۴ جوشکاری له کردنی	۲۳۶
۴-۵ جوش مقاومتی نقطه ای - غلتکی	۲۳۷

۲۴۴	۴-۶ جوش سر به سر
۲۵۹	۴-۷ جوشکاری گلمیخ
۲۶۳	۴-۸ جوشکاری فرکانس بالا
۲۶۹	۴-۹ لحیم کاری مقاومتی
۲۷۱	۴-۱۰ جوشکاری سرباره ی الکتریکی

فصل پنجم: فرآیندهای تشعشعی

۲۹۳	۵-۱ فرآیندهای تشعشعی
۳۰۱	۵-۲ جوشکاری پرتو الکترونی
۳۳۳	۵-۳ جوشکاری لیزر

فصل ششم: مباحث تکمیلی

۳۶۷	۶-۱ تکنیک جوشکاری شیار باریک
۳۷۳	۶-۲ تنش پسماند
۳۸۶	۶-۳ عیوب رایج جوشکاری

۴۰۸	واژگان
۴۱۶	مراجع

پیشگفتار

در دنیای صنعتی امروز، جوشکاری یکی از کارآمدترین راه اتصال دائمی فلزات است که صرفه اقتصادی، آزادی عمل، امکان اجرای متنوع، استفاده ی بهینه از مواد و گستره ی وسیع عملکرد را به همراه دارد. در صنعت به روز، جوشکاری از جایگاه خاصی برخوردار است، به گونه ای که صنعت مهندسی، به سازه ها و قطعات جوشکاری شده وابستگی کامل دارد. در زمینه ی جوشکاری و فرآیندهای آن، کتب زیادی تألیف شده است که هریک به نوبه ی خود سرشار از اطلاعات علمی و فنی کامل و جامع هستند، اما هدف اصلی از نگارش این کتاب، ذکر نکات فنی به همراه مباحث علمی تر و در کنار آن ریزه کاری هایی است که در کتب آکادمیک کمتر به آن پرداخته شده و فقط با کسب تجربه و انجام پروژه های مختلف حاصل می شوند.

مطالب این نوشتار که نتیجه ی چند سال تدریس در دانشگاه های مختلف، مراکز فنی و حرفه ای و نیز انجام پروژه های مختلف صنعتی و دانشگاهی در زمینه ی جوشکاری و همچنین شرکت در دوره های تخصصی مرتبط، توسط نگارندگان است، به نحوی تدوین گردیده که علاوه بر دانشجویان رشته ی مهندسی مکانیک، علاقمندان دیگری که قصد آشنایی کلی با این موضوع را دارند نیز بتوانند از آن استفاده کنند. بدین منظور سعی شده است با استفاده از منابع معتبر فارسی و لاتین و نیز جدیدترین مقالات علمی مرتبط، مطالب مورد نظر به شیوه ای ساده و قابل فهم در کنار استفاده از نمودارها و معادلات مورد نیاز، ارائه گردد.

تأکید این کتاب بیشتر بر روی فرآیندهای ذوبی است که در کشور کاربرد وسیعی پیدا کرده. در ضمن بخش اعظمی از این کتاب را سه فصل آخر آن به خود اختصاص داده که در مورد روش های مقاومتی و تشعشعی هستند. همچنین تکنیک جوشکاری شیارباریک، روش های اندازه گیری تنش پسماند و نیز عیوب رایج در جوش در فصل آخر شرح داده شده اند.

به منظور آشنایی خوانندگان با کلمات لاتین و اصطلاحات فنی و تخصصی جوشکاری، عبارات مورد استفاده در متن و تصاویر، ترجمه نشده و در پایان کتاب در بخش جداگانه ای با عنوان واژه نامه، ترجمه ی فارسی آنها آورده شده است و همچنین از پاورقی های مناسب نیز استفاده گردیده. در ضمن فهرست مطالب به گونه ای تنظیم شده که خواننده با مراجعه ی به آن، نمای کلی و خلاصه ای از مهمترین مباحث کتاب را تجسم خواهد کرد.

فصل اول

مقدمه ای بر فرآیند جوشکاری ذوبی

۱-۱ مقدمه

در صنعت، هرسازه‌ی فلزی از قطعات مختلف ریخته‌گری‌شده، نوردکاری‌شده و ماشین‌کاری شده ساخته می‌شود و این قطعات به روش‌های مختلفی بهم متصل می‌گردند که عبارتند از پیچ، پرچ، خار، پین، لحیم، جوش. روش‌های فوق را می‌توان به صورت ذیل دسته‌بندی نمود:

الف- اتصال موقت: اتصالی که در صورت جدا نمودن عامل اتصال (پیچ، پین، خار) به فلز پایه و عامل اتصال آسیبی وارد نمی‌گردد.

ب- اتصال نیمه موقت: اتصالی که در صورت جدا نمودن عامل اتصال (پرچ، لحیم) فلز پایه صدمه‌ای نمی‌بیند ولی عامل اتصال از بین می‌رود.

ج- اتصال دائم: اتصالی در صورت جدا نمودن عامل اتصال، هم فلز پایه و هم عامل اتصال آسیب می‌بیند. مانند جوشکاری.

مزیت اتصال موقت نسبت به دائم آن است که کمترین عیب احتمالی را دارد، در صورتیکه در اتصال دائم نظیر جوشکاری عیوب مختلفی ایجاد می‌گردد. از طرفی اتصالات دائم دارای مزایای ذیل هستند:

۱. استحکام آن بالاتر است.
۲. امکان آب‌بندی وجود دارد.
۳. سریعتر انجام می‌شود.
۴. آماده‌سازی کمتری نیاز دارد.
۵. به مرور زمان عامل اتصال شل نمی‌شود.

فرآیندهای جوشکاری ذوبی

جوشکاری^۱ را می‌توان اتصال دائم متالورژیکی دانست که می‌تواند در حالت مذاب یا جامد، با استفاده از واسطه (مواد پُرکننده) یا بدون واسطه و با ایجاد فشار یا بدون استفاده از فشار صورت گیرد. در واقع جوشکاری به اتصالی گفته می‌شود که نتوان محل اتصال را از قسمت‌های دیگر قطعات مجزا نمود و به عبارتی دیگر خواص جوش ایجاد شده با قطعات مورد اتصال یکسان یا نزدیک به هم باشد. جوشکاری یکی از روش‌های تولید است که هدف آن اتصال دائمی مواد از جمله فلز، پلیمر، کامپوزیت و سرامیک به یکدیگر است، به گونه‌ای که خواص اتصال، برابر خواص ماده پایه باشد. با این حال روش‌های جوشکاری به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند: ذوبی و غیر ذوبی (حالت جامد).

روش‌های جوشکاری ذوبی که در آن فلزات پایه در محل اتصال ذوب شده و پس از انجماد، اتصال ایجاد می‌شود. در این دسته روش‌هایی مانند جوشکاری قوسی با گاز محافظ و الکتروکوتنگستنی، روش لیزر، روش پرتو الکترونی و غیره قرار دارند.

روش‌های جوشکاری غیر ذوبی یا جوشکاری حالت جامد که تنها دمای قطعات در حد نرم شدن مواد بالا رفته و با اعمال فشار و نفوذ اتم‌ها در دمای بالا، اتصال ایجاد می‌شود. در این دسته روش‌هایی مانند اتصال نفوذی، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، جوشکاری انفجاری و غیره قرار می‌گیرند. در جوشکاری حالت جامد به دلیل قرارگیری محل اتصال در دمایی زیر نقطه ذوب و زمان بسیار کوتاه انجام فرآیند، تشکیل فازهای مضر، حل شدن رسوب‌ها و تفکیک عناصر رخ نمی‌دهد. عمل جوشکاری می‌تواند با حرارت یا بدون حرارت، با فشار یا بدون فشار، با ماده پرکننده یا بدون آن بوده و بر این اساس نیز می‌توان آنها را دسته‌بندی نمود.

اگر بخواهیم به طور کلی با یک بیان ساده و عمومی فرآیند جوشکاری را تعریف کنیم می‌توان به سه تعریف ذیل اشاره کرد:

۱- اتصالات مختلف دو فلز که حرارت متمرکز، ابتدا محل اتصال را بصورت مذاب و سپس در هم ادغام نماید جوشکاری نامیده می‌شود.

۲- جوشکاری یک نوع عمل پیوند زدن متالورژیکی است که توأم با حرارت و فشار می‌باشد.

^۱Welding

فصل اول: مقدمه ای بر فرآیند جوشکاری ذوبی

۳- هرگاه بوسیله ای بتوانیم فاصله ی اتمی محل اتصالات را به اندازه ی فاصله ی اتمی فلز مبنا برسانیم جوشکاری انجام داده ایم.

۲-۱ تاریخچه

بشر اولیه زمانی که فلز را شناخت و به نحوه ی ذوب و ریخته‌گری آن پی برد، در زمینه اتصال فلزات نیز تلاش‌های زیادی کرد و توانست لحیم‌کاری و بعضی از روش‌های ساده جوشکاری را ابداع نماید. در کاوش‌های باستان‌شناسی، دست‌بندهای طلائی پیدا شده است که مربوط به دوران قبل تاریخ بوده و سر این دست‌بندها بوسیله ضربات چکش جوشکاری شده است. در جواهرات قدیمی ذرات ریز طلا را بوسیله صمغ درخت و نمک مس بهم چسبانده سپس آن را آتش می‌زدند، در اثر حرارت حاصل از سوختن صمغ درخت، فلز مس احیاء شده و با طلا ترکیب می‌شد و بدین ترتیب جوشکاری قطعات ریز طلا انجام می‌گرفت.

