

فصل اول

فرآیندهای جوشکاری مقاومتی

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱	۱-۱- مقدمه
۱	۱-۲- جوشکاری مقاومتی نقطه ای
۱۱	۱-۳- جوشکاری مقاومتی نواری
۱۵	۱-۴- جوشکاری زائده ای
۱۸	۱-۵- جوشکاری فرکانس بالا
۲۱	۱-۶- جوشکاری جرقه ای
۲۴	۱-۷- جوشکاری سر به سر
۲۶	۱-۸- جوشکاری ضربتی
۲۸	۱-۹- لحیم کاری سخت و نرم مقاومتی

در این فصل در مورد فرآیندهای مختلف جوشکاری مقاومتی و اصول کارکرد آنها و همچنین لحیم کاری نرم و سخت مقاومتی^۱ مباحثی به اختصار ارائه خواهد شد تا نمایی کلی از فرآیندهای مختلف در ذهن خواننده مجسم گردد.

در فرآیندهای جوشکاری مقاومتی، اتصال دو سطح توسط حرارت و فشار توأم انجام می گیرد. فلزات به دلیل مقاومت الکتریکی در اثر عبور جریان الکتریکی گرم شده و حتی به حالت ذوب نیز می رسند. اعمال جریان الکتریکی با چگالی زیاد در زمانهای کوتاه باعث به حالت خمیری در آمدن (قبل از ذوب) قطعه مورد جوشکاری می گردد. و اعمال نیروی فشار در زمانهای قبل و حین عبور جریان وجود یک مدار الکتریکی پیوسته را تضمین نموده و در زمان گرم شدن قطعه باعث فورج شدن محل جوشکاری می شود این فشار بعد از قطع جریان برق هم ادامه داشته و به فورج شدن و سپس خنک شدن محل جوشکاری کمک می کند.

دمای بیشینه ای که در این فرآیندها قابل دسترسی است معمولاً بالاتر از نقطه ذوب فلز پایه^۲ می باشد.

ادامه بحث را بر روی اصول فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه ای^۳ متمرکز نموده بقیه فرآیندها نیز اصولی تقریباً مشابه با این فرایند را دارند، با این تفاوت که محدود تغییراتی در شکل تجهیزات، متغیرها و تکنیک های فرایند اعمال گردیده تا متناسب با کاربرد مورد نظر قابل استفاده گردد.

۱-۲- جوشکاری مقاومتی نقطه ای:

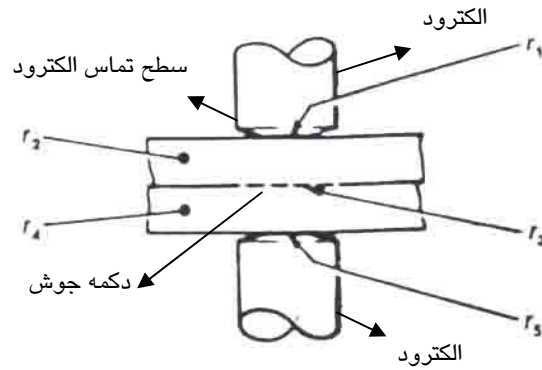
جوشکاری مقاومتی نقطه ای فرآیندی است که در آن سطوحی که بر روی هم قرار گرفته اند از طریق حرارت تولید شده در یک یا چند نقطه به هم متصل می شوند. گرمای تولید شده در این نقاط، حاصل از فلوی جریان الکتریکی است که بین

¹ - Resistance soldering and Brazing

² - Base metal

³ - Resistance spot welding (RSW)

الکترودها برقرار می شود و از میان قطعات نیز عبور می کند. ضمن اینکه الکترودها در این وضعیت با اعمال فشاری خاص، سطوح را به نزدیک می کنند. شکل (۱-۱) شمای کلی از این فرآیند را نشان می دهد.



شکل ۱-۱ شمائی کلی از فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه ای

همانطور که گفته شد که فلزات در اثر عبور جریان الکتریکی گرم شده که طبق قانون ژول حرارت حاصل از معادله (۱-۱) تعیین می شود:

$$Q = KRI^2 t \quad \text{معادله ۱-۱:}$$

که I شدت جریان، R مقاومت، t زمان و Q حرارت میباشد.

فاکتورهای شدت جریان و زمان از طریق دستگاه جوشکاری قابل کنترل هستند. اما مقاومت الکتریکی به عواملی مختلفی از جمله جنس و ضخامت، قطعه کار، فشار بین الکترودها، اندازه و شکل و جنس الکترودها و چگونگی سطح کار یعنی میزان صافی و تمیزی آن بستگی دارد.

در شکل (۱-۱) شمای کلی از مقاومت‌های مختلفی که در مسیر عبور جریان قرار دارند نشان داده شده اند. R فرمول ژول (۱-۱) معمولاً مجموع مقاومت‌هایی است که در سیستم داریم:

$$R = \sum r_j \quad \text{معادله ۲-۱:}$$

I_1 و I_5 مقاومت تماس الکترودها با سطح کار^۱ می باشد که مقاومت‌های ناخواسته ای هستند و باعث اتلاف حرارت و نیز چسبیدن الکترودها به روی سطح کار می شوند. جنس الکترودها بر روی این مقاومت اثر می گذارند، همچنین اعمال فشار و تمیزی سطوح باعث کاهش این مقاومت های خواهد شد. توجه به این نکته ضروری به نظر می رسد که با خنک کاری مناسب الکترودها، مقاومت I_1 و I_5 نیز کاهش خواهد یافت. زیرا افزایش دمای یک ماده مقاومت الکتریکی آن را نیز افزایش می دهد.

I_2 و I_4 مقاومت الکتریکی دو قطعه (ورق) است که به دلیل کم بودن مقدار مقاومت الکتریکی فلزات معمولات مقادیری ناچیز نسبت به سایر مقاومت ها دارند.

$$I_2, I_4 = S \frac{L}{S} \quad \text{معادله ۱-۳:}$$

که S بستگی به جنس ورق دارد و L ضخامت ورق است و بالاخره I_3 مقاومت فصل مشترک است که در بین این مقاومتها بیشترین مقدار را داراست زیرا: اولاً با سیستم خنک کننده مستقیماً در تماس نیست و در نتیجه دمای این قسمت افزایش یافته که خود باعث می شود مقاومت نیز افزایش می یابد. ثانیاً چون این مقاومت مربوط به محل اتصال دو قطعه است دارای مقاومتی بالاتری از مقاومت بین قطعات و الکترودها (I_1 و I_5) می باشد.

البته توجه به این نکته ضروری است که در مسیر انتقال جریان از منبع تولید تا الکترودها به طور پیوسته مقاومت‌هایی وجود دارند که باعث ایجاد حرارت و افت جریان می شوند و در محاسبه مقدار جریان مورد نیاز برای جوشکاری باید مورد توجه قرار گیرند.

¹ - Contact resistance

البته با اتخاذ تمهیداتی می توان مقدار حرارت ایجاد شده را کاهش داد یا از افزایش دمای اجزاء انتقال جریان جلوگیری نمود که این مطالب در فصول بعدی به صورت کاملاً مفصل بحث خواهد شد.

دستگاه های جوشکاری مقاومتی شامل دو واحد کلی می باشند: واحد الکتریکی (حرارتی)، واحد فشاری (مکانیکی) و اولی برای بالا بردن درجه حرارت موضع مورد جوش؛ دومی به منظور ایجاد فشار لازم برای اتصال دو قطعه در محل جوش است. نیروهای اعمالی می توانند بصورت دستی، هیدرولیک، پنوماتیک و هیدروپنوماتیک ایجاد شوند. اعمال فشار تا مرحله انجماد ادامه پیدا خواهد کرد. این فشار باعث می شود که لبه ها رویهم قرار گرفته و هوا وارد حوضچه مذاب نشود یا ذوب بیرون نریزد. در مورد دلخواه اعمال فشار و تاثیر آن بر روی کیفیت جوشکاری در فصل بعد مطالبی آورده شده است.

الکترودها در فرآیند های جوشکاری مقاومتی به اشکال گوناگونی ساخته می شوند. الکترودها در این فرآیندها باید جریان الکتریکی را به موضع اتصال هدایت کرده در ضمن وظیفه نگهداری ورق ها به روی هم و ایجاد فشار مورد نظر و تمرکز سریع حرارت در موضع اتصال را دارند.

الکترودها باید دارای ویژگی های زیر باشند:

۱- استحکام و سختی مناسب داشته باشند و در اثر فشار له نشوند.

۲- دمای آنیل^۱ بالایی داشته باشند.

۳- ضریب هدایت الکتریکی مناسب داشته باشند.

