۱– اصول کلی جوشکاری مقاومتی

۱–۱– تعریف فرآیند جوشکاری مقاومتی

در روش‌های جوشکاری مقاومتی، اتصال دو سطح توسط حرارت و فشار توأماً انجام می‌گیرد. فلزات به دلیل مقاومت الکتریکی در اثر عبور جریان الکتریکی گرم شده و حتی به حالت ذوب نیز می‌رسند که طبق قانون ژول، حرارت حاصل با رابطه زیر تعیین می‌شود[۴, ۵]:

$$Q=KRI^{2}t$$

که در آن :

I : شدت جریان (آمپر) R : مقاومت (اهم) t : زمان (ثانیه) و Q : حرارت (ژول) K : ضریب ثابت معادل ۱ .

به عبارت دیگر در فرآیندهای قوس الکتریکی، حرارت بر روی کار به‌وسیله هدایت و تشعشع توزیع می‌شود اما در فرآیندهای جوشکاری مقاومتی، حرارت در عرض داخلی و سطح مشترک دو ورق در موضع اتصال در اثر عبور جریان الکتریکی تولید و منتشر می‌شود. جریان الکتریکی مذکور از طریق الکترود ها و تماس آن‌ها به سطح کار منتقل و یا از طریق ایجاد حوزه مغناطیسی احاطه شده در اطراف کار به قطعه القاء می‌شود. هر چند هر دو روش بر اساس حرارت مقاومتی پایه‌گذاری شده اند ، اما معمولا نوع اول به فرآیند جوشکاری مقاومتی و نوع دوم به فرآیند جوشکاری القائی مرسوم شده است.

فاکتورهای شدت جریان و زمان از طریق دستگاه جوش قابل کنترل هستند، اما مقاومت الکتریکی به عوامل مختلف از جمله:

- جنس و ضخامت قطعه کار
- فشار بین الکترودها
- اندازه، شکل و جنس الکترودها
- چگونگی سطح کار یعنی صافی و تمیزی آن

بستگی دارد.

انواع مختلف روش‌های جوشکاری مقاومتی، به روش ایجاد مقاومت موضعی بالا و تمرکز حرارت در نقطه مورد نظر ارتباط دارد، ولی به هر حال تماس فیزیکی بین الکترودهای ناقل جریان الکتریکی و قسمت‌هایی که باید متصل شوند نیز مورد نیاز است.

۱-۲- انواع فرآیندهای جوشکاری مقاومتی

مطابق شکل ۱ انواع فرآیندهای جوشکاری مقاومتی به شرح زیر می‌باشند[۱]:

۱) جوشکاری نقطه‌ای[۱]

۲) جوشکاری سر به سر[۲]

۳) جوشکاری نواری یا درزی[۳]

۴) جوش‌کاری پیش طرحی یا زائده ای[۴]

۱- Spot Welding

۲- Butt Welding

۳- Seam Welding

۴- Projection Welding

۱–۳– متغیرهای جوشکاری مقاومتی

متغیرهای جوشکاری مقاومتی عبارتند از[۴]:

۱- جریان

۲- زمان جوشکاری

۳- نیروی فشاری الکترودها بر قطعه‌های کار

۴- خصوصیات دستگاه جوشکاری

۵- نوع و شرایط دستگاه

۶- شرایط الکترودها و بازوها

۷- شرایط سطحی مواد .

۱–۴– مزایای جوشکاری مقاومتی

مزایای جوشکاری مقاومتی عبارتند از :

۱- نرخ سریع تولید

۲- عدم نیاز به فلز پرکننده

۳- تجهیزات نیمه اتوماتیک

۴- امکان انجام عملیات جوشکاری با اپراتورهای نیمه ماهر

۵- جوشکاری فلزات متشابه و غیر متشابه

۶- کیفیت بالای جوش

۷- اعوجاج کمتر قطعات جوشکاری شده.

۱–۵–معایب جوشکاری مقاومتی

معایب جوشکاری مقاومتی عبارتند از :

۱- هزینه بالای تجهیزات

۲- کنترل و نگهداری تجهیزات توسط افراد ماهر

۳- آماده سازی سطحی ویژه در بعضی موارد

۴- عدم امکان جوشکاری مقاطع با ضخامت های بالا

۱ –۶–کاربردهای جوشکاری مقاومتی

جوشکاری مقاومتی در موارد زیر استفاده می‌شود[۴]:

۱- اتصال میله‌ها، لوله‌ها، ورق‌ها، تیوپ‌ها

۲- ساخت تیوپ‌ها و ابزار آلات فلزی

۳- جوشکاری قسمت‌های مختلف هواپیماها و اتومبیل‌ها

۴- ساخت ابزار برش

۵- ساخت باک سوخت اتومبیل‌ها و بارکش‌ها

۶- ساخت کانتینرها و سیم‌ها.