رومیان قدیم از آلیاژهایی برای لحیم‌کاری استفاده می‌کردند که هنوز هم در صنعت امروزی کاربرد دارند. جوشکاری بصورت امروزی در قرن نوزدهم اهمیت بیشتری پیدا نمود و پیشرفت کرد. زمان پیدایش قوس الکتریکی به سال ۱۸۰۲ بر می‌گردد، زمانی که دانشمندی روسی به نام واسیلی ولادیمیر پتروف پی برد که اگر دو تکه ذغال چوب را به قطب‌های باتری بزرگی وصل کند و آنها را بهم تماس داده سپس کمی از هم جدا کند، شعله روشنی بین دو تکه ذغال دیده می‌شود و انتهای آنها که از شدت گرما سفید شده است، نور خیره کننده‌ای گسیل می‌دارد. با این وجود استفاده از قوس الکتریکی در جوشکاری فلزات با یکدیگر ۷۹ سال بعد از این کشف یعنی در سال ۱۸۸۱ توسط فردی به نام موسیان اتفاق افتاد. ۵ سال بعد یک دانشمند روسی به نام برناندوز اختراعی را به ثبت رساند که به وسیله آن قادر بود تا یک قطعه فلزی را با الکتروود ذغالی به صورت موضعی با ایجاد قوس الکتریکی بین قطعه و الکتروود ذوب نماید. برناندوز در این روش دو قطعه فلزی را در فاصله مشخصی از یکدیگر قرار داده و با استفاده از پدیده قوس و حرکت الکتروود ذغالی در طول شکاف بین دو قطعه و وارد نمودن همزمان میله‌ای فلزی از جنس قطعه در داخل قوس، حمام مذابی به وجود آورد که بعد از منجمد شدن، شکاف موجود را پر نموده و باعث به هم پیوستن این قطعات گردید. چند سال بعد یعنی در سال ۱۸۹۱ دانشمند دیگر روسی به نام اسلاویانوف روش الکتروود ذوب شونده را اختراع نمود. او در این روش الکتروود

فرآیندهای جوشکاری ذوبی

فلزی را جایگزین الکتروذغالی کرد که همزمان علاوه بر ایجاد قوس، وظیفه پر کننده را نیز به عهده داشت. در این روش مذاب حاصل از الکتروذغالی در فاصله بین نوک الکتروذغالی و شکاف دو قطعه در معرض هوا قرار می‌گرفت که این امر باعث اکسید شدن مذاب و در نتیجه ایجاد اشکال در جوش می‌گردید. از سوی دیگر قوس الکتریکی به دلیل تماس با اتمسفر هوا ناپایدار بود که خودبخود غیر یکنواختی جوش را به دنبال داشت.

برای برطرف کردن این عیوب (کیفیت پایین جوش و ناپایداری قوس) در سال ۱۹۰۵ یک صنعتگر سوئدی به نام اسکار کلبگر، الکتروذغالی پوشش‌دار را اختراع نمود. پوشش این الکتروذغالی از مواد معدنی مختلف از جمله آهک بود که قادر به تولید گاز و ایجاد سرباره جهت محافظت مذاب حاصله از ذوب الکتروذغالی در مقابل آثار نامطلوب تماس با هوا بود. البته علاوه بر این، پوشش الکتروذغالی باعث پایداری قوس و یکنواختی جوش می‌گردید.

قبل از آن در سال ۱۸۵۶ دانشمندی به نام ژول به فکر جوشکاری مقاومتی افتاد، و بعد از او الیهو تامسون آمریکایی در بین سال‌های ۱۸۷۶ تا ۱۸۷۷ به طرح‌های او جامه‌ی عمل پوشاند و از جوشکاری مقاومتی استفاده کرد.

در جریان جنگ‌های جهانی اول و دوم، جوشکاری پیشرفت زیادی کرد. احتیاجات بشر به اتصالات مدرن، سبک، محکم و مقاوم در سال‌های اخیر و مخصوصاً بیست سال اخیر، سبب توسعه سریع این فن شده است. در سال ۱۹۳۰ به طور همزمان در آمریکا و اتحاد جماهیر شوروی سابق تحقیقات برای مخفی ساختن قوس الکتریکی و دسترسی به قوس پایدار صورت گرفت که نتیجه آن اختراع جوشکاری زیر پودری بود، اما نه به شکل امروزی بلکه با استفاده از الکتروذغالی کربن. در حدود سال ۱۹۳۵ این روش تقریباً به شکل امروزی درآمد و به روشی اقتصادی برای جوشکاری مبدل شد.

در جنگ جهانی اول پس از جوش خوردن ترکش‌های ناشی از متلاشی شدن گلوله توپ به بدنه جنگ افزارها فرآیند جوشکاری انفجاری کشف شد. و در سال ۱۹۶۰ دوپونت این فرآیند را به صورت بین‌المللی ثبت کرد.

جوشکاری پرتو الکترونی از سال ۱۹۵۰ بطور همزمان در آمریکا و آلمان غربی توسعه یافت و در سال ۱۹۶۵ سیستم‌های متنوع لیزری به منظور جوش مدارهای الکتریکی و همچنین در سایر

فصل اول: مقدمه ای بر فرآیند جوشکاری ذوبی

کاربردهای تخصصی که در آنها تکنولوژی مرسوم قادر به ایجاد اتصالات مطمئن نبودند، توسعه پیدا کرد. در حال حاضر یکی از جدید ترین روشهای جوشکاری، فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) است، که در سال ۱۹۹۱ توسط انیستیتو جهانی جوش و اتصالات^۲ (TWI) در کمبریج به دنیای صنعت معرفی شده است.

۳-۱ فرآیندهای جوشکاری ذوبی

در فرآیندهای جوشکاری ذوبی^۳ (FW)، دو سطح فلزی که می بایست به یکدیگر متصل گردند با استفاده از حرارت، ذوب شده و قشر مواد خارجی سطحی جدا شده و در قسمت مذاب قرار می گیرد و یا در فلز مذاب حل می شود. برای انجام این عمل از منابع حرارتی مختلفی استفاده می شود، که از جمله ای آنها می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- **انرژی الکتریکی:** به دو صورت می توان از انرژی الکتریکی برای ایجاد حرارت استفاده کرد. یا توسط مقاومت الکتریکی مانند جوشکاری مقاومتی، جوشکاری گلمیخ، جوشکاری الکترواسلاگ، و یا توسط قوس الکتریکی ایجاد شده مانند جوشکاری الکترو دستی، جوشکاری پلاسما، جوشکاری زیرپودری، جوشکاری تحت حفاظت گاز، جوشکاری با الکتروود تنگستن و غیره. در مواردی نیز می توان از القای جریان الکتریکی توسط یک میدان مغناطیسی دوار حاصل از یک سیم پیچ برای ذوب فلزات استفاده کرد که روش جوشکاری القایی بر همین اساس استوار است.
- **شیمیایی:** از انرژی شیمیایی به دو صورت برای تأمین حرارت جوشکاری استفاده می شود که مرسوم ترین آن استفاده از واکنش های ترکیب اکسیژن یا سوختن است که در این روش یک ماده سوختنی که میل ترکیبی زیادی با اکسیژن دارد در مجاورت اکسیژن قرار داده شده و با ایجاد واکنش احتراق، گرمای مورد نیاز جوشکاری تأمین می گردد. مانند جوشکاری اکسی استیلن. روش دیگر، استفاده از یک واکنش گرمازا (جدای از سوختن) می باشد. در

^۲The Welding Institute (TWI)

^۳Fusion Welding (FW)

فرآیندهای جوشکاری ذوبی

این واکنش‌ها، با ترکیب دو ماده، اختلاف انرژی پیوندی اولیه و ثانویه به صورت گرما بروز کرده و از این گرما می‌توان برای عمل جوشکاری بهره گرفت. مانند جوشکاری ترمیت.

- **طیف الکترو مغناطیس:** در این روش‌ها از برهم‌کنش الکترون‌ها با فوتون‌های انرژی در لایه‌های اطراف هسته اتم و طیف ساطع شده در اثر این واکنش‌ها، انرژی مورد نیاز جهت ذوب قطعه تأمین می‌شود. مانند جوشکاری لیزر، جوشکاری الکترون بیم.

مهمترین معایب جوشکاری حرارتی این است که منطقه اتصال یا ناحیه جوش دارای ساختمان شکننده بوده و معمولاً شامل ترک‌ها و حفره‌های ریز است. همچنین این ناحیه دارای خواص مکانیکی نامطلوب‌تری نسبت به فلز پایه از جمله شکل پذیری و مقاومت در مقابل بار ضربه‌ای است. بخشی از حرارت منطقه مذاب از طریق اجزاء اتصال (قسمتهای مجاور منطقه مذاب) منتقل می‌شود و این خود موجب بروز افزایش درجه حرارت و در نتیجه تغییرات متالورژیکی زیان بخش در نواحی منطقه‌ی جوش (مناطق متأثر از حرارت^۴ یا HAZ) می‌گردد.