۴- ضریب هدایت حرارتی بالایی داشته باشند.

الکترودها از مواد و آلیاژهای ویژه ای ساخته می شوند که در مورد آنها در فصل دوم به طور مفصل بحث خواهد شد. همچنین در مورد اشکال مختلف مورد استفاده نیز بحث شده است.

¹ - Annealing Temperature

در هر حال فرآیند جوشکاری نقطه ای، فرآیندی با بالاترین تمرکز حرارتی (حدود ۹۵٪) و کمترین اتلاف انرژی در بین فرآیندهای مختلف جوشکاری می باشد. همچنین مشکل پیچیدگی^۱ قطعه بر اثر حرارت و منطقه متأثر از حرارت^۲ (HAZ) در این فرآیند کمتر به چشم می خورد. همچنین محدودیت موقعیت^۳ جوشکاری وجود ندارد و می توان در موقعیتهای مختلف با دستگاهی متناسب با آن وضعیت عمل جوشکاری را انجام داد.

عدم نیاز به مواد مصرفی، گاز محافظ و فلز پرکننده از جمله مزایای این فرآیند می باشند. همچنین از نظر محیط زیستی نیز این فرآیند کاملاً سالم می باشد. محدودیتهایی نیز در این روش جوشکاری وجود دارد که عبارتند از: برای فلزاتی که هدایت حرارتی و الکتریکی بالایی دارند مشکل است و نیاز به دستگاه های مخصوصی با تمهیداتی خاص است. فلزاتی که در برابر سریع سرد شدن و گرم شدن حساس هستند؛ نیاز به دستگاه مخصوص خواهند داشت و نیز از لحاظ ماکزیم ضخامت محدودیت وجود دارد (ضخامت ۳ تا ۴ میلیمتر). اگر فلزات غیرهمجنس که طبیعتاً مقاومت الکتریکی متفاوت دارند را جوشکاری می نمایم باید توجه داشته باشیم که ناحیه مذاب ترجیحاً به سمت فلزی با مقاومت بیشتر رشد می کند، زیرا در این ناحیه حرارت بیشتری بوجود می آید. برای جلوگیری از این مساله می توان در سمت با مقاومت بیشتر از الکترودی با قطر کمتر و یا از الکتروود با مقاومت بیشتر استفاده کرد.

البته در هنگام جوشکاری فلزت غیرهمجنس باید به این نکته توجه نمود که آلیاژ حاصل از تشکیل حوضچه مذاب دارای چه ترکیب شیمیایی، خواص مکانیکی و احیاناً فیزیکی خواهد شد و ریز ساختار آلیاژ تشکیل شده حاوی فازهای ترد نباشد.

¹ - Distortion

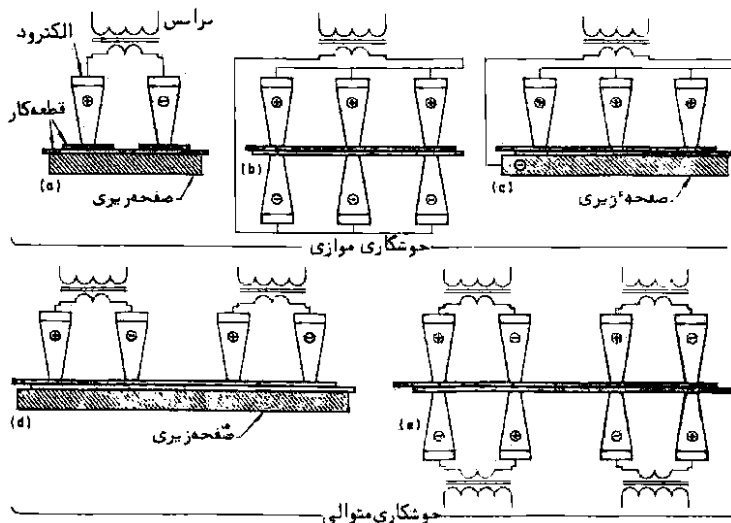
² - Heat Attested zone

³ - Position

این روش بصورت وسیعی برای اتصالات ورقهای بدنه خودرو، در صنایع خانگی، تولیدات ساختمانی و در حد محدودتری در صنایع هواپیمایی کاربرد دارند. جالب است بدانید در یک خودرو در حدود ۱۰۰۰۰ نقطه جوش مقاومتی وجود دارد که امروزه توسط سیستمهای مدرن روباتیک و یا کنترل کامپیوتری هوشمند انجام می شود. با کنترل اتوماتیک جریان، زمان و نیروی الکترودها می توان علاوه بر دستیابی به کیفیت بالای محصولات، نرخ تولید را افزایش داده و با بهره گیری از نیروی کار با مهارت کمتر، هزینه این بخش را نیز کاهش داد. بنا به نیاز و شرایط کاری، در مواردی تغییراتی در نحوه جوشکاری نقطه ای صورت میگیرد. هرچند این تغییرات در ماهیت جوشکاری وجود ندارد ولی آشنایی با آنها ضروری به نظر می رسد که به چند نمونه آن در زیر اشاره می شود:

الف) جوش با الکترودهای چندتایی: به دلیل نیاز به حداقل نمودن تعداد ترانسفورماتورها و اندازه دستگاه و کاهش قیمتها، ضروری به نظر می رسد از سیستم هایی استفاده شود که در هر برخورد الکترودها دو یا چندین جوش بر روی قطعه ایجاد شود. این فرآیند نیز بسته به روش تامین انرژی و نحوه قرار گیری و اتصال الکترودها به ترانسفورماتور به چند دسته تقسیم می شود. از دیدگاه تامین انرژی در این فرآیند از دو نوع طرح استفاده می شود. موازی، سری (متوالی)، در سیستم موازی مستقیم از یک ترانسفورماتور استفاده می شود که مدار ثانویه بصورت های مختلف مطابق شکل (۱-۲) می تواند چندین جوش را همزمان انجام دهد. در سیستم سری از تعدادی ترانسفورماتور استفاده می شود که مطابق شکل (۱-۲) با طرح های مختلف می تواند همزمان چندین نقطه جوش را بر روی کار بوجود آورد. مزیت روش دوم آن است که می توان ولتاژ بالایی را در موضع جوش بوجود آورد و یا برای ایجاد ولتاژ معین از ترانسفورماتورهای کوچکتری استفاده کرد. اما در مقابل باید شرایط ترانسفورماتورها و مقاومتهای در

الکترودها و کیفیت سطوح کاملا یکسان باشد تا خواص جوشهایی که همزمان ایجاد شده مشابه باشد.



شکل ۱-۲: انواع روشهای تامین انرژی در فرآیند جوشکاری مقاومتی با الکترودهای چندتایی

البته علاوه بر تقسیم بندی فوق، در برخی مراجع علمی طبقه بندی های دیگری نیز برای جوشکاری با الکترودهای چندتایی گفته شده که در ادامه به بحث در مورد آن می پردازیم: در برخی منابع در تعریف جوشکاری موازی^۱ به روشی اطلاق شده که در آن دو یا چند روش مستقیم بصورت همزمان و معمولاً در فواصل نزدیک به هم ایجاد می شود که در این روش الکترودهای بالایی به یک طرف ثانویه ترانسفورماتور و الکترودهای پایینی به طرف دیگر همان ترانسفورماتور متصل است (شکل (۱-۲) (b, c))

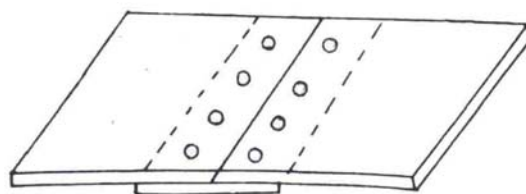
جوش مستقیم^۲ به حالتی گفته می شود که جریان جوشکاری بصورت مستقیم از الکترودها و قطعه کار بین آنها عبور نموده تا یک دکه جوش بوجود آید. در مواقعی که دسترسی به پشت قطعه کار مشکل باشد جوشکاری غیرمستقیم کاربرد دارد (شکل (۱-۲) (a)).

¹ - Parallel Welding
² - Direct Weld

در جوشکاری push-pull الکترودهایی که دقیقاً بر روی هم در دو سوی قطعات قرار گرفته اند به ترانسفورماتورهای مختلف متصل هستند و قطبیت متضاد با هم دارند (شکل (۲-۱) (e)). گاهی اوقات از این روش با عنوان جوشکاری بالا و پایین^۱ یاد می شود.

(ب) جوش دکمه ای یا دیسکی^۲: در جوشکاری ورق های سنگین و ضخیم نیاز به فشار انرژی الکتریکی زیادی است، با استقرار قطعات کوچک فلزی بین سطح مشترک ورق ها، عبور جریان الکتریکی را موضعی تر کرده و سطح تماس را کاهش می دهند و با ذوب این دکمه ها دو ورق با انرژی الکتریکی و فشار کمتری به یکدیگر متصل می شوند.