با توجه به نکات فوق می‌توان[۴و۵]:

الف: فولادهای معمولی را بدون مشکل خاصی جوش مقاومتی داد.

۱–۷– اصول جوشکاری مقاومتی

دو عامل اصلی و تعیین کننده در جوشکاری مقاومتی عبارتند از[۴]:

۱. تولید گرما در نقطه‌ای که دو قطعه به هم متصل می‌شوند.

۲. به کار بردن فشار در محلی که اتصال جوش شکل می‌گیرد.

۱–۷–۱– گرما

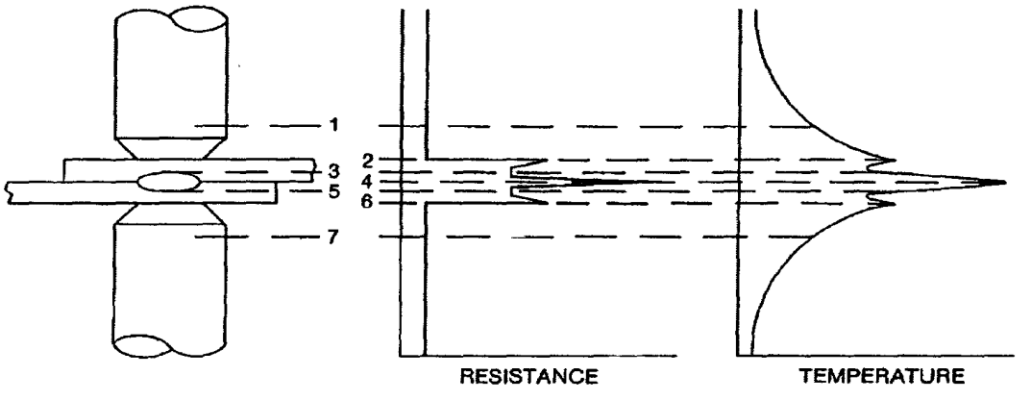
گرما (H) در جوشکاری مقاومتی در نتیجه عبور کردن یک جریان الکتریکی زیاد(۳-۱۰۰ KA) و ولتاژ (۱-۲۵Volt)، از میان دو قطعه که با هم در تماس هستند، مطابق فرمول $H\alpha RI^{2}t$ ایجاد می‌شود (شکل ۲ تغییرات درجه حرارت و مقاومت را در قسمت‌های مختلف یک جوش مقاومتی نشان می دهد). در فرمول بالا :

H: گرمای تولید شده برحسب ژول

t: مدت زمان کسری(از ثانیه تا چند ثانیه) عبور جریان از قطعات

I: جریان

R: مقاومت برحسب اهم



شکل ۲ : تغیرات درجه حرارت و مقاومت در موقعیت های مختلف جوش مقاومتی[۲]

۱–۷–۲– جریان

در جوشکاری مقاومتی جریان جوشکاری کافی جهت گرم کردن قطعات و رسیدن به حالت پلاستیک لازم است. معمولا جریان از یک ترانسفورماتور Step-down به دست می‌آید. از آن جایی‌که دانستیه جریان افزایش می‌یابد، زمان جوشکاری می‌تواند به طور موثری، بدون اینکه سطوح تماس الکترود از بیش گرم شوند، کاهش یابد. هنگامی که جریان جوشکاری افزایش می‌یابد، در مهره جوش نیروی شکست اتصال جوشکاری شده افزایش می‌یابد.

۱–۷–۳– مقاومت (R)

مقاومت کلی سیستم بین الکترودها متشکل است از:

۱- مقاومت قطعه کار ($R_۱$)

۲- مقاومت اتصال بین الکترودها و قطعه کار ($R_۲$)

۳- مقاومت بین سطوح دو قطعه فلز که باید به هم جوشکاری شوند ($R_۳$)

به منظور رسیدن به یک جوش مناسب و جلوگیری از فوق گرمایش الکترودهای جوشکاری، $R_۲$ ،$R_۱$، باید تا حد ممکن پایین باشند.