جدول ۱-۱: انواع فرآیندهای جوشکاری ذوبی و برخی خواص آنها.

فرآیند	نحوه‌ی حفاظت از جوش	بارگذاری مکانیکی	منبع ایجاد حرارت	منبع انرژی
جوشکاری قوس کربن	بدون نیاز به حفاظت	بدون نیاز به فشار	قوس الکتریکی	جریان الکتریکی
جوشکاری الکتروود دستی میگ/مگ و تیگ جوشکاری پلاسما جوشکاری الکتروگاز	تحت حفاظت گاز			
جوشکاری زیرپودری جوشکاری الکتروگاز جوشکاری توپودری	تحت حفاظت پودر			
جوشکاری سرباره الکتریکی	تحت حفاظت پودر	بدون نیاز به فشار	مقاومت الکتریکی	
انواع نقطه جوش انواع درز جوش	بدون نیاز	به همراه فشار		
جوشکاری لیزر	بدون نیاز به حفاظت	بدون نیاز به فشار	تشنع	
جوشکاری پرتو الکترونی	نیاز به محفظه‌ی خلاء			
جوشکاری القایی	بدون نیاز به حفاظت	بدون نیاز به فشار	القای مغناطیسی	
جوشکاری اکسی استیلن جوشکاری فشار و گاز	تحت حفاظت شعله	بدون نیاز به فشار	تماس شعله	واکنش شیمیایی
جوشکاری ترمیت	تحت حفاظت پودر	بدون نیاز به فشار	واکنش حالت جامد	

^۴Heat Affected Zone (HAZ)

فصل اول: مقدمه ای بر فرآیند جوشکاری ذوبی

در یک جوش ایده آل، ناحیه اتصال جوشکاری شده دارای پیوستگی کامل است و نمی توان ناحیه جوش را از سایر قسمت های قطعه تشخیص داد. هر چند دستیابی به چنین شرایط ایده آل در عمل سخت می باشد، اما همواره سعی بر آن بوده تا با فراهم کردن نیازهای اساسی یک جوش و انتخاب روش مناسب جوشکاری با توجه به مهارت جوشکار به یک اتصال با خواص رضایت بخش و قابل قبول دست یابند. جدول ۱-۱ انواع روش های مختلف جوشکاری ذوبی را به همراه برخی از ویژگی های اساسی آنها نمایش می دهد.

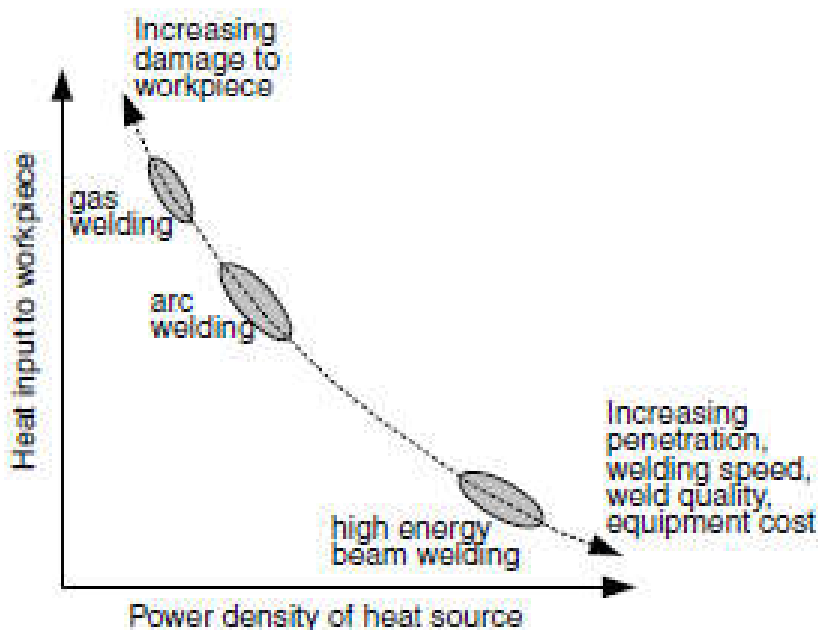
در اغلب موارد، در روش های ذوبی، ساختارهای انجمادی، مانند فازهای یوتکتیک به وجود می آیند که خواص اتصال را تحت تأثیر قرار می دهند. در این ریزساختارها وجود حفره های گازی و انقباضی اجتناب ناپذیر است. لازم به ذکر است که در جوشکاری ذوبی رسوبها درون زمینه حل شده و خواص مکانیکی جوش را کاهش می دهد. عیب دیگر روش های ذوبی ایجاد تنش پسماند^۵ در منطقه ی جوش و اطراف آن بوده که محل اتصال را تحت یک تنش دائمی قرار می دهد و برای رفع آن نیاز به عملیات حرارتی پسگرم و تنش زدایی است که خود نیازمند صرف زمان و هزینه است.

۴-۱ چگالی انرژی منبع حرارتی

در جوشکاری ذوبی مفهومی به نام چگالی انرژی وجود دارد که به معنای مقدار حرارت ورودی به حوضچه ی جوش^۶ تقسیم بر اندازه ی حوضچه ی جوش است که به ترتیب برای جوشکاری گازی، قوسی و تشعشعی افزایش می یابد. البته لازم به ذکر است که چگالی انرژی، مفهومی متفاوت با حرارت ورودی است به نحوی که افزایش چگالی انرژی عامل مهمی در جوشکاری بوده و افزایش آن مزایای زیادی از جمله ایجاد عمق جوش بیشتر، سرعت جوشکاری بالاتر، کیفیت جوش بهتر و خسارت کمتر به قطعه کار را به دنبال دارد و این در حالیست که افزایش بیش از اندازه ی حرارت ورودی می تواند موجب آسیب رسیدن به قطعه کار و نیز اتلاف انرژی گردد.

^۵Residual Stress

^۶Weld Pool



شکل ۱-۱: مقدار حرارت ورودی به قطعه کار نسبت به چگالی انرژی ورودی برای فرآیندهای مختلف ذوبی.

۵-۱ انواع اتصالات جوش

قطعه کارها به علت تنوع در وضعیتی که جوشکاری می شوند، به حالت های مختلفی کنار یکدیگر قرار می گیرند. مهمترین این حالات قرارگیری یا اصطلاحاً انواع اتصالات جوشکاری بصورت ذیل است:

۱- اتصال لب به لب^۲: در این حالت لبه های قطعه کار به حالت صاف یا پخ^۳ زده به طور مستقیم در مقابل هم قرار می گیرند. نوع پخ یا انحنای آن بستگی به روش جوشکاری و شرایط کار و ضخامت قطعه دارد.

۲- اتصال نبشی^۴: در این حالت لبه ی دو قطعه با زاویه (معمولاً ۹۰ درجه) در کنار هم قرار می گیرند. در اینجا قطعات می توانند به صورت ساده یا پخ زده باشند.

^۲But Joint

^۳Groove

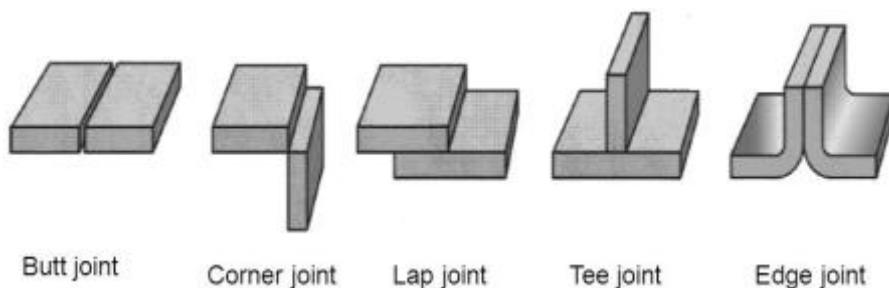
^۴Corner Joint

فصل اول: مقدمه ای بر فرآیند جوشکاری ذوبی

۳- اتصال لب روی هم یا لب بر لب: در این حالت ورق‌ها بر روی هم قرار گرفته و جوشکاری بر روی لبه‌ها صورت می‌گیرد. در این وضعیت نسبت هم پوشانی لبه‌ی جوش^۱ پارامتر مهمی است که هر چه این نسبت بیشتر باشد، تمرکز تنش کمتر خواهد بود و از نظر مقاومت مصالحی شرایط بهتری خواهد داشت. در بعضی مواقع انحنای سطح جوش را به علت اینکه انحنای سطح آن موجب تمرکز تنش می‌گردد، با سنگ زدن حذف می‌کنند.

۴- اتصال T شکل^۲: در این نوع اتصال یکی از ورق‌ها به طور عمود یا با زاویه بر روی ورق دیگر قرار گرفته و عموماً دو پاشنه آن جوش می‌خورد. در اینجا نیز با توجه به شکل و ضخامت ورق و روش جوشکاری ممکن است قطعه‌ها بدون پخ بوده و یا از هر دو طرف پخ خورده باشند و یا تنها از یک سمت پخ بخورند.