(ج) جوش «پل واره»^۳: مطابق شکل (۳-۱) از ورق های اضافی برای بالا بردن استحکام اتصال دو قطعه استفاده می شود.

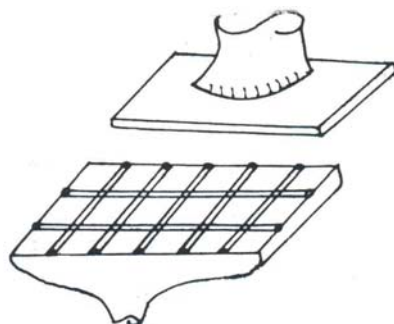


شکل ۳-۱: جوش پل واره

(د) جوشکاری له کردنی^۴: این روش در تولید شبکه های سیمی نظیر سد یا محافظهای توری لامپهای مختلف و یا اتصال سیم به ورق به میزان فراوان بکار گرفته می شود. سیم ها با طرح لازم بر روی فک ها یا الکترودهایی که بصورت مسطح با شکاف های پیش بینی شده قرار می گیرند و با یک فشار و پایین آوردن الکترودهای الکتریکی از محل تماس سیمهای روی هم قرار داده شده عبور کرده

1 - Over and Under Welding
2 - Button or Disc Welding
3 - Bridge Welding
4 - Mash Welding

و بر اساس جوش مقاومتی ذوب موضعی در این محل ها بوجود آمده و پس از پایان عبور جریان الکتریکی عمل اتصال انجام می گیرد.



شکل ۱-۴: جوش له کردنی

ه) فرآیند جوشکاری کوک^۱: یکی از الکترودها در این فرآیند طوری طرح شده است که توسط سیستم کنترل شده ای حرکت متناوب رفت و برگشتی (بالا و پایینی) دارد و همزمان با این حرکت صفحه کار نیز شبیه پارچه در زیر چرخ خیاطی حرکت انتقالی افقی می کند. به این ترتیب یک سری جوش نقطه ای بطور متوالی با فاصله معین بین ورق ها ایجاد می شود که شبیه بخیه های دوخته شده در زیر چرخ خیاطی است. می توان فاصله نقطه جوش ها را آنچنان کاهش داد که دکمه های جوشکاری کمی بر روی هم سوار شوند. در این حالت به شدت جریان بیش از حد عادی نیاز است چومن مقداری از جریان الکتریکی از جوش مجاور عبور می کند.

و) جوش مقاومتی نقطه ای - غلتکی^۲: در این روش یک سری جوش نقطه ای مجزا و در یک ردیف از طریق یک یا دو الکتروود دوار در حال چرخش ایجاد می شود. در حین ایجاد این ردیف جوشها، نیروی جوشگری بین نقاط برداشته نمی شود. اصول این فرآیند نیز شبیه نقطه جوش است. شعاع الکترودها طول تماس را تعیین می کند. فاصله بین جوشها بستگی به تنظیم سرعت الکتروود و مدت زمان

^۱ - Stitch Welding

^۲ - Roll- Resistance Spot Welding

قطع جریان دارد. این روش در مقایسه با روش دستی زمان فوق العاده کمتری در جوشکاری نیاز دارد. به دلیل حرکت الکترودها، جوش حاصل در این فرآیند، دارای دکمه کشیده شده ای است. البته توجه به این نکته ضروری به نظر می رسد که برخی مراجع علمی این روش را جزء فرایندهای جوشکاری مقاومتی نواری طبقه بندی کرده اند.

۳-۱- جوشکاری مقاومتی نواری^۱:

جوشکاری مقاومتی نواری فرایندی است که در آن مقاومت الکتریکی قطعه کار در برابر عبور جریان الکتریکی باعث ایجاد حرارته شده که این حرارت با فشار اعمالی ترکیب شده تا یک مسیر جوش را ایجاد کند. در حقیقت درز جوش شامل مجموعه ای از نقطه جوش ها می باشد. در برخی مراجع علمی فرآیند را بصورت زیر طبقه بندی می کنند:

- جوشکاری نقطه ای غلطکی (با فواصل جوشکاری نشده نسبتاً بزرگ بین دکمه ها)

- جوشکاری نقطه ای غلطکی تقویت شده^۲ (با فواصل جوشکاری نشده کوچک)

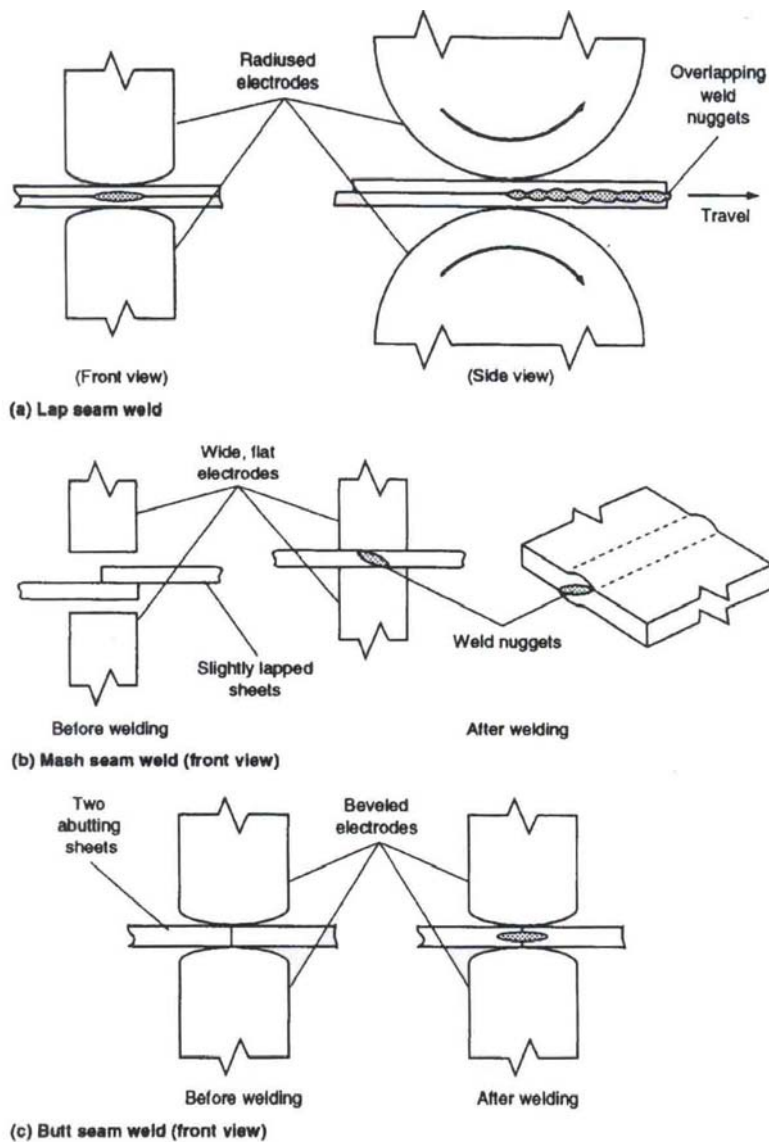
- جوشکاری درزی نشسته ناپذیر^۳ (دکمه های جوش سوار بر هم)

در این فرآیند اغلب دو الکتروود دایره ای شکل غلطکی برای اعمال جریان، نیرو و خنک کردن فلزکار مورد استفاده قرار می گیرد. اشکال گوناگون قطعه کار / غلطک موجود هستند. (شکل (۱-۵)).