$R_۱$ بستگی به طبیعت ذاتی ماده و ضخامت آن دارد؛ به‌عبارت دیگر غیر قابل تغییر است. اگر ماده مقاومت الکتریکی پایینی داشته باشد، مانند آلومینیم ، می‌توان از جریان بالایی جهت ایجاد جوش و درجه حرارت مناسب برای جوشکاری استفاده کرد.

$R_۲$ مقاومت تماس بین الکترود و قطعه کار است که در حالات زیر می‌تواند حداقل باشد:

الف: تمیز نگهداشتن نوک یا سطح الکترود و سطح قطعه کار

ب: استفاده از الکترودهای جوشکاری با مواد با هدایت بالا، مانند آلیاژهای Cu-Cd یا Cu-Cr

ج: کنترل شکل و اندازه سطح الکترودها

د: استفاده از فشار مناسب بین الکترودها و قطعه کار

$R_۳$ مقاومت بین سطوح اتصال دو قطعه که با کیفیت سطح تغییر می‌کند. سطوحی که تمیز نشده‌اند و دارای آلودگی هستند، مقاومت زیادی را در برابر عبور جریان ایجاد می‌کنند. سطوح صاف و براق و فشار الکترود بالا، مقاومت $R_۳$ را کاهش می‌دهند. از گرم شدن بیش از حد الکترودها با استفاده از سیستم آبگرد می‌توان جلوگیری کرد.

۱–۷–۴– زمان (t)

چهار دوره زمانی در دستگاه جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی در طی سیکل جوشکاری عبارتند از:

۱- مدت زمان برقراری فشار

۲- زمان جوشکاری

۳- زمان نگهداری

۴- زمان خاموشی

۱- مدت زمان برقراری فشار: فاصله زمانی بین ایجاد فشار اولیه الکترود روی قطعه کار و ایجاد جریان اولیه جهت جوشکاری.

در طی این دوره زمانی الکترود بالایی در تماس با قطعه کار قرار می‌گیرد و نیروی فشاری الکترود اعمال می‌شود. در پایان این زمان، جریان جوشکاری برقرار می‌گردد.

۲- زمان جوشکاری: در طی این دوره زمانی، جریان جوشکاری در مدار برقرار می شود. جریان از الکترود عبور کرده، وارد دو قطعه کار می‌شود و از آن عبور کرده و در نهایت از الکترود دوم خارج می‌گردد.

۳- زمان نگهداری: زمانی است که نیرو به محل جوشکاری بعد از قطع جریان همچنان اعمال می‌شود.

۴- زمان خاموشی: فاصله زمانی از خاتمه زمان نگهداری تا شروع دوره زمانی برای سیکل بعدی جوشکاری است.

در دستگاه‌های جوشکاری اتوماتیک تمامی این دوره‌های زمانی به‌صورت خود کار کنترل می‌شود در حالی که در دستگاه‌های غیر اتوماتیک تنها زمان جوشکاری به صورت اتوماتیک کنترل می‌شود و دوره‌های زمانی دیگر به‌وسیله اپرتور تنظیم می‌گردد. زمان جوشکاری به‌وسیله استفاده از یک زمان‌سنج الکترونیکی مناسب کنترل می‌شود.

۱–۸– الکترودها

الکترودهای جوشکاری مقاومتی به صورت الکترودهای قابل مصرف شبیه آن‌چه در الکترودهای جوش‌های قوس دستی است، نمی‌باشند. وظیفه الکترودهای جوشکاری مقاومتی هدایت کردن نیروی

مواد الکترود جوشکاری مقاومتی توسط RWMA طبقه‌بندی شده‌اند.این مواد در سه دسته قرار می‌گیرند[۲]:

A- آلیاژهای پایه مس

B- ترکیبات نسوز فلزی

C- مواد خاص

جدول ۱ حداقل خواص آلیاژهای پایه مس را برای رسیدن به حدود لازمه RWMA نشان می‌دهد. ترکیبات مشخص آلیاژی داده نشده زیرا در بین تولید کنندگان مختلف متفاوت است.

- **گروه A: آلیاژهای پایه مس**

آلیاژهای پایه مس به ۵ دسته مختلف تقسیم می‌شوند:

دسته (۱) : این دسته از آلیاژها قابلیت جوشکاری‌های مقاومتی دارند و می‌توان از آن‌ها در جوشکاری نقطه ای و درزی برای ساخت الکترود استفاده کرد زیرا در این کاربردها هدایت الکتریکی و حرارتی مهمتر از خواص مکانیکی است. کاربردهای دیگر آن در محور دستگاه‌های جوش درزی و نگهدارنده‌های جوشکاری می‌باشد. این دسته آلیاژها برای الکترود جوش درزی و نقطه‌ای فلزات آلومینیم، برنج، برنز، منیزیم و فولاد پوشش دار به‌کار می‌روند زیرا این آلیاژها هدایت الکتریکی و حرارتی بالایی دارند[۲].