۵- اتصال لبه‌ای^۳ (پیشانی): مشابه اتصال روی هم است با این تفاوت که دو عضو در صفحات موازی هستند ولی سطوح صفحه‌ای آنها به گونه‌ای در تماس خواهد بود که جوشکاری واقعی در سطح خارج اتصال انجام شود.



شکل ۱-۲: حالت‌های مختلف اتصالات جوشکاری. از چپ به راست: اتصال لب به لب، اتصال نبشی، اتصال لب روی لب، اتصال T و اتصال لبه.

در شرایطی که ضخامت قطعه در حد نفوذ جوشکاری باشد، نیازی به پخ زدن نبوده و جوشکاری بر روی لبه‌های اولیه‌ی قطعه، بدون پخ زدن و آماده سازی اولیه صورت می‌گیرد. اگر ضخامت قطعه زیاد باشد در حدی که جوش به اندازه‌ی کافی در محل اتصال دو لبه نتواند نفوذ کند، پخ مناسب در لبه‌های آن ایجاد می‌گردد مانند شکل ۱-۳. در ضخامت‌های بالاتر از پخ‌های

^۱Lap Joint

^۲Overlap Ratio

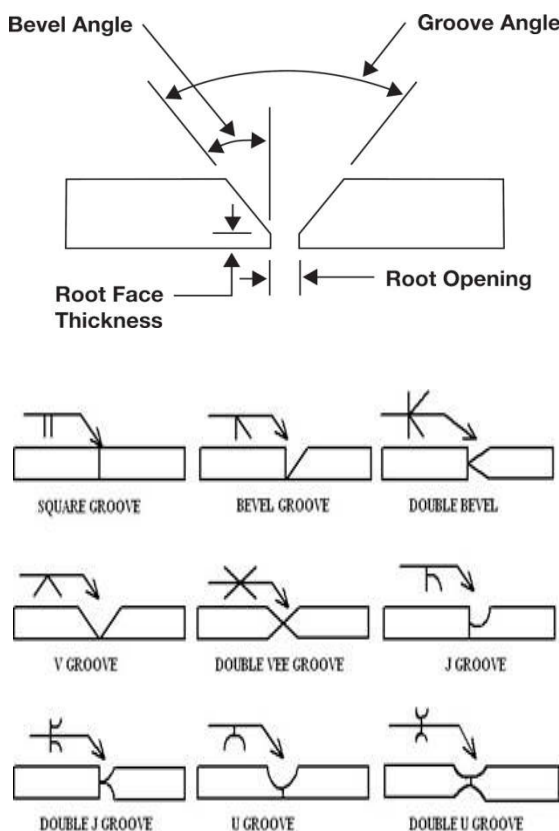
^۳Tee Joint

^۴Edge Joint

فرآیندهای جوشکاری ذوبی

دو طرفه نیز استفاده می‌شود و از چند پاس جوشکاری با توجه به ضخامت قطعه کار استفاده می‌گردد.

جوشکاری را می‌توان در وضعیت‌های مختلفی انجام داد. وضعیت‌هایی که بصورت استاندارد مشخص شده هستند عبارتند از جوشکاری در حالت تخت^۴ (وضعیت ۱)، جوشکاری در حالت افقی^{۱۵} (وضعیت ۲)، جوشکاری در حالت عمودی^{۱۶} (وضعیت ۳) و جوشکاری در حالت بالاسری^{۱۷} (وضعیت ۴). شکل ۱-۴



شکل ۱-۳: انواع یخ‌های قابل ایجاد بر روی لبه‌های قطعه کار.

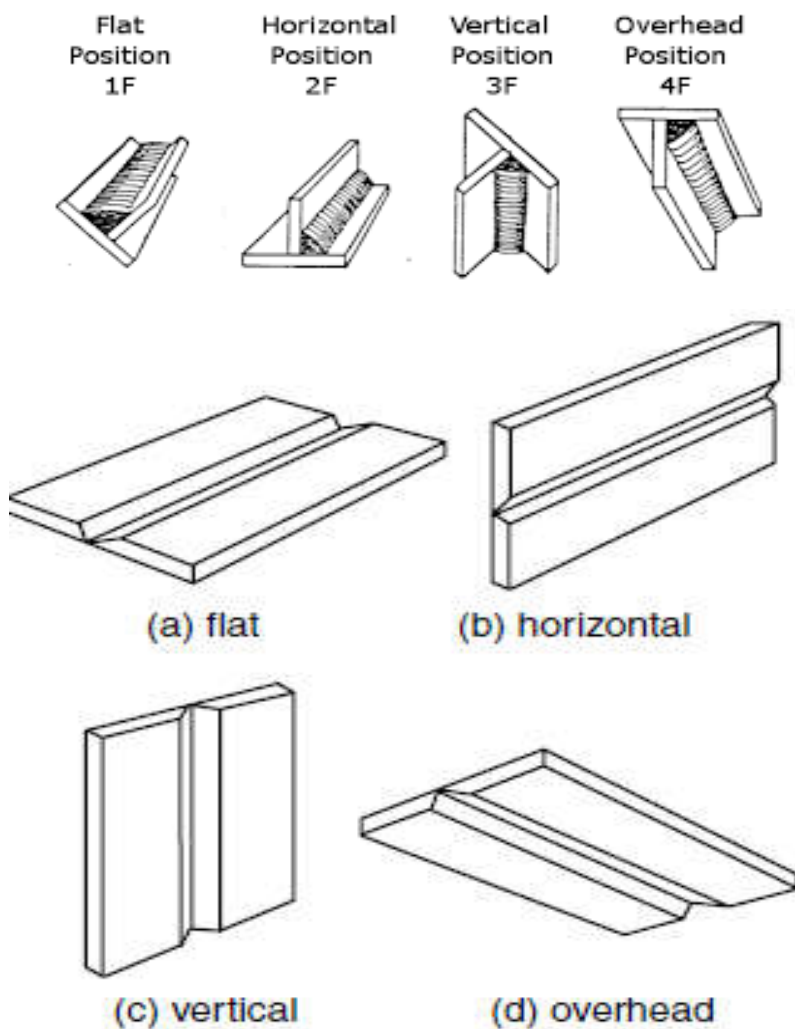
^۴Flat

^{۱۵}Horizontal

^{۱۶}Vertical

^{۱۷}Overhead

Fillet Welds



شکل ۱-۴: وضعیت‌های مختلف جوشکاری.

فرآیندهای جوشکاری ذوبی

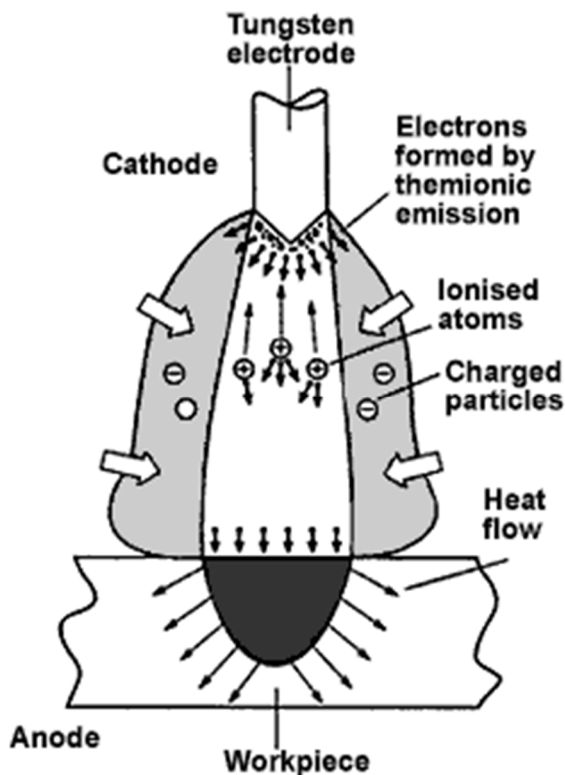
فصل دوم

فرآیندهای مبتنی بر قوس الکتریکی

۱-۲ قوس الکتریکی

قوس^۱ عبارت است از تخلیه الکتریکی در فاصله هوایی بین دو الکترود (آند و کاتد) در یک محیط یونیزه. وقتی که یونها از فاصله هوایی عبور کنند با مولکولهای گاز جو (هوا) برخورد کرده و یک سطح یونیزاسیون حرارتی تولید می‌کنند. بنابراین یک قسمت از حرارت قوس الکتریکی مربوط به حرارت حاصل از برخورد یونها و مولکولهای هوا با یکدیگر است. این سطح از گاز یونیزه شده مانند یک هادی با مقاومت زیاد عمل کرده و موجب می‌شود که یونهای بیشتری از آند به کاتد جریان یابد. قسمت دیگر از حرارت قوس الکتریکی مربوط به حرارت حاصل از برخورد یونها به کاتد است.

^۱Arc



شکل ۱-۲: قوس الکتریکی ایجاد شده بین قطعه کار و الکترود تنگستن.

از نقطه نظر تئوری بار الکتریکی باعث اختلال در حرکت الکترون‌ها به دور مدارشان می‌شود. بطوریکه الکترون‌ها در جهتی مماس بر مسیر مداری خود خارج شده و به دنبال هسته مثبتی می‌گردند که بطور اتوماتیک خود را بدان وابسته نمایند. از خصوصیات بارز فلزات این است که خیلی سریع الکترون‌ها را از خود آزاد می‌سازند، بخصوص هنگامیکه حرارت فلز افزایش می‌یابد. این خصوصیات بارز فلزات تحت عنوان نشر ترمیونیک^۹ نامیده می‌شود.