¹ - Seam Resistance Welding

² - Reinforced Roll Spot Welding

³ - Leak-Tight Seam Welding



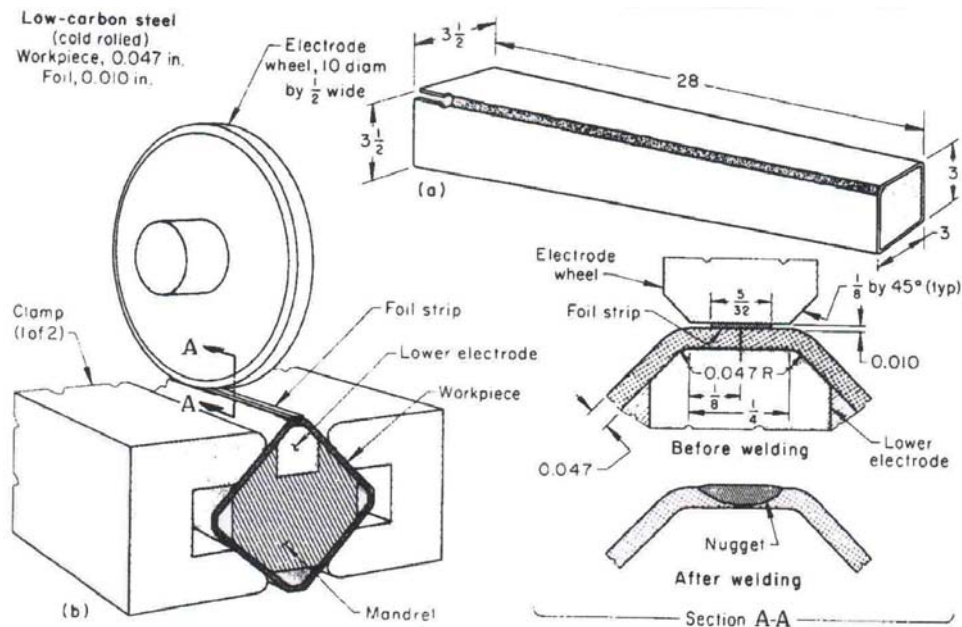
شکل ۱-۵: اشکال گوناگونی از اتصالات حاصل از جوشکاری مقاومتی درزی

هنگامیکه از دو الکترود غلطکی استفاده می شود، یک یا هر دو غلطک ها از طریق اعمال نیروی مستقیم به محور یا از طریق اعمال نیرو به سطح خارجی آنها به حرکت درمی آیند. در این نوع فرآیند می توان از الکترودهایی با اشکال دیگر نیز استفاده نکرد. مثلاً از ترکیب یک الکترود غلطکی و الکترود میله ای مسطح یا از یک سیستم تغذیه سیم درون شیار روی غلطک های استفاده می شود. (اشکال ۱-۶) و (۱-۵)) مزیت سیستم دوم این است که همیشه یک سطح تمیز و مناسب از سیم (که به عنوان الکترود عمل می کند) با قطعه کار در تماس می باشد. در

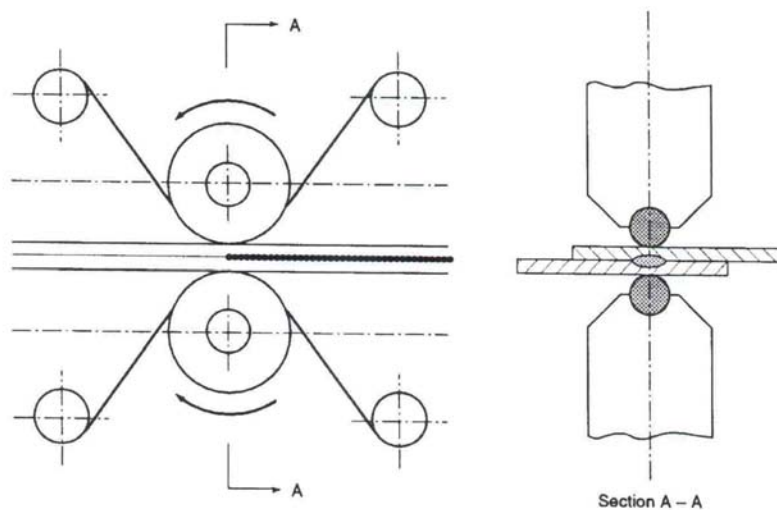
جوشکاری نواری، بدون اینکه نیروی اعمالی الکترودها بر قطعه کار برداشته شود، مجموعه ای از نقطه جوش ها شکل می گیرد. الکترود غلطکی ممکن است در حین فرآیند جوش پرخشی مداوم یا متناوب داشته باشد. سرعت جوشکاری، مقدار جریان، شکل موج جریان، نحوه خنک کردن، و مشخصات الکترود (نیرو، شکل و قطر) باید به دقت انتخاب شوند تا بهترین و بالاترین کیفیت جوش حاصل شود.

اصول کلی که در مورد جوشکاری مقاومتی نقطه ای گفته شد، در مورد

جوشکاری نواری نیز صادق است.



شکل ۶-۱: جوشکاری مقاومتی نواری با استفاده از یک الکترود غلطکی و یک الکترود میله ای

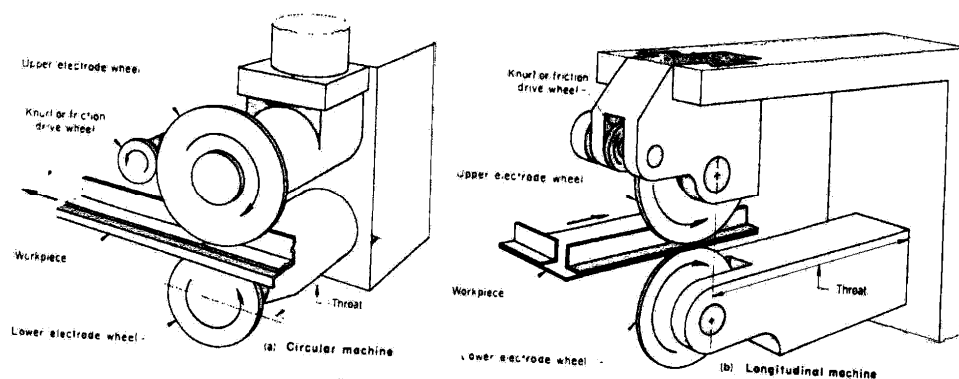


شکل ۷-۱: جوشکاری مقاومتی نواری با استفاده از الکترود سیمی

فرآیند جوشکاری مقاومتی نورای در صنایع خودروسازی (مثلا ساخت مخزن سوخت، لوله آگزوز، اتصالات سقف) ساخت ظروف استوانه ای شکل و بطریهای فلزی رادیاتور شوفاژ فولادی و ... کاربرد دارد. مزایای این فرآیند در مقایسه با جوشکاری مقاومتی نقطه ای، جوشکاری زائده ای^۱ و جوشکاری لیزر عبارتند از:

- امکان دستیابی به یک اتصال نشت ناپذیر در برابر مایع یا گاز
- عرض درز ممکن است کمتر از قطر جوش نقطه ای شود زیرا امکان تراشیدن^۲ پیوسته الکترودها وجود دارد.
- سرعت بالای جوشکاری و توجیه اقتصادی آن
- در این روش نسبت به روش جوشکاری نقطه ای، فولادهای پوشش دار قابلیت جوشکاری بالاتری دارند، زیرا با اتخاذ تمهیداتی می توان باقیمانده پوششی را که بر روی الکترودها قرار می گیرند حذف نمود.
- نسبت به روش جوشکاری لیزر، در این روش فولادهای پوشش دار قابلیت جوشکاری بالاتری دارند زیرا امکان فرار مواد پوشش به دلیل اعمال فشار بالا در منطقه جوش، حداقل است.
- سختی جوش مقاومتی نواری که با هوا خنک می شود کمتر از سختی جوش حاصل از روش لیزر است.
- اصول دستگاه جوشکاری مقاومتی درزی (نواری) از نظر ترانسفورماتور، سیستم فشار دهنده و غیره شبیه بقیه دستگاه های جوش مقاومتی است. غلطک ها معمولا به چندین روش بر روی دستگاه قرار می گیرند که دو نوع مهم آن در شکل (۸-۱) مشاهده می شود که غلطک ها در نوع اول عمود و در دومی موازی سطح جلو دستگاه هستند.

¹ - Projection Welding
² - Dressing

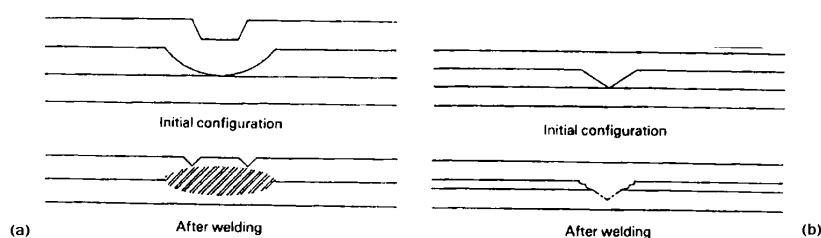


شکل ۸-۱: قرار گرفتن غلطک‌ها در دو حالت برای جوشکاری مقاومتی نوری. a: ماشینی محیطی b: ماشین طولی

۴-۱- جوشکاری زائده ای^۱:

جوشکاری زائده ای (PW) یک نوع جوشکاری مقاومتی است که در آن فلوی جریان الکتریکی در نقطه تماس متمرکز می‌شود که بصورت زائده ای موضعی در یک (یا دو) قطعه ای که بایستی جوشکاری شوند ایجاد شده است. هدف از استفاده از این زائده تمرکز حرارت تولید شده در نقطه تماس است. در یک کاربرد خاص، این فرآیند از جریان، نیرو و زمان جوشکاری کمتری نسبت به فرآیندهای مشابه که بدون زائده انجام می‌شوند، استفاده می‌کند. ضمن اینکه ایجاد تعداد زیادی نقطه جوش در یک زمان خیلی کوتاه، فرآیند تولید را تسریع می‌کند. جوشکاری زائده ای از نظر کاربرد به دو گروه تقسیم می‌شود: جوشکاری زائده ای برجسته شده^۲، جوشکاری زائده ای جامد^۳. این دو فرآیند در شکل (۹-۱) نمایش داده شده اند.