این آلیاژها قابل عملیات حرارتی نمی‌باشند و سختی و استحکام آن‌ها با کار سرد افزایش می‌یابد. در نتیجه مزیتی بر مس خالص ریخته‌گری ندارند و به ندرت به این صورت به‌کار می‌روند.

دسته (۲): آلیاژهای این دسته خواص مکانیکی بهتری دارند ولی هدایت الکتریکی و حرارتی آن‌ها کمتر از آلیاژهای دسته(۱) است. آلیاژهای این دسته مقاومت خوبی به تغییر شکل تحت فشارهای متوسط دارند و بهترین آلیاژ برای مصارف عمومی هستند. این دسته آلیاژ مناسب تولید انبوه جوش‌های نقطه‌ای و درزی در مورد فولادهای کم کربن، فولاد زنگ‌نزن، آلیاژهای پایه مس با هدایت کم و آلیاژهای نیکل هستند. آلیاژهای این دسته همچنین برای ساخت محور، گیره نگهدارنده، بازوی تفنگ و دیگر اجزاء ساختاری حامل جریان در جوشکاری مقاومتی مناسب می‌باشند. آلیاژهای این دسته قابل عملیات حرارتی می‌باشند و می‌توان از آن‌ها بصورت کارپذیر و ریختگی استفاده کرد. حداکثر خواص مکانیکی در حالت کارپذیر و با کار سرد بعد از عملیات حرارتی به‌دست می‌آید[۲].

دسته (۳): این آلیاژها نیز قابل عملیات حرارتی می‌باشند اما استحکام مکانیکی بالاتر و هدایت الکتریکی کمتری دارند. کاربرد اصلی آن‌ها در الکترودهای جوشکاری نقطه‌ای و درزی برای جوشکاری آلیاژهای مقاوم به حرارت است که استحکام مکانیکی آن‌ها در دماهای بالا حفظ می‌شود. جوشکاری این نوع آلیاژها نیازمند نیروی فشاری زیاد به الکترود است که در نتیجه این آلیاژها نیز باید استحکام کافی داشته باشند. آلیاژهای مقاوم حرارتی شامل فولادهای کم آلیاژ، زنگ نزن و آلیاژهای نیکل- کروم- آهن هستند. این آلیاژها به‌خصوص برای گیره‌های الکترود و اجزاء ساختاری حامل جریان در دستگاه‌های جوش مقاومتی مناسب می‌باشند. خواص آن‌ها در شرایط کارپذیر و ریختگی مشابه است زیرا بیشتر خواص مکانیکی خود را از عملیات حرارتی می‌گیرند.

دسته (۴) : آلیاژهای این دسته آلیاژهای پیر سخت شونده می‌باشند که بیشترین سختی و استحکام را در گروه A یعنی گروه آلیاژهای مس دارند. هدایت الکتریکی و حرارتی کم آن‌ها باعث می‌شود برای ساخت الکترودهای نقطه‌ای و درزی مناسب نباشند. این آلیاژها معمولا برای اجزایی توصیه می‌شوند که سطح تماس نسبتا زیادی با قطعه دارند. این آلیاژها کاربردهای دیگری مانند دستگاه‌های پشتیبانی، و دیگر اجزاء دستگاه‌ها که مقاومت به فرسایش و فشار زیاد در آن‌ها مهم است، نیز دارند. این آلیاژها به صورت کارپذیر و ریختگی وجود دارند. به خاطر سختی بالا بعد از عملیات حرارتی، معمولا در شرایط محلول و آنیل شده ماشینکاری می‌شوند[۲].

دسته(۵) : آلیاژهای این دسته به‌صورت ریختگی و با استحکام مکانیکی بالا و هدایت الکتریکی متوسط وجود دارند. این آلیاژها بیشتر برای الکترودهای جرقه‌ای ، مواد پشتیبان برای دیگر آلیاژهای مورد استفاده برای ساخت الکترود و انواع متعددی از اجزاء ساختاری حامل جریان در دستگاه‌های جوش مقاومتی به کار می‌روند[۲].