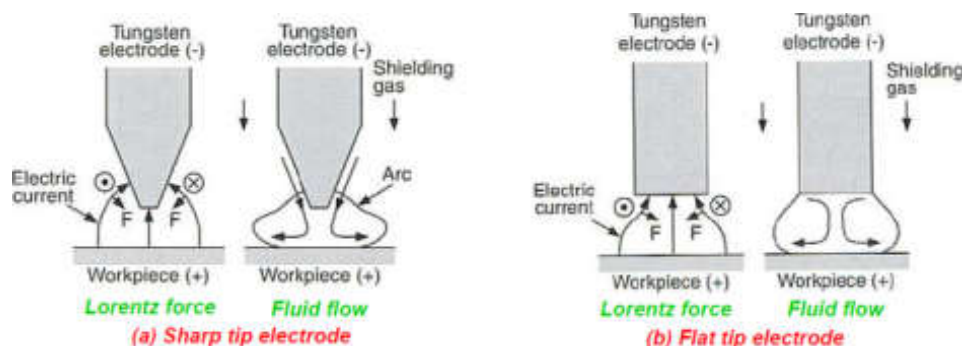
در اثر تحریک اتمسفر بین دو الکترود، افت ولتاژ در کاتد و آند بوجود می‌آید. اگر مقدار افت ولتاژ در کاتد بطور نسبی ۱۰ ولت باشد، شدت جریانی که می‌تواند از این محیط بگذرد محدودیتی نداشته و بستگی به نوع و جنس الکترود دارد. اگر مقدار آمپر کمتر از ۱ باشد افت ولتاژ زیاد خواهد بود که در حدود ۳۰۰ ولت است. نیروی محرکه برای جریان سیال در قوس،

^۹Thermionic Emission

نیروی الکترومغناطیسی است که آن را نیروی لورنتز^۱ گویند. نیروی لورنتز توسط میدان الکترومغناطیسی به ذره باردار متحرک داخل میدان وارد می‌شود که رابطه آن به صورت زیر است:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

به طوریکه F نشان دهنده بردار نیرو، q مقدار بار الکتریکی ذره متحرک در میدان، E مقدار میدان الکتریکی، V بردار سرعت ذره متحرک در میدان و B بردار میدان مغناطیسی می‌باشد.

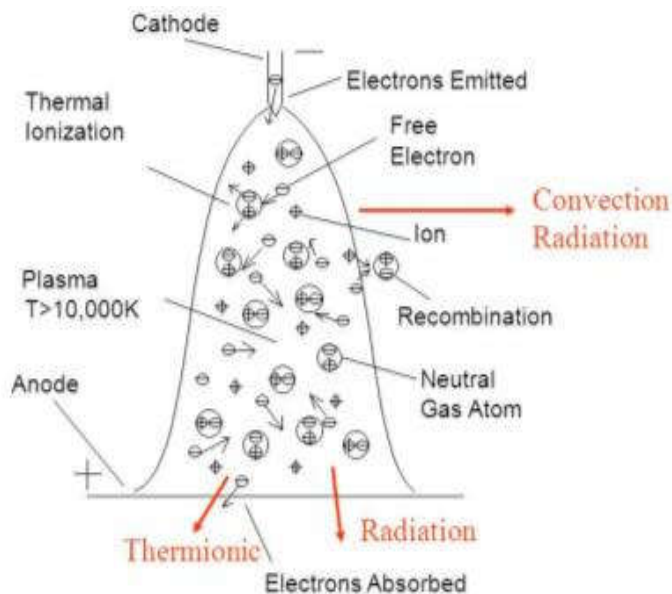


شکل ۲-۲: نیروی لورنتز و نیروی سیال در دو الکترود با نوک تخت و تیز.

در ولتاژهای پایین در ابتدای برقراری قوس، چون مقاومت بین دو الکترود کم است، الکترون به راحتی خارج شده که به این حالت اتصال کوتاه گفته می‌شود. حال اگر ولتاژ بالا باشد، مثل سرشمع اتومبیل، در این حالت مدار باز است، یعنی مقاومت آن بالا است که در نتیجه آن الکترون پرتاب می‌شود. الکترون پرتاب شده، با فشار از اتمسفر بین دو الکترود که دارای مقاومت بالایی است، رد شده و در نتیجه باعث یونیزه شدن اتمسفر می‌گردد. پس از عبور الکترون، دیونیزه شدن مجدد اتمسفر، انرژی بسیار زیادی را از خود آزاد می‌کند که این انرژی، بخش عمده حرارت مورد نیاز برای ذوب قطعات و الکترود را تأمین می‌کند.

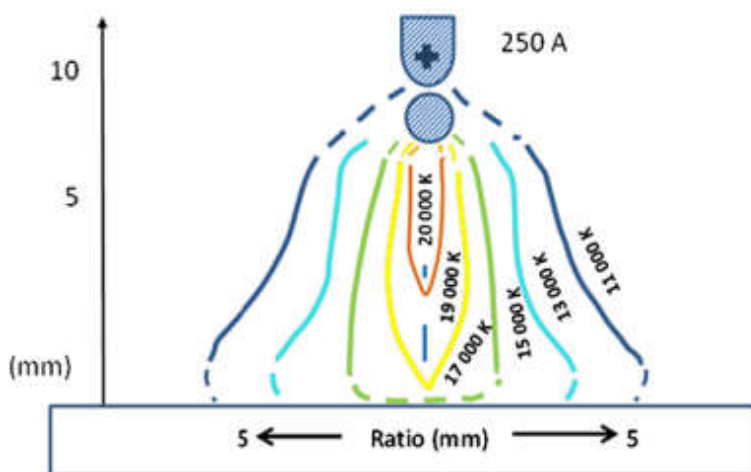
^۱Lorentz Force

فرآیندهای جوشکاری ذوبی



شکل ۲-۳: نحوه یونیزه شدن گاز در ناحیه بین دو الکترود. جریان حرارت در ناحیه قوس.

سه ناحیه حرارت آزاد شده در جریان قوس الکتریکی وجود خواهد داشت. ناحیه کاتد (منفی)، ناحیه پلاسما و ناحیه آند (مثبت). از این سه ناحیه، آند بالاترین حرارت را که در حدود ۱۰۰۰۰ تا ۱۱۰۰۰ درجه فارنهایت است آزاد می‌کند.



شکل ۲-۴: توزیع حرارت در ناحیه قوس. جوشکاری آلومینیوم با گاز محافظ.

حرارت ناحیه پلاسما اساساً در نتیجه تصادفات اتمی تعدادی الکترون‌ها و یون‌هایی که از میان ناحیه گاز یونیزه شده عبور می‌کنند بدست می‌آید. در انتخاب ناحیه حرارت باید به خاطر داشت که تقریباً دوسوم حرارت آزاد شده همیشه در آند یا قطب مثبت می‌باشد. این مسئله در تمام دستگاههای جوشکاری با جریان DC صادق است.

حرارت ورودی به قوس از رابطه زیر بدست می‌آید که در آن V ولتاژ بر حسب ولت، I شدت جریان بر حسب آمپر و S سرعت جوشکاری بر حسب سانتی متر بر دقیقه می‌باشد.

$$H.I = \frac{V * I * 60}{S}$$

حرارت ورودی

طبق قانون اهم اگر ولتاژ زیاد شود آمپر کم می‌شود و بر عکس. اما در جوشکاری، در ناحیه قوس آمپر و ولتاژ بر خلاف قانون اهم بوده، ولی اگر از دستگاه بار کشیده نشود مطابق قانون اهم است. به جز در شرایط خاص، شدت جریان در یک قوس باید از داخل یک گاز و نیز یک مدار الکتریکی که الکترودها می‌باشند بگذرد.

۲-۱-۱ ساختار قوس الکتریکی

فاصله بین دو الکترود به سه ناحیه تقسیم می‌شود:

۱- کاتد

۲- آند

۳- ستون قوس^۱

ناحیه وسط که گرادیان ولتاژ در آن یکنواخت است و دو ناحیه دیگر که مجاور به الکترودها هستند و در آنها افت ولتاژ صورت می‌پذیرد، کاتد و آند نام دارند. در ناحیه وسط، قوس با شدت جریان زیاد و فشار اتمسفر درجه حرارت ۵۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ درجه‌ی کلوین قرار دارد. در محور ستون قوس بیشترین درجه حرارت وجود دارد و هر چه بطرف لایه‌های بیرونی آن برویم درجه حرارت بسرعت کاهش می‌یابد. میزان درجه حرارت در محور و قطر آن متناسب با اندازه شدت جریان است و بعلاوه اینکه اکثر الکترون‌ها در امتداد محور گذشته و درجه حرارت و

^۱Arc Column

قطر ستون تابع آن است، لذا قانون اهم درباره آن صادق نیست. تخلیه الکتریکی در ستون قوس به دو صورت شکل می‌گیرد:

Arc: تخلیه الکتریکی در حالتی است که ولتاژ بالا و جریان زیر یک آمپر باشد.