¹ - Projection Welding
² - Embossed- Projection Welding
³ - Solid- Projection Welding



شکل ۹-۱: اشکال مختلف جوشکاری زائده ای. a: جوشکاری زائده ای برجسته شده. b: جوشکاری

زائده ای - جامد

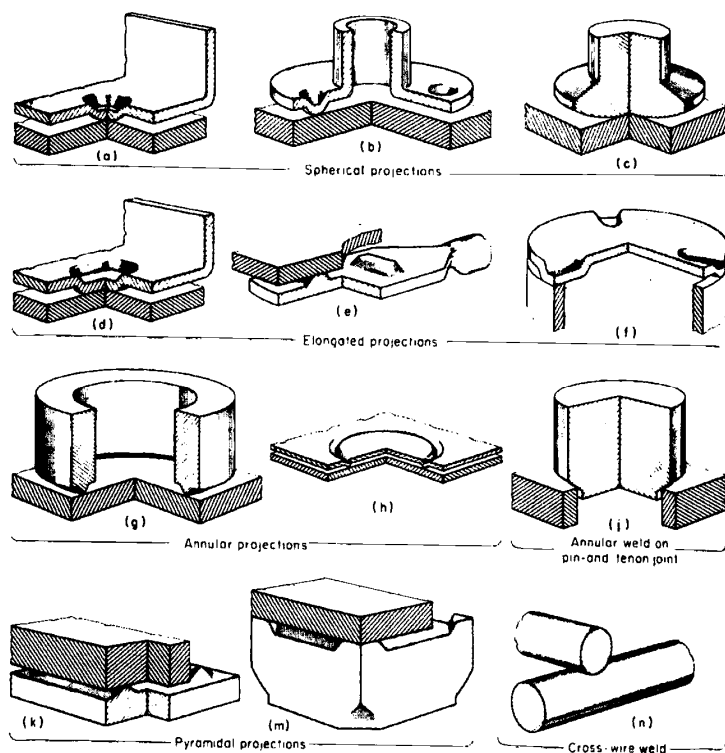
جوشکاری زائده ای برجسته شده، عموماً فرآیند اتصال ورق به ورق است که در آن یک زائده بر روی یکی از ورق‌ها ایجاد شده است. در جریان جوشکاری حرارت ابتدائی بر روی نقطه تماس و دیواره‌های زائده متمرکز می‌شود تا زائده متلاشی شود. در ادامه فرایند بصورت معمول با تشکیل دکمه جوش نوب شده ای کامل می‌شود. در جوشکاری زائده ای جامد نیاز است زائده بر روی یکی از دو جزء فورج شود. سپس در طول جوشکاری مقاومتی، نقطه تماس و زائده خودش گرم می‌شوند. در اینجا زائده به راحتی متلاشی نمی‌شود. بلکه متلاشی شدن از طریق نفوذ^۱ مواد مخالف است. بر خلاف جوشکاری زائده ای برجسته شده، اتصالات حاصل از این روش بیشتر به جوش‌های حالت جامد شبیه است نه نوبی. اتصال واقعی در حقیقت حاصل از فورج و اتصال نفوذی^۲ می‌باشد. این فرآیند از این نظر شبیه جوشکاری سر به سر مقاومتی^۳ یا جوشکاری سر به سر حلقه ای می‌باشد.

مثالهایی از جوشکاری زائده ای در شکل (۱-۱۰) نمایش داده شده اند.

^۱ - Penetration

^۲ - Diffusion Bonding

^۳ - Resistance Butt Welding



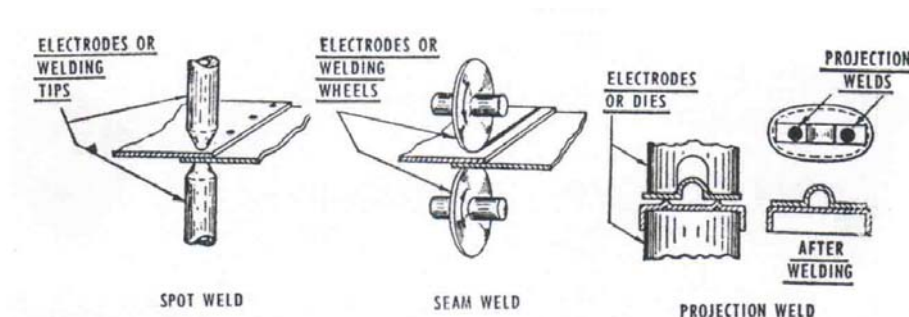
شکل ۱-۱۰: اشکال متنوع جوشکاری زائده ای

این فرآیند برای اتصالات ورق به ورق، جوش سیمهای متقاطع، برای اتصالات حلقوی و جوش مهره ها و پیچ ها بر روی ورق کاربرد دارد. بطور کلی، جوشکاری مقاومتری برای مواردی مناسب است که نسبت ضخامتها کمتر از ۳:۱ باشد، ولی با استفاده از جوشکاری زائده ای این محدودیت در انتخاب ضخامت وجود ندارد.

تفاوت کلی این فرآیند با فرآیند جوشکاری مقاومتری نقطه ای در شکل الکترودهاست که شبیه فک های پرس است. همچنین فشار و شدت جریان بالاتری نیاز است. در مورد جنس و شکل الکترودهای این فرآیند در فصل بعد به طور مفصل بحث خواهد شد.

شکل (۱-۱۱) فرآیندهای جوشکاری مقاومتری نقطه ای، نواری و زائده ای را برای مقایسه در کنار هم نشان می دهد. فرایند جوشکاری مقاومتری نقطه ای و نواری برای جوشکاری ضخامت‌های بیشتر از ۰/۰۰۱ اینچ مناسب است. جوشکاری مقاومتری نقطه ای برای موادی با ضخامت کمتر از ۱/۴ اینچ و جوشکاری مقاومتری

نواری برای مواد با ضخامت کمتر از $\frac{1}{8}$ اینچ مناسب است. جوشکاری مقاومتی زائده ای برای ضخامت های 0.02 اینچ و بالاتر مناسب است.



شکل ۱-۱۱: مقایسه جوشکاری مقاومتی نقطه ای، نواری و زائده ای

۵-۱: جوشکاری فرکانس بالا^۱:

فرآیندی است که در آن منبع حرارتی برای ذوب سطوح اتصال از طریق جریان متناوب (AC) با فرکانس بالا (HF) تامین می شود. برخلاف جریان مستقیم (DC) یا جریان متناوب فرکانس پایین، جریان فرکانس بالا با چگالی بالایی در طول سطوح (اثر پوسته ای)^۲ جریان یافته و از سطوح موازی مجاور نیز بازگشت می نماید. (اثر نزدیکی^۳). این دو اثر به معنی آن است که گرم شدن و در نتیجه آن ذوب شدن می تواند بصورت کاملاً مشخصی بر روی مناطقی که نیاز است متمرکز شود. جریان فرکانس بالا می تواند از طریق یک سیم پیچ (جوشکاری فرکانس بالای القایی^۴) (HFIW) یا تماس الکتریکی (جوشکاری مقاومتی فرکانس بالا^۵) (HFRW) تامین شود.