- **گروه B: ترکیبات نسوز فلزی**

این مواد حاوی یک فلز نسوز به صورت پودر می‌باشند. این فلز معمولا مولیبدن یا تنگستن است. این پودرها از طریق فرآیندهای متالورژی پودر به دست می‌آیند و خاصیت اصلی آن‌ها مقاومت به تغییر شکل حین کار است. وقتی دو الکترود مختلف برای جبران تفاوت ضخامت یا ترکیب آلیاژهای جوش داده شده مورد نیاز است، این مواد بالانس حرارتی ایجاد می‌کنند.

ترکیبات دسته ۱۰، ۱۱ و ۱۲ ترکیبی از مس و تنگستن هستند. افزایش تنگستن، سختی، استحکام و دانسیته را افزایش داده و هدایت الکتریکی را کم می‌کند. تعیین روش به کارگیری هر نوع مشکل است. طراحی الکترود، تجهیزات جوشکاری، جنس الکترود دیگر، و ترکیب قطعه و موقعیت آن، متغیرهایی هستند که در هر مورد باید به آن توجه شود (جدول ۲)[۲].

دسته ۱۳ و ۱۴ به ترتیب تنگستن و مولیبدن خالص تجاری هستند. این مواد تنها مواد سازنده الکترود می‌باشند که در جوشکاری فلزات غیرآهنی که هدایت الکتریکی بالایی دارند عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهند.

جوشکاری سیم یا سیم‌های مس و برنج به هم یا انواع مختلف پایانه‌ها[۱] کاربردهای متداول مواد دسته ۱۳ و ۱۴ می‌باشند[۲].

- **گروه C: دیگر مواد**

تعدادی از آلیاژهای مس و دیگر مواد به‌صورت طبقه‌بندی نشده مناسب برای ساخت الکترود جوشکاری مقاومتی می‌باشند. مناسب بودن هر ماده برای الکترود، به کاربرد آن بستگی دارد. با وجودی که موادی که تحت استاندارد RWMA هستند هر یک اکثر خصوصیات لازم را دارا می‌باشند، در مواردی، از مواد دیگر به‌طور مشابه یا بهتر عمل می‌کنند. به عنوان مثال می‌توان از فولاد برای ساخت الکترود جوش جرقه‌ای در کاربردهای خاصی برای آلومینیم استفاده کرد[۲].

مس استحکام یافته ماده طبقه‌بندی نشده‌ای است که می‌تواند در ساخت الکترود به کار رود. این مس با خواص استحکام یافته بالا حاوی مقادیر بسیار کمی اکسید آلومینیم در ابعاد بسیار کوچک است که به‌طور یکنواخت در زمینه پخش شده اند. اکسید آلومینیم استحکام مس را تا حد قابل توجهی افزایش می‌دهد و دمای تبلور مجدد فلز کار سرد شده را افزایش می‌دهد. دمای تبلور مجدد بالا در مواد کارپذیر، موجب مقاومت عالی به نرم شدن و قارچی شدن الکترود در تماس با سطوح داغ می‌شود و در نتیجه عمر الکترود تا حد قابل توجهی افزایش می‌یابد[۲].

۱- Terminals

۱-۸-۳- الکترود و نگه‌دارنده‌ها

ابزارهای غیردائمی به‌کار رفته در جوشکاری مقاومتی عبارتند از الکترودها که می‌توانند به‌صورت چرخ، رل، میله، صفحه، گیره یا ترکیبی از این موارد باشد. در بیشتر کاربردهای جوشکاری نقطه‌ای، از نگه‌دارنده الکترود برای نصب الکترود به دستگاه استفاده می‌شود.

الکترود جوشکاری، مسئول انجام یک یا چند مورد از کاربردهای زیر است[۲]:

- هدایت جریان جوشکاری به قطعات
- انتقال نیروی فشاری به محل اتصال
- نگه داشتن، تعیین محل قطعات در جهت مناسب
- زدودن حرارت از جوش یا قطعات هم‌جوار