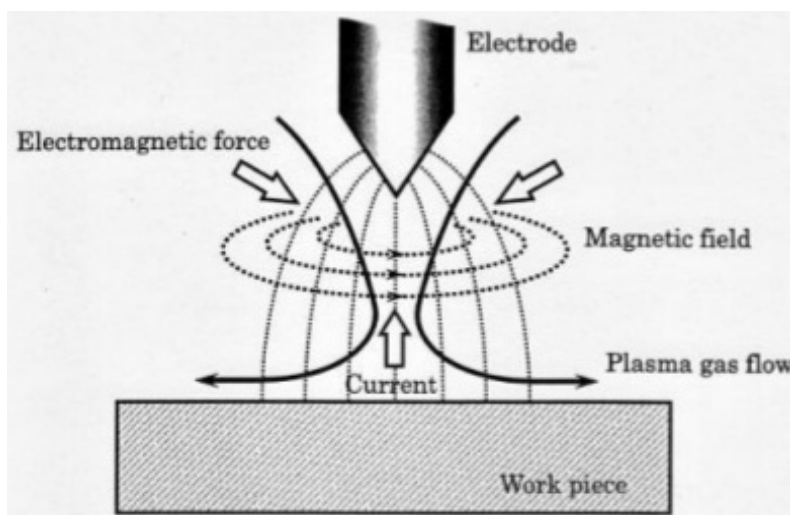
Glow: تخلیه الکتریکی در حالتی است که ولتاژ پایین و جریان بالا باشد.

در شدت جریان زیاد قوس توأم با یک میدان مغناطیسی خواهد بود و فشار میدان مغناطیسی در متمرکز کردن ستون قوس اثر نموده و تشکیل یک گلوگاه می‌دهد. تغییرات قوس از نقطه شروع و به سطح ختم می‌شود و توزیع شدت جریان هم از نقطه (الکتروود) شروع و به سطح (قطعه کار) ختم می‌شود. این فرم توزیع قوس در اثر فشار نیروی مغناطیسی است که در اثر آن، گازهای یونیزه شده در ستون دارای حرکت نوسانی می‌شوند.

فشار میدان مغناطیسی متناسب با مجذور شدت جریان است (I^2). اندازه گیری سرعت واقعی گاز بسیار مشکل است ولی اندازه آن حدوداً بین 10^4 - 10^5 سانتیمتر بر ثانیه است. در جریان متناوب نیز فشار گاز ایجاد می‌شود، اما با شدت جریان تنزل می‌کند. چون مستقل از قطب است، از اینرو بصورت ضربان^۲ یا پالس عمل می‌کند که تعداد آن در ثانیه حدود دو برابر فرکانس است.

در اثر ضربان گاز، ستون قوس حالت گردابی پیدا کرده که به طرف ریشه قوس و نوک الکتروود کشیده شده و در سطح قطعه کار وسعت پیدا می‌کند و به همین علت شکل هندسی قوس ناقوسی شکل است. فشار ایجاد شده در سطح تابع فشار ریشه قوس است که خود تابع فرم خروج الکترون‌هاست. خروج الکترون‌ها بستگی به ترکیب شیمیایی الکتروود و فشاری دارد که قوس در آن فشار شکل می‌گیرد.

^۲Pulse



شکل ۲-۵: میدان مغناطیسی ایجاد شده به دور قوس. جریان گاز پلاسما از الکترود به سمت قطعه کار با سرعت زیاد جریان پیدا کرده و بر روی ذرات مذاب انتقالی و مقدار نفوذ جوش مؤثر است.

کاتد یعنی نقطه خروج الکترون‌ها که اثر عمده‌ای در فشار قوس و نوع روش جوشکاری دارد. اجسامی مانند کربن، مولیبدن و تنگستن داغ آمادگی زیادی برای خارج شدن الکترون‌ها دارند. از این رو ریشه قوس بصورت یک نقطه به نام نقطه کاتدی^۱ نخواهد بود. در اینصورت دانستیه شدت جریان هم کم است. چنین حالتی را در کاتد بنام کاتد حرارتی و یا الکترود حرارتی می‌نامند.

هنگامی که نقطه کاتدی شکل بگیرد مکانیزم آن را غیرحرارتی و یا کاتد سرد و یا نشر پلاسما^۲ می‌نامند. در کاتدهای غیرحرارتی مانند آلومینیوم و مس، دانستیه شدت جریان زیاد است که در اینصورت ریشه‌ی قوس دچار انقباض می‌شود.

در کاتدهای حرارتی دانستیه شدت جریان بین 10^6 تا 10^8 آمپر بر متر مربع می‌باشد. در کاتدهای غیرحرارتی دانستیه شدت جریان از مرز 10^{12} آمپر بر متر مربع می‌گذرد. چرا که قوس بر یک نقطه متمرکز می‌شود.

^۱Cathode Spot
^۲Plasma Emission

از طرفی دانسیته شدت جریان در ستون قوس در حدود 10^6 تا 10^7 آمپر بر متر مربع می-باشد. برای یک آمپر مشخص هر چه قدر قطر الکتروود کمتر شود، مقدار دانسیته‌ی جریان بالاتر است، یعنی تراکم بخار و تمرکز الکترون‌ها در یک سطح باریک‌تر انجام می‌شود، بنابراین حوضچه-ی جوش عمیق و باریک خواهد بود. این مسأله اساس فرآیند جوشکاری پرتو الکترونی است. اختلاف درجه حرارت در سطح ستون قوس و در نوک الکتروود تفاوت زیادی دارد. بطوریکه درجه حرارت در ستون قوس زیاد و در سطح الکتروود به نسبت کمتر می باشد. بنابر این گرادیان درجه حرارت بالایی در ستون قوس یا در نزدیکی سطح الکتروودها وجود دارد.

۲-۱-۲ خصوصیات فیزیکی ناحیه کاتد و آند در قوس

دو فاکتور عمده در ناحیه الکتروود یا آند و کاتد وجود دارد، حوزه وسیع الکتریکی و حرارتی و تمرکز زیاد الکترون‌ها یا دانسیته شدت جریان زیاد در ستون قوس (انقباض). براساس آزمایشات متعدد و اندازه‌گیری میدان الکتریکی و حرارتی نزدیک به کاتد جیوه (الکتروود جیوه)، دانسیته حرارت حدودا $10^8 \times 6$ ولت بر متر بوده که در آند کمی این مقدار کمتر است. زیرا ضخامت یا کلفتی این میدان در آند کمتر از 10^{-5} متر است (۰/۰۱ میلی متر) و در کاتد این ضخامت کمتر است. بسیار مشکل است که بطور مستقیم میدان حرارتی یا گرادیان درجه حرارت را در نزدیکی الکتروود محاسبه نمود. اما با روش‌های غیرمستقیم مشخص شده که درجه حرارت در نوک الکتروود (کاتد) بیش از ۶۰۰۰ درجه کلوین است (۵۸۰۰ درجه سانتی گراد).

۲-۱-۳ انواع قوس

قوس مستقیم بر روی الکتروود مصرفی و قوس غیر مستقیم بر روی الکتروود غیر مصرفی اعمال می شود. مانند جوشکاری سرامیک ها و کوره‌های قوسی.

۴-۱-۲ عوامل موثر بر دمای قوس

- نوع محیط یونیزه
- نوع الکتروود
- نوع گاز محافظ مصرفی
- مقدار آمپر
- دمای قوس به آمپر بستگی دارد نه آمپر بر سطح.

۵-۱-۲ عوامل پایدار کننده ی قوس

از نظر فیزیک قوس، عوامل زیر باعث پایداری قوس الکتریکی می‌گردند.

- هدایت الکتریکی بالا.
- هدایت حرارتی پایین.
- دمای بالا.
- مقدار انرژی یونیزاسیون پایین.

۶-۱-۲ نیروهای قوس

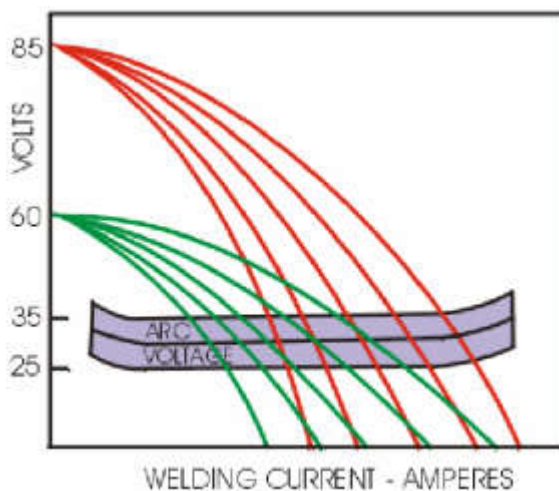
- نیروی ثقل که نیروی جاذبه زمین بوده و همواره جهت آن به سمت هسته مرکزی زمین است.
- نیروی کشش سطحی که تمایل به نگهداری مذاب به حالت قطره ای درنوک الکتروود دارد.
- نیروی هیدرواستاتیک (ناشی از اختلاف دمای شدید) که باعث اختلاف فشار و نهایتاً جابجایی می‌شود.
- نیروی پلازما جت که شبیه نیروی الکترو مغناطیسی و متناسب با چگالی جریان بوده و با افزایش چگالی، نیروی پلازما جت بیشتر و قطرات ریزتر خواهند شد. این نیرو از طرف الکتروود به سمت مذاب است.
- فشار بخار از مذاب به سمت بالا.
- ویسکوزیته.