در فرآیند جوشکاری فرکانس بالای القایی، جریان از طریق یک سیم پیچ به قطعه کار (معمولاً لوله یا تیوپ) القاء می شود. و به دلیل اثرات پوسته ای و نزدیکی جریان، فلوی جریان در لبه های ورق در قسمت V شکل و در جهت ضخامت

¹ - High-Frequency

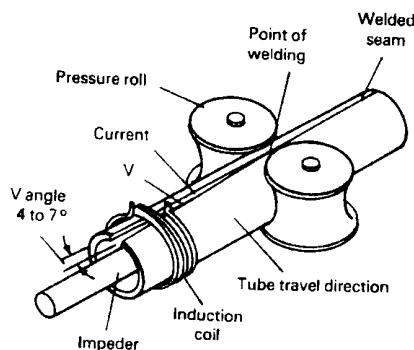
² - Skin Effect

³ - Proximity Effect

⁴ - High-Frequency Induction Welding

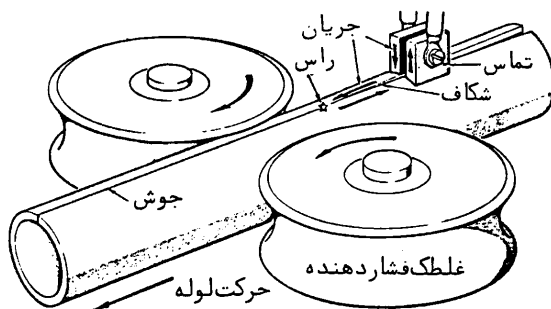
⁵ - High-Frequency Resistance Welding

متمرکز شده و باعث ذوب سطوح و در نتیجه اتصال آن می شود (شکل (۱-۱۲)).
 در برخی فلزات فعال، نیاز به یک گاز محافظ برای جلوگیری از اکسیداسیون منطقه
 جوش و HAZ نیز وجود دارد.



شکل ۱-۱۲: جوشکاری فرکانس بالای القائی

فرآیند جوشکاری مقاومتی فرکانس بالا تقریباً شبیه فرآیند قبلی است با
 این تفاوت که جریان الکتریکی با فرکانس بالا (۴۵۰ kHz) توسط دو کفشک مطابق
 شکل (۱-۱۳) به سطح ورق نزدیک محل تماس دو لبه وارد شده و مدار بسته ای از
 جریان الکتریکی ایجاد شود. حرارت حاصل مذاب لازم در محل تماس دو لبه را
 بوجود می آورد. (با توجه به اثرات پوسته ای و نزدیکی). میزان و سرعت عملیات
 بستگی به ضخامت و جنس مواد مورد جوش و پارامترهای فرآیند دارد. به عنوان
 مثال با استفاده از یک منبع قدرت ۶۰ KW می توان درز لوله هایی با ضخامت ۰/۶
 میلیمتر را تا سرعت ۹۰ متر در دقیقه جوش داد.



شکل ۱-۱۳: جوشکاری مقاومتی فرکانس بالا

موادی که می توانند به طور موفقیت آمیزی جوشکاری فرکانس بالا شوند عبارتند از: فولادهای کربنی، فولادهای زنگ نزن، آلومینیوم، مس، برنج و تیتانیوم. موادی که قابلیت کار گرم پذیری ضعیفی دارند در دماهای جوشکاری ناپایدار هستند یا تضعیف برخی خواص آنها (در حین جوشکاری فرکانس بالا) در مراحل بعدی نمی تواند بازیابی شود، قابلیت جوشکاری کمتری با این فرآیند دارند.

مزایای جوشکاری فرکانس بالا عبارت است از:

- سرعت بالا و دارا بودن تنوع گسترده در اندازه و نوع مواد.
- کیفیت جوش در بسیاری موارد به حضور هوا بستگی ندارد و اتمسفرهای خاصی نیز برای جوشکاری مورد نیاز نیست (مگر برای فلزات فعال)
- کیفیت جوش نیز وابستگی کمی به اکسیدها و آلودگی های سطحی دارد.
- از معایب این فرآیند نیز می توان به موارد زیر اشاره کرد.
- برای جوشکاری با سرعت پایین و در تولید با حجم پایین مناسب نیست.

- این روش باید بصورت پیوسته انجام شود. در جوشکاری پیوسته نمی توان توقف / شروع مجدد داشته باشد، زیرا باعث ایجاد ناپیوستگی در جوش می شود.

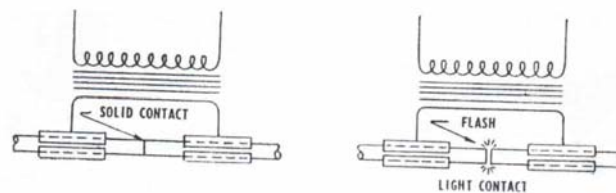
جوشکاری فرکانس بالا بیشتر در جاهای مناسب است که اتصال لبه هایی پیوسته یا سر به سر¹ فلزات مورد نظر باشد. بزرگترین استفاده از جوشکاری HF در ساخت تیوپ و لوله های درزدار است. این فرآیند برای ساخت انواع مشخصی از تیوپ های مبدلهای حرارتی² نیز مناسب است که از جنس هایی مختلف ساخته می شود. همچنین برای تولید اشکال ساختمانی مانند مقاطع T شکل، میله های H و I شکل می توان از این فرآیند استفاده کرد. واضح است که این فرآیند برای اتصالات طولانی نبش و سپری نیز بکار گرفته می شود.

¹ - Butt

² - Heat-Exchanger

۱-۶- جوشکاری جرقه ای^۱:

یک نوع فرآیند جوشکاری مقاومتی است که در آن یک اتصال سر به سر از طریق جرقه زدن و اعمال فشار ایجاد می شود. دو عامل ذوب شدن و فورج در این فرآیند بسیار حائز اهمیت هستند. این فرآیند قادر است اتصالی با استحکام برابر با فلزات پایه^۲ ایجاد نماید. شکل (۱-۱۴) فرآیند جوشکاری جرقه ای را بصورت شماتیک نمایش می دهد.



شکل ۱-۱۴: نحوه قرارگیری قطعات در جوشکاری جرقه ای (شکل سمت راست)

دو قطعه ای که باید به هم متصل شوند، توسط گیره ای هادی (مسی و گاه با سیستم سرد کننده) در مقابل هم نگه داشته می شوند. این گیره ها در حقیقت همان الکترودهای فرآیند هستند. سپس در قطعه آنقدر به هم نزدیک می شوند تا بین آنها جرقه ای ایجاد شود. پس از چند لحظه که مذاب بر سطح قطعات ایجاد شد، گیره ها با فشارمعینی به هم فشرده می شوند که نتیجه این عمل، در هم فرو رفتن قطعات است، در این لحظه جریان الکتریکی قطع و بدین ترتیب عمل اتصال انجام می گیرد.

جوشکاری جرقه ای برای اتصال قطعات فلزی که سطح مقطع مشابه ای دارند (چه از لحاظ شکل و چه از لحاظ اندازه) مناسب است. این فرآیند برای اتصال مواد هم جنس فولادی، آلومینیومی، برنجی و مسی مناسب است. در برخی موارد می توان موارد غیرمشابه را نیز با این روش به هم متصل ساخت. موادی با سطح

¹ - Flash Welding
² - Parent Metal

مقطع ۰/۱ تا ۲۰ اینچ مربع را می توان از این طریق جوشکاری کرد. کیفیت جوش حاصل در این روش به عوامل مختلفی وابسته است که مهمترین

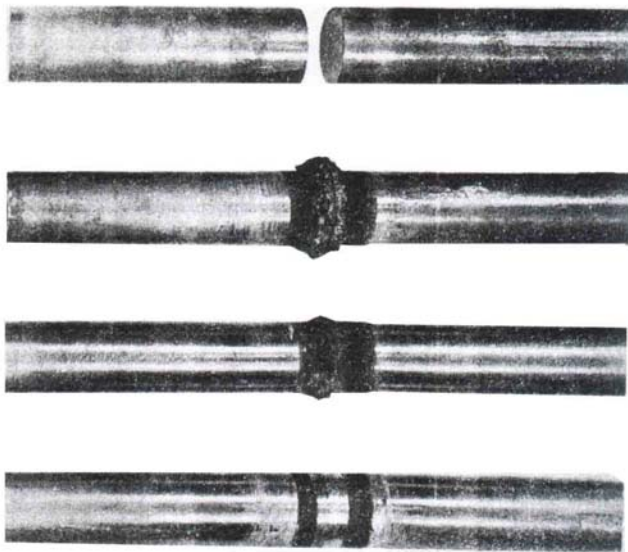
(۱) ترائس قطعات قبل از جوشکاری (۲) دقت ماشین آلات و فیکسچرهای جوشکاری

(۳) دقت در انتخاب نیروهای مناسب (۴) تراشکاری و دقت ابعادی مناسب

الکترودهای مورد استفاده (۵) تعادل (بالانس) حرارتی مناسب: برای مواقعی که سطح مقطع دو قطعه یا هدایت حرارتی و یا دمای ذوب آنها متفاوت باشد، بسیار حائز اهمیت است. ایجاد تعادل حرارتی در قطعات نیز به اتخاذ تدابیری خاص دارد که مهمترین آنها عبارتند از: ایجاد پخ های غیرمساوی در قطعات، استفاده از پل های مسی و استفاده از فواصل غیرمساوی قطعات هنگام قرار دادن بر روی دستگاه جوش. هدف نهایی از ایجاد تعادل حرارتی این است که نوک هر وسیله یا قطعه تقریباً بطور مساوی ذوب شود تا عمل اتصال کاملتر انجام گیرد. (۶) مقدار فشار.