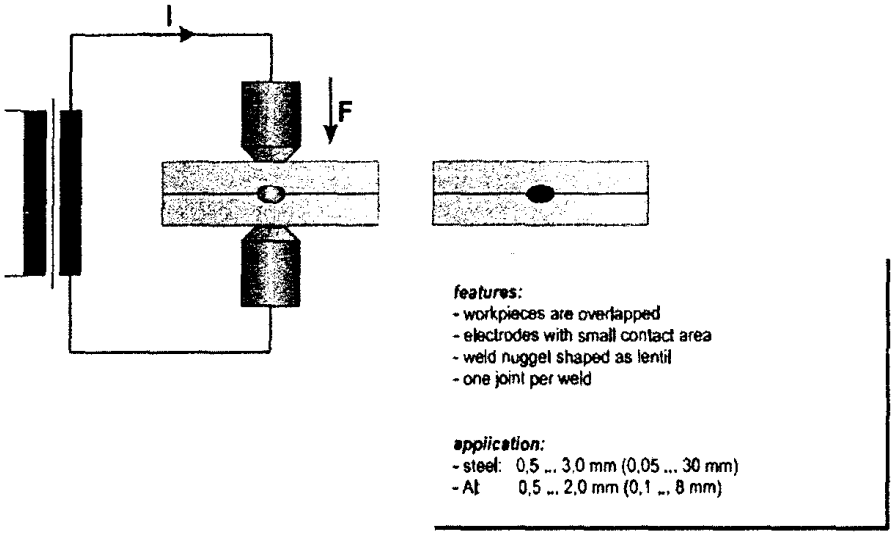
در طراحی الکترود همواره باید جرم کافی برای انتقال نیروی جوش و جریان و سرد شدن مناسب در صورت لزوم، در نظر گرفته شود. در کاربردهای تولیدی گاهی مقاطع ضخیمی وجود دارد که نیازمند طراحی الکترودهای خاصی است. تغییر طرح در صورت لزوم بر عمر الکترود، کیفیت جوش، نرخ تولید یا هر سه اثر می‌گذارد. در نتیجه انتخاب ماده الکترود برای عملکرد خوب، بسیار مهم است[۲].

قطعه کار و موضع جوش هدایت می‌شود که معمولا الکترود پایین ثابت و الکترود بالایی متحرک است. الکترودها همانند گیره یا فک‌ها دو قطعه را در وضعیت لازم نگه‌داشته و جریان الکتریکی برای یک لحظه معین، از فصل مشترک دو قطعه عبور می‌کند که عامل ایجاد حرارت موضعی در سطح مشترک دو ورق می‌شود. جریان الکتریکی در سطح تماس باعث ذوب منطقه کوچکی از دو سطح شده و پس از قطع جریان و ادامه اعمال فشار معین و در نهایت انجماد، دو قطعه به یکدیگر متصل می‌شوند[۵].

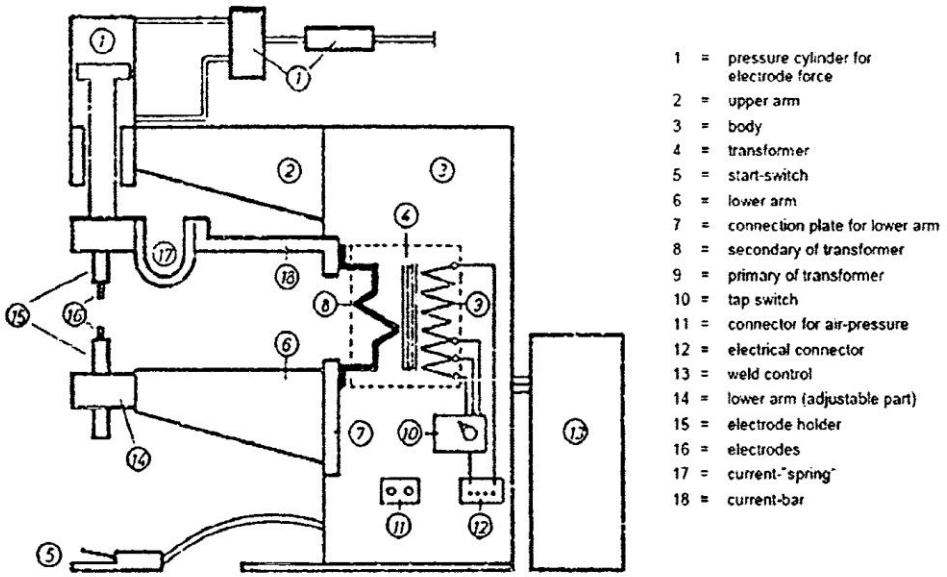
یک فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای متشکل از پارامترهای زیر است[۱] :

۱. زمان فشار	tv (cyc)
۲. زمان جوش	ts (cyc)
۳. زمان نگهداری	tn (cyc)
۴. جریان جوشکاری	Is (KA)
۵. نیروی فشاری الکترود	FE (N)

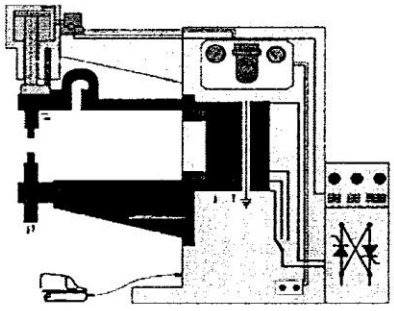
شکل ۸ متغیرهای جوشکاری مقاومتی نقطه ای را نشان می دهد.