۷-۱-۲ انواع مولدهای جریان قوس

الف: دستگاه های آمپر ثابت^۱ (CC): در این ماشین ها با تغییر ولتاژ، تغییرات آمپر کم

است و هرچه شیب منحنی شدیدتر باشد، به علت تغییرات کم جریان مناسب تر است. این روش بیشتر برای جوشکاری زیرپودری (SAW)، جوشکاری با الکتروود تنگستن با محافظت گاز (GTAW یا TIG) و جوشکاری پلاسما (PAW) مناسبند.

مدار ولت آمپر در دستگاه های قوس الکتریکی دستی و جوشکاری تیگ و پلاسما از نوع نزولی است. در این دستگاه با تغییرات طول قوس توسط جوشکار، مقاومت قوس تغییر نموده و باعث نوسانات در ولتاژ آمپر می گردد.



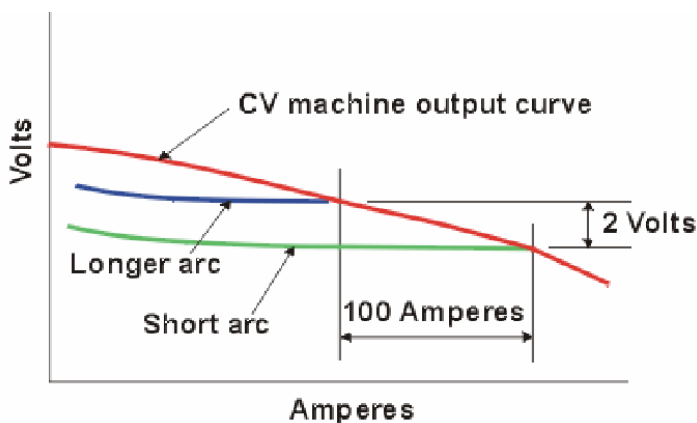
شکل ۲-۶: نمودار ولتاژ-جریان دستگاه های آمپر ثابت.

در نمودار فوق تغییرات آمپر با نوسانات کم طول قوس بسیار شدید است و باعث می گردد با تغییرات طول قوس قدرت قوس کم و زیاد شود. برای رفع این مشکل دستگاه های جدید مجهز به سیستم حسگر آمپر می باشند. وقتی آمپر روی مقداری خاص تنظیم می شود، با تغییرات طول قوس در هنگام جوشکاری، حسگر جلوی نوسانات آمپر را گرفته و مقدار آمپر تقریباً ثابت می ماند. نمودار ولت-آمپر این دستگاه ها از نوع نزولی با شیب تند بوده و به آنها دستگاه های جریان ثابت می گویند. همانطور که در نمودار مشاهده می شود، با تغییرات طول قوس، میزان نوسانات

^۱Constant Current (CC)

آمپر بسیار کم و در حدود ۵-۸ آمپر است. دستگاه‌های قوس دستی و جوشکاری تیگ از نوع جریان ثابت‌اند. با ادغام منحنی ولت-آمپر قوس و منحنی ولت-آمپر دستگاه محدوده کاری قوس مشخص می‌گردد.

ب: دستگاه‌های ولتاژ ثابت^۲ (CV): در این دستگاه‌ها با تغییرات اندک ولتاژ، جریان به نحو زیادی تغییر می‌کند. این نوع دستگاه‌ها بیشتر برای جوشکاری با سرعت تغذیه الکتروود ثابت مانند جوشکاری زیرپودری و جوشکاری با گاز محافظ بکار می‌روند. در این دستگاه‌ها تغییرات طول قوس سریعاً جبران شده و قوس اثر خود تنظیمی دارد. ولتاژ از روی دستگاه تنظیم شده و آمپر در ارتباط با سرعت تغذیه سیم می‌باشد. با افزایش سرعت سیم، آمپر زیاد شده و با کاهش آن آمپر کم می‌شود. با ادغام منحنی ولت-آمپر قوس کوتاه با نمودار قوس‌بلند، محدوده کاری قوس در جوشکاری با الکتروود مصرف شدنی تحت حفاظت گاز (تیگ یا میگ/مگ) و زیر پودری مشخص می‌گردد.



شکل ۲-۷: نمودار ولتاژ-جریان دستگاه‌های ولتاژ ثابت.

مولدهای برق ولتاژ ثابت دارای یک شیب در منحنی ولت-آمپر می‌باشند. کنترل شیب برای ثبات قوس بکار رفته و در آمپرهای پایین و انتقال مذاب بصورت اتصال کوتاه کاربرد دارد. ضریب خود القایی (اندوکتانس) نیز در دستگاه ولتاژ ثابت وجود دارد. ضریب خود القایی در جوشکاری با جریان پایین و انتقال اتصال کوتاه، نوسانات سریع جریان را مهار نموده و در نتیجه باعث پاشش کمتر جرقه و سطح جوش بهتر می‌گردد. چنانچه ضریب خودالقایی کم باشد، سیم الکتروود به

^۲Constant Voltage (CV)

داخل حوضچه جوش فرورفته و عمل اتصال کوتاه رخ می‌دهد. با این عمل جریان جوشکاری سریعاً افزایش یافته و باعث انفجار مذاب و پاشش زیاد جرقه به اطراف می‌گردد. اگر ضریب خود القایی زیاد باشد جریان اضافی به مدار اعمال شده و طول قوس را زیاد و طول الکتروود را کوتاه می‌کند. برای تنظیم ضریب خود القایی در جلوی دستگاه چندین فیش اتصال وجود دارد که به صورت تجربی ضریب خود القایی مناسب باید تنظیم گردد.

۸-۱-۲ دستگاه‌های تأمین انرژی جوشکاری قوس الکتریکی

الف: ترانسفورماتور

همانطور که اشاره شد، از برق مستقیم و یا متناوب می‌توان در جوشکاری استفاده کرد. با قراردادن یک ترانسفورماتور در مدار جریان متناوب، می‌توان آمپر و ولتاژ مناسب را برای جوشکاری تأمین کرد. ترانس از یک هسته آهنی و دو سیم پیچ به نام‌های سیم پیچ اولیه و ثانویه تشکیل شده است. هر دو سیم پیچ بر روی هسته پیچیده شده‌اند و سیم پیچ اولیه با تعداد دور زیاد سیم و قطر نازک‌تر به برق شهر وصل شده و سیم پیچ ثانویه با تعداد دور کمتر و قطر ضخیم‌تر به خروجی دستگاه متصل می‌باشد. مقدار ولتاژ در سیم پیچ ثانویه به نسبت تعداد دور سیم پیچ‌ها بستگی دارد و از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$P_{in} = I_p V_p = P_{out} = I_s V_s$$

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} = \frac{I_p}{I_s}$$

N_p ، V_p ، I_p به ترتیب جریان و ولتاژ ورودی (اولیه)، و تعداد دور سیم پیچ اولیه و V_s ، I_s

N_s به ترتیب جریان و ولتاژ خروجی (ثانویه)، و دور سیم پیچ ثانویه است. P توان منتقله است.

ترانسفورماتور معمولاً تا ۴۰۰ آمپر ظرفیت دارد و در دو نوع خشک و روغنی ساخته می‌شود.

در ترانسفورماتور خشک به علت خنک شدن سیم پیچ‌ها با هوا نمی‌توان برای ساعت‌های طولانی با این دستگاه کار نمود، ولی در ترانسفورماتورهای روغنی، روغن مخصوص (غیر الکترولیت) که

^۱Primary

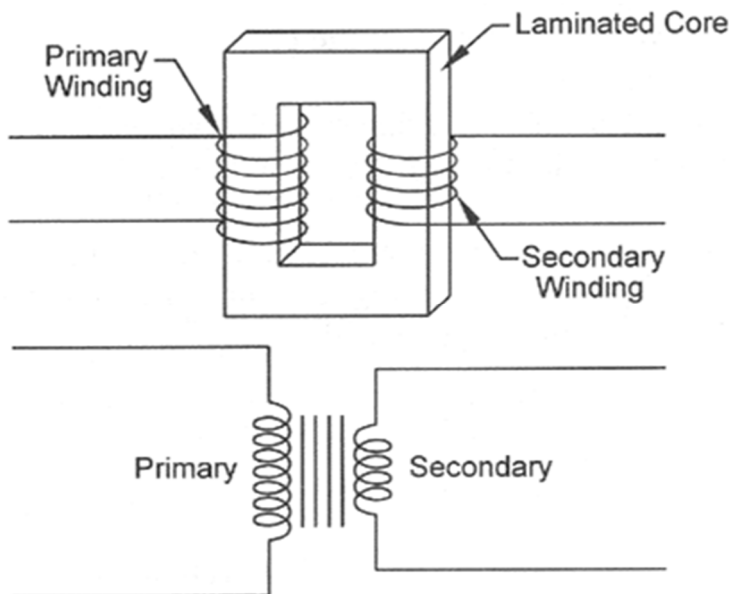
^۲Secondary

فصل دوم: فرآیندهای مبتنی بر قوس الکتریکی

جریان برق را از خود عبور نمی‌دهد، اطراف سیم پیچها را گرفته و سیمها را خنک می‌دارد. بنابراین می‌توان در ساعت‌های طولانی با این نوع دستگاه‌ها کار کرد. ترانسفورماتورها در دو نوع کاهنده و افزایشنده نیز دسته بندی می‌شوند.