در شکل (۱-۱۵) دو میله توپر که از طریق جوشکاری جرقه ای به هم متصل شده اند نمایش داده شده است. در این شکل دو میله قبل از جوشکاری، بعد از جوشکاری، بعد از ماشینکاری و حذف مواد جرقه و بعد از حذف مواد محل اتصال^۱ نمایش داده شده است.

^۱ - Upset



شکل ۱-۱۵: جوشکاری جرقه ای دو میله به هم، از بالا به پایین قبل از جوشکاری، بعد از

جوشکاری، بعد از حذف مواد جرقه و بعد از حذف مواد محل اتصال

جوشکاری جرقه ای نسبت به فرآیند جوشکاری سر به سر^۱، کاربرد بسیار وسیعتری دارد. در این فرآیند امکان اتصال انتها به انتهای ورقها و سایر مقاطع کشیده شده نیز وجود دارد. این فرآیند مزایای زیر را نسبت به روش جوشکاری سر به سر داراست:

(۱) استحکام جوش بالاتر (۲) عموماً نیازی به آماده سازی خاصی برای سطوح قبل از جوش نیست. (۳) نرخ تولید بالا (۴) مواد زائد محل اتصال خیلی کم است. (۵) تمرکز حرارتی بالاتر (۶) امکان اتصال فلزات غیر هم جنس وجود دارد. زیرا امکان برقرار نمودن جرقه تا زمانی که دو فلز به دمای ذوب شدن برسد وجود دارد. در حین حال جوشکاری سر به سر نیز مزایایی نسبت به این روش دارد که در قسمت بعد به آنها اشاره خواهد شد.

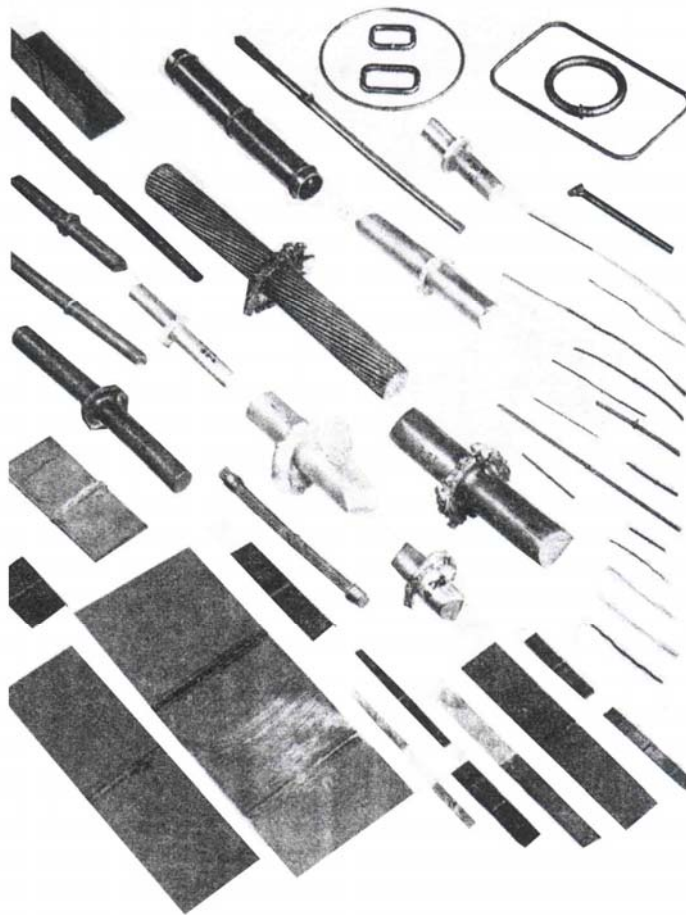
^۱ - Upset Welding

۱-۷- جوشکاری سر به سر:

جوشکاری سر به سر (UW) یک نوع فرآیند جوشکاری مقاومتی است که از حرارت و تغییر شکل^۱ برای تشکیل جوش استفاده می کند. حرارت ایجاد شده حاصل از مقاومت در برابر فلوی جریان الکتریکی در فصل مشترک سطوحی است که درون هم فرو رفته و قرار است به هم جوش شوند. به عبارت دیگر در این روش ابتدا نیروی جوشکاری به سطوح اعمال می شود تا در اثر آن تغییر فرم داده و مقداری در هم فرو بروند، سپس جریان الکتریکی بین دو قطعه برقرار می شود؛ که باعث ایجاد یک اتصال در حالت جامد می شود (به عبارت دیگر عموماً در محل اتصال ذوبی تشکیل نمی شود). اگر ذوبی در منطقه اتصال بوجود بیاید به علت نیروی اعمالی به بیرون پرتاب می شود. دامنه وسیعی از اشکال و مواد مختلف را می توان با استفاده از این فرآیند جوشکاری نمود که برخی از آنها در شکل (۱-۱۶) نمایش داده شده اند. در این روش می توان از جریانهای تک پالس یا پیوسته برای جوشکاری استفاده نمود. مزایای این فرآیند عبارتند از:

- سرعت: این فرآیند معمولاً کمتر از یک ثانیه طول می کشد.
- سادگی کنترل: فرآیند فقط سه متغیر عمده دارد (جریان، نیرو و زمان)
- عیوب کمتر: عیوب جوشکاری ذوبی مانند تخلخل، ذوب ناقص، پاشش و ترک خوردگی در این روش مشاهده نمی شود.
- خواص جوش مناسب: خواص متالورژیکی منطقه جوش و منطقه متأثر از حرارت، در این روش مناسب تر از فرآیند های ذوب است. به عنوان مثال استحکام منطقه جوش مانند روشهای ذوبی کاهش نمی یابد. (به مقادیر آنیل شده نمی رسد)

¹ - Deformation



شکل ۱-۱۶: محصولات و اشکال متصل شده در جوشکاری سر به سر

- سادگی تجهیزات: تجهیزت این روش پیچیدگی خاصی نداشته و نیازمند هزینه های نگهداری بالایی نیست.
- برخی از مشکلات مربوط به حضور عناصر آلیاژی در منطقه جوش که در فرآیندهای ذوبی وجود دارد در اینجا مشاهده نمی شود.
- امکان انتقال موادی که از نظر جوشکاری مشکلاتی دارند. آلیاژهایی که به طور معمول غیرقابل جوشکاری هستند را می توان با این فرآیند جوشکاری کرد. مثلا انواع مختلفی از فولادهای زنگ نزن A-286، سوپر آلیاژها (شامل نیکل TD)، مواد دیرگداز (مثل تنگستن)، تیتانیوم (گرید ۲) و آلیاژهای آلومینیوم (گروه ۲۰۲۴) را می توان جوشکاری سر به سر کرد.

- اثرات شرایط جوشکاری (به جزء پارامترهای اصلی نیرو، جریان و فشار) عموماً خیلی محدود است.

محدودیت عمده این روش نیز آن است که یک روش آزمایش غیرمخرب مناسب برای تشخیص کیفیت اتصال اصلی موجود نمی باشد. مزایای خاص این روش نسبت به جوشکاری جرقه ای که آن را در برخی کاربردها مرجع می سازد، عبارت است از: ۱- پاشش جوشکاری جرقه ای را ندارد. ۲- بیرون آمدن مواد اضافه از منطقه جوش در این روش محدودتر است. ۳- در جوشکاری سر به سر معمولاً جوشی هموارتر و متقارن تر حاصل می شود.

دامنه وسیعی از مواد به شکل های متنوع (سیم، لوله، نوار و تیوپ) را می توان جوشکاری سر به سر نمود. این مواد شامل آلیاژهای آلومینیوم، مس، برنج، طلا، آلیاژهای نیکل، آلیاژهای مقاوم فولادهای کم کربن و پرکربن و فولادهای زنگ نزن هستند. محدوده قطر سیم ها و میله هایی که می توان جوشکاری سر به سر نمود از ۰/۰۰۵ تا ۱/۲۵ اینچ می باشد.

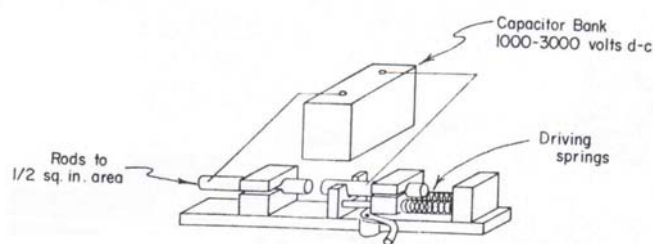
وسیعترین استفاده از این فرآیند در عملیات کشش سیم است گفته می شود که عملیات کشش سیم بصورت پیوسته بدون جوشکاری سر به سر غیر ممکن می باشد.