شکل ۷ : جوشکاری مقاومتی نقطه ای[۱]



شکل ۹ : اجزای مختلف یک دستگاه جوشکاری مقاومتی[۱]



شکل ۱۰ : دستگاه جوشکاری مقاومتی نقطه ای[۱]

۲-۲- مقاومت‌ها در مدار جوشکاری

در ناحیه نقطه جوش به طور عمده دو نوع مقاومت وجود دارد: مقاومت‌های ناشی از جنس ماده و مقاومت‌های سطحی، که این مقاومت ها به قرار زیر هستند[۱] :

۱- مقاومت در بالا و پایین الکترود (مواد)

۲- مقاومت در بالا و پایین ورق (مواد)

۳- اتصال بالا و پایین الکترود به ورق (سطح)

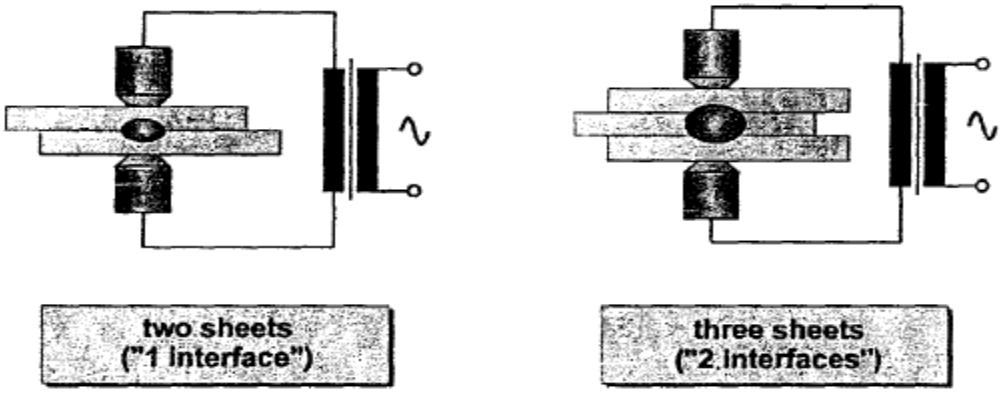
۴- اتصال بین ورق‌ها (سطح)

۲–۷– انواع جوش‌های نقطه‌ای

۲–۷–۱– جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مستقیم (فرآیند دو طرفه)

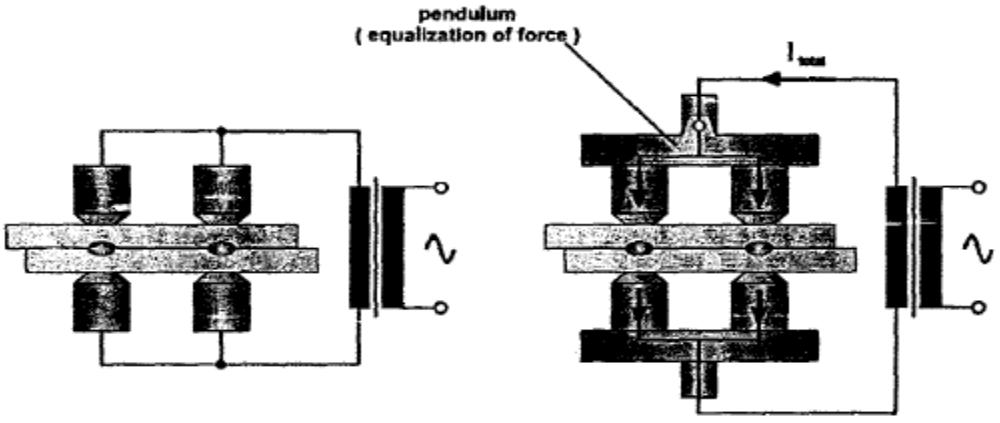
فرآیند جوشکاری نقطه‌ای معمولی با استفاده از یک جفت(شکل ۱۷) یا تعداد بیشتری الکترودها(شکل ۱۸) در جهت‌های مخالف قطعه کار انجام می‌شود. در این مورد، جریان می‌تواند طور مستقیم از وسط دگمه جوش عبور کند. در یک فرآیند جوش مقاومتی بهینه تقریبا اثر ش وجود ندارد (شکل های ۱۷ . ۱۸)