ترانسفورماتوری که ولتاژ زیاد را به ولتاژ کمتری تبدیل کرده و آمپر را افزایش می‌دهد، ترانسفورماتور کاهنده یا کم‌کننده نام دارد. به عبارت دیگر اگر تعداد دور سیم پیچ اولیه بیشتر از ثانویه باشد، ترانس کاهنده است. ترانسفورماتوری که ولتاژ کم را به ولتاژ زیادتری تبدیل کرده و آمپر را کاهش می‌دهد، معروف به ترانسفورماتور افزایشنده است. به عبارت دیگر اگر تعداد دور سیم پیچ اولیه کمتر از سیم پیچ ثانویه باشد ترانس افزایشنده است.

جهت تشکیل قوس الکتریکی ولتاژ کم (۱۵ تا ۵۰ ولت) و شدت جریان زیاد (۶۰ تا ۳۰۰ آمپر) مورد نیاز است. بنابراین ترانس‌های جوشکاری از نوع کاهنده هستند. بدین معنی که چون برق شهر دارای ولتاژ زیاد (۲۲۰ ولت) و آمپر کم است، لذا برای جوشکاری باید ولتاژ را کم و آمپر را زیاد کرد. زیرا هم خطر برق گرفتگی کمتر شده (ولتاژ بالا بسیار خطرناک است) و هم جریان برق جهت عمل جوشکاری تامین می‌گردد.



شکل ۲-۸: هسته مرکزی و سیم پیچ یک ترانسفورماتور کاهنده مورد استفاده در جوشکاری.

ب: ژنراتور

دستگاهی است که نیروی برق با جریان مستقیم و آمپر زیاد تولید می‌کند. در جوشکاری با جریان مستقیم معمولاً مولد از یک موتور ژنراتور تشکیل یافته است. موتوری که ژنراتور را به حرکت در می‌آورد ممکن است الکتریکی بوده و یا بنزینی و گازوئیلی باشد. در مناطقی که برق وجود ندارد، از موتور ژنراتورهای گازوئیلی و یا بنزینی استفاده می‌کنند و این نوع موتور ژنراتورها را دستگاه‌های جوشکاری سیار می‌نامند.

ج: رکتی فایر

دستگاهی است شبیه به ترانس جوشکاری با این تفاوت که با قرار دادن یک دیود یا یکسو کننده در مدار آن، جریان برق متناوب وارد دستگاه شده و جریان خروجی آن می‌تواند هم به صورت مستقیم و هم متناوب باشد.

د: اینورتر جوشکاری

نسل جدید دستگاه‌های جوشکاری دارای سیستم‌های اینورتوری می‌باشند که موجب سبکی وزن و قابلیت‌های الکترونیکی زیاد می‌باشند. در این دستگاه‌ها برق ورودی ابتدا یکسو شده سپس ترانزیستور به جریان متناوبی با فرکانس بالا تبدیل می‌گردد. سپس جریان متناوب فرکانس بالا، وارد ترانس شده و سپس به جریان مستقیم یکسو تبدیل گشته و مورد استفاده قرار می‌گیرد. با افزایش فرکانس برق ورودی ترانس‌ها، ابعاد ترانس کم می‌شود و همین امر باعث سبکی وزن دستگاه‌های اینورتردار شده است.

۹-۱-۲ روشن کردن قوس

شروع یک قوس ممکن است به چندین روش متفاوت صورت گیرد. روشن کردن تماسی^۵، ولتاژ بالای DC، ولتاژ-فرکانس بالا^۶ و افزایش ناگهانی ولتاژ.

^۵Touch Striking

^۶High Voltage - High Frequency

الف: روشن کردن تماسی قوس: اگر الکتروود با قطعه کار تماس پیدا کند، اتصال کوتاه

رخ خواهد داد، سپس با کشیدن سریع، الکتروود گرم شده و قوس به پایداری می رسد. مشکل عمده روش تماسی آن است که در جوشکاری با الکتروود تنگستن (TIG)، گاهی اوقات سبب تولید آخال تنگستنی در جوش می شود. بنابراین برای این نوع جوشکاری روش تماسی مناسب نیست ولی برای جوشکاری الکتروود دستی و جوشکاری تحت حفاظت گاز یک روش نرمال و کارآمد می باشد.

ب: ولتاژ بالای DC: اختلاف پتانسیل بالا در دو سر قطب مثبت و منفی سبب یونیزه

شدن فضای دو قطب شده و قوس برقرار می شود. برای گاز آرگون ولتاژ مورد نیاز حدود ۵ تا ۱۰ کیلوولت بوده که بسیار خطرناک است.

ج: فرکانس بالا-ولتاژ بالا: خطرناک بودن ولتاژ را با ایجاد فرکانس جریان بالا حل کرده-

اند. (بعنوان مثال ۳ کیلوولت با فرکانس ۵ مگاهرتز). چون که جریان فرکانس بالا و ولتاژ بالا از لایه بیرونی (پوست) حرکت کرده و خطری برای سیستم عصبی، مغز و قلب انسان ندارد. این روش در جوشکاری با الکتروود تنگستنی (تیگ) بیشتر استفاده می شود. در جوشکاری تیگ با جریان مستقیم، فقط در لحظه شروع از سیستم HF و قوس تماس برنامه ریزی شده^۷ استفاده شده و پس از برقراری قوس، سیستم HF از مدار خارج می شود. در جوشکاری با جریان AC سیستم HF در زمان جوشکاری بطور مداوم در مدار می باشد. چون جریان AC در هر ثانیه چندین مرتبه به صفر می رسد که امکان قطع شدن قوس وجود دارد. مشکل این روش تولید نویزهای رادیویی^۸ است که سبب اختلال در سیستم های کامپیوتری و کنترل از راه دور دستگاه ها می شوند.

د: ولتاژ مدار باز و بسته: ولتاژ بین قطب های ماشین جوشکاری هنگامی که جریانی در

مدار جوش جاری نباشد، ولتاژ مدار باز نامیده می شود. از آنجایی که ولتاژ مدار باز می تواند تا ۱۰۰ ولت هم برسد، جوشکارها در معرض خطر آسیب دیدگی جدی و یا حتی مرگ در اثر

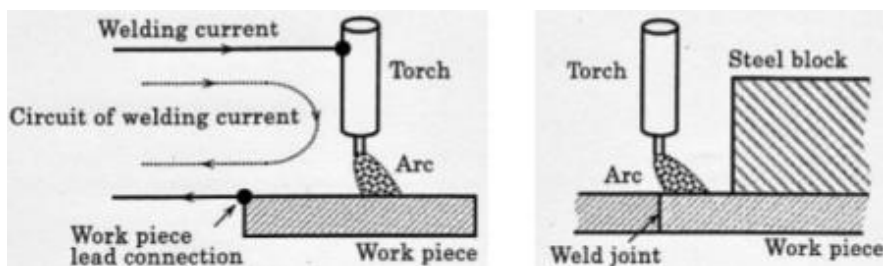
^۷Life Arc

^۸Radio Noise

شوگ الکتریکی می باشند. هر گاه دستگاه جوشکاری روشن بوده و از آن استفاده شود، مقدار ولتاژ موجود را ولتاژ مدار بسته گویند. مقدار این ولتاژ ۱۸ تا ۳۶ ولت می باشد.

۱۰-۱-۲ وزش قوس

در اطراف هر هادی جریان الکتریسته، یک میدان مغناطیسی به صورت دوار متحدالمرکز وجود دارد. در جوشکاری این میدان اطراف الکتروود، کابل و مسیر عبور جریان در داخل قطعه نیز بوجود می آید. اثر این میدان در بعضی موارد باعث انحراف قوس الکتریکی گشته که به آن وزش قوس^۹ گویند که در اثر آن فلز پایه به خوبی ذوب نشده و الکتروود بصورت یکطرفه می سوزد و باعث ایجاد خوردگی در کنار جوش، گل جوش و پاشش جرقه زیاد می گردد.



شکل ۲-۹: اثر نقطه اتصال کابل (سمت چپ) و شکل قطعه کار (سمت راست) بر پدیده وزش قوس.

عوامل موثر در ایجاد وزش قوس

- فولادهای فریتی، مواد فرومغناطیس اند که میدانهای مغناطیسی جذب آنها می شود. مسیر انحراف و شدت انحراف قوس در اثر میدانهای مغناطیسی پیچیده بوده و غیرقابل پیش بینی است. ولی یکسری قوانین بر آن تأثیرگذار است که به تشریح آن پرداخته می شود.
- انحراف قوس الکتریکی در جهت زاویه الکتروود بیشتر دیده می شود.
 - در ابتدا و انتهای مسیر جوشکاری قوس به طرف قطعه کار منحرف می گردد. (بخاطر تمایل میدان مغناطیسی برای جذب در فولاد).
 - در جوشکاری پاس اول در جوش گوشه ای یا نفوذی قوس به سمت فلز جوش منحرف می گردد.

^۹Arc Blow