۸-۱- جوشکاری ضربتی^۱:

یک نوع فرآیند جوش مقاومتی است که در آن از طریق تخلیه سریع الکتریکی بین اجزاء قوسی ایجاد می شود که حرارت مورد نیاز فرآیند را تامین میکند. بلافاصله پس از تخلیه الکتریکی نیز فشاری ضربتی به اجزاء اعمال می گردد تا اتصال شکل گیرد. در این فرآیند از تجهیزات متنوعی برای ذخیره انرژی الکتریکی (معمولاً یکسری خازن ولتاژ بالا یا پایین)، ایجاد قوس و اعمال نیروی

¹ - Percussion Welding

ضربتی (معمولاً سیستم های پنوماتیکی) استفاده می شود. نمایی از یک دستگاه جوشکاری ضربتی ولتاژ بالا در شکل (۱-۱۷) نمایش داده شده است.



شکل ۱-۱۷: شماتیکی از دستگاه جوشکاری ضربتی ولتاژ بالا

به دلیل زمان خیلی کوتاه جوشکاری منطقه HAZ این روش خیلی کوچک است (معمولاً کمتر از ۰/۰۱ اینچ). تمرکز حرارتی فوق العاده بالای این روش نیز باعث محدود شدن اکسیداسیون اجزاء شده و آن را برای استفاده در موادی که عملیات حرارتی شده اند، مناسب می سازد. این فرآیند برای اتصال سیم به سیم یا میله و سیم به قطعات مسطح نیز بکار می رود. موادی که قابلیت جوشکاری با این روش را دارند عبارتند از: مس، برنج، نیکل، نقره، فولاد، آلومینیم، مواد دیرگداز و فعال که می توانند به هم یا به فلزات دیگر جوش داده شوند. در مورد بعضی از فلزات نظیر آلومینیم و مس که مقاومت الکتریکی کمی دارند و دارای هدایت حرارتی زیادی نیز هستند؛ جوشکاری مقاومتی با روشهای معمولی مشکل است. در مورد این مواد باید جوشکاری مقاومتی با شدت جریان بالا و زمان کوتاه صورت گیرد. لذا روش جوشکاری ضربتی برای این نوع مواد بسیار مناسب است. استفاده از این روش در صنایع مختلف با سرعت زیادی در حال گسترش است. مهمترین استفاده از این روش در صنعت الکترونیک و برای اتصال هادی^۱ های اکسید کادمیوم -

^۱ - Contacts

نقره به صفحات برنجی یا مسی است. همچنین این روش در صنعت هوافضا نیز کاربردهایی دارد.

محدودیت عمده این فرآیند در نوع اتصال آن است. در این روش اتصالات لب به لب - میله به میله، میله به سطح و با اتخاذ تمهیدات و طراحی خاص سطح به سطح میسر است. همچنین از آنجا که کنترل دقیق مسیر قوس مشکل است، مجموع مساحتی که می توان در یک زمان جوشکاری نمود نمی تواند فراتر از ۰/۵ اینچ مربع باشد. محدودیت دیگر فرآیند این است که قطعاتی که باید جوشکاری شوند بایستی جدا از هم باشند ضمن اینکه از نظر اقتصادی نیز فوق العاده پرهزینه می باشد.

۹-۱- لحیم کاری سخت و نرم مقاومتی:

لحیم کاری به فرآیندی گفته می شود که اتصال قطعات با کمک حرارت دان آنها تا درجه حرارت معین و ذوب فلز پر کننده ای^۱ که در فصل مشترک دو قطعه قرار دارد، صورت می گیرد. فلز پر کننده که بر اثر حرارت ذوب شده بر اساس خاصیت موئینگی^۲ فصل مشترک قطعات را خیس کرده و پس از انجماد باعث اتصال دو سطح به هم می شود. در این فرآیند سطوح اتصال ذوب نمی شوند و صرفاً فلز پر کننده به نقطه ذوب می رسد. در لحیم کاری سخت^۳ فلز پر کننده دارای دمای ذوبی بالاتر از ۴۵۰ درجه سانتیگراد است ولی در لحیم کاری نرم^۴ از مواد پر کننده با نقطه ذوبی کمتر از ۴۵۰ درجه سانتیگراد استفاده می شود. در هر حال در لحیم کاری فلز پر کننده باید دمای ذوبی کمتر از فلزات پایه داشته باشد.

^۱ - Filler Metal

^۲ - Capillary Action

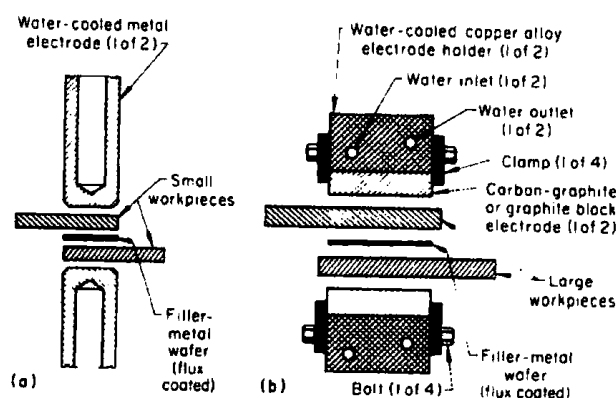
^۳ - Brazing

^۴ - Soldering

لحیم کاری سخت مقاومتی^۱ (RB) یک فرآیند اتصال مقاومتی است که در آن قطعه کار بصورت موضعی حرارت داده شده و فلز پر کننده ای که بین آن قرار دارد از طریق حرارت تولید شده ناشی از مقاومت در برابر فلوی جریان الکتریکی ذوب می شود. اصول فرآیند و تجهیزات مورد استفاده شبیه به فرآیند جوشکاری مقاومتی می باشد. با این تفاوت که در این فرآیند قطعه کار ذوب نمی شوند. بلکه ذوب شدن فلز پر کننده و انجماد مجدد آن باعث ایجاد اتصال می شود.

در شکل (۱۸-۱) شمائی از فرآیند لحیم کاری سخت مقاومتی نشان داده

شده است.



شکل ۱۸-۱: لحیم کاری سخت مقاومتی: (a) برای قطعات کوچک یا قسمتهای کوچکی از قطعات بزرگ. (b) برای

قطعات مسطح بزرگ به خصوص برای فلزاتی با هدایت الکتریکی بالا

در شکل (a) (۱۸-۱) الکترودهای مورد استفاده از نوع الکترودهای

جوشکاری مقاومتی است که با آب خنک می شود.

در شکل (b) (۱۸-۱) از الکترودهای کربنی استفاده شده که به گیره های^۲

الکترودی از جنس آلیاژ مس متصل می باشند. فرآیند لحیم کاری سخت مقاومتی

برای اتصال قطعات کوچک، اتصال کوچک تجهیزات بزرگ و برای تولید با حجم

پایین مناسب است. سطح اتصالی که با این فرآیند ایجاد می شود نمی تواند از

1300 mm^2 فراتر برود. از انواع الکترودهایی که در جوشکاری مقاومتی استفاده

¹- Resistance Brazing

²- Holder

می شود یا الکترودهای کربنی یا گرافیتی می توان در این فرآیند استفاده کرد. در انتخاب فلز پر کننده نیز بایستی دقت شود که باید کمترین نقطه ذوب را دارا باشد. از انواع فلز پر کننده پایه نقره ای (نوع Bag)، آلومینیم - سیلیسیم و مس - فسفر در این فرآیند می توان استفاده کرد.

لحیم کاری نرم مقاومتی^۱ (RS) نیز فرآیندی مشابه لحیم کاری سخت مقاومتی است. از این فرآیند در اتصال قطعات کوچک به هم و اتصال اجزاء نزدیک به هم در یک مجموعه استفاده می شود. و با اعمال حرارت، گرم شدن موضعی باعث ذوب لحیم نرم می باشد. این مذاب سطوح را خیس می کند و سپس با انتقال حرارت به مناطق مجاور، لحیم به سرعت منجمد می شود. فرآیند لحیم کاری نرم برای اتصال فلزات آهنی و غیرآهنی قابل استفاده است. ولی محدودیت ضخامت و نوع طراحی قطعات در این فرآیند وجود دارد. گفته می شود ماکزیم ضخامت قابل لحیم کاری ۳/۲ میلیمتر می باشد. الکترودهای قابل استفاده در این فرآیند عبارتند از: کربنی، گرافیتی و تنگستنی. توصیه شده که در این روش از لحیم های سیمی شکل و فلاکس استفاده نشود.

^۱ - Resistance Soldering