بیشتر دستگاه‌های استاندارد برای این منظور ساخته می‌شوند[۱]:



شکل ۱۷ : جوشکاری مستقیم یک یا چند ورق در یک زمان[۱]

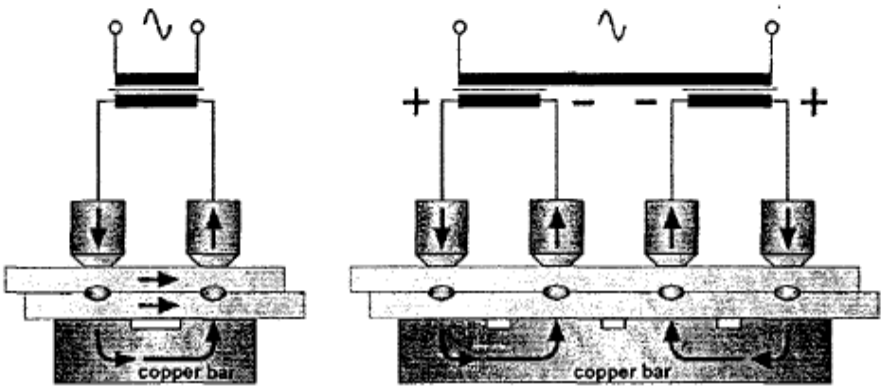
شکل ۱۸ جوشکاری موازی چندنقطه ای را نشان می دهد.



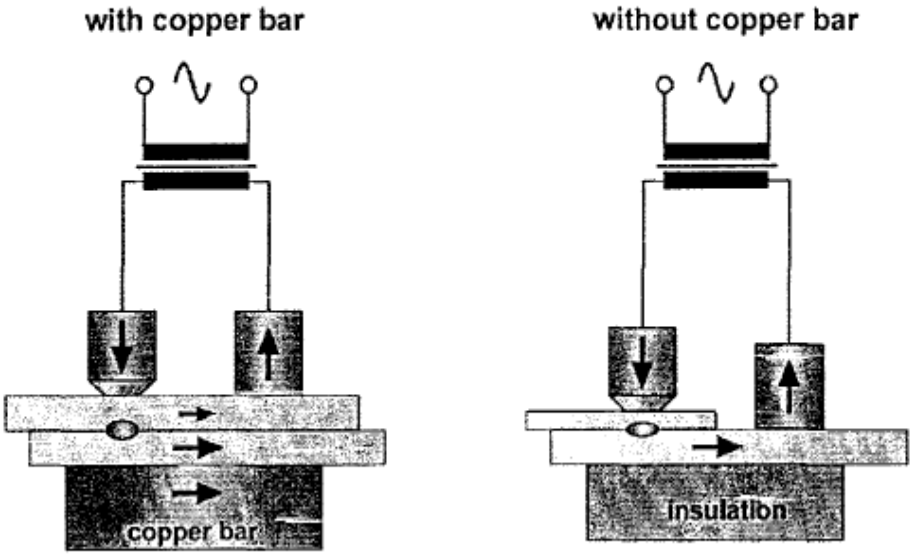
شکل ۱۸ : جوشکاری موازی چند نقطه ای[۱]

۲-۷-۲- جوشکاری مقاومتی نقطه ای غیر مستقیم (فرآیند یک طرفه)

در بیشتر موارد، امکان اینکه الکترودها را در جهت‌های مخالف در روی قطعه کار قرار دهیم، وجود ندارد. به‌عنوان مثال قسمت‌هایی از بدنه یک اتومبیل، در این حالت از یک روش ویژه به نام جوشکاری غیر مستقیم استفاده می‌شود. در این روش جریان به طور مستقیم با کل انرژی از جوش عبور نمی‌کند، بلکه قسمتی از جریان همواره به عنوان جریان شنت هدر می‌رود. بنابراین کیفیت این نوع جوش به خوبی جوشکاری مستقیم نیست (شکل های ۱۹ و ۲۰).



شکل ۱۹ : متغیرهای عملیات جوشکاری سری غیر مستقیم[۱]



شکل ۲۰ : جوشکاری یک طرفه تک نقطه ای[۱]