



بسم الله الرحمن الرحيم

آشنایی با فرآیندهای ساخت

فصل پنجم: اتصال مواد (۲)

مدرس:

دکتر رضا قنوازی

r_ghanavati@sbu.ac.ir

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی

پاییز ۱۴۰۳

□ فهرست مطالب

- (1) مقدمه‌ای بر روش‌های اتصال
- (2) جوشکاری با روش‌های شیمیایی
- (3) جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود (سیم جوش) مصرفی
- (4) جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود غیرمصرفی
- (5) جوشکاری مقاومتی
- (6) جوشکاری با پرتو پیرانرژی
- (7) جوشکاری حالت جامد
- (8) متالورژی جوشکاری
- (9) عیوب جوش (تکنیکی، مکانیکی و متالورژیکی)
- (10) ارزیابی اتصالات جوشکاری شده
- (11) انتخاب فرآیند جوشکاری

(۴) جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود غیر مصرفی

جوشکاری قوس تنگستن گاز (Gas Tungsten Arc Welding-GTAW)

در جوشکاری قوس تنگستن گاز (GTAW)، که سابقاً جوشکاری TIG نامیده می‌شد (Tungsten Inert Gas)، معمولاً یک فلز پرکننده به صورت خارجی (شکل زیر a) اعمال می‌شود. با این حال، جوشکاری ممکن است بدون فلز پرکننده (جوشکاری اتوژن) باشد، مانند جوشکاری اتصالات با فاصله درز بسیار کم. ترکیب فلز پرکننده معمولاً شبیه به فلزات پایه که قرار است جوش داده شوند، است. در این فرآیند، فلاکس استفاده نمی‌شود و گاز محافظ معمولاً آرگون یا هلیوم یا مخلوطی از این دو است. از آنجا که الکتروود تنگستن در این عملیات مصرف نمی‌شود، فاصله‌ی قوس، در یک سطح ثابت جریان، ثابت و پایدار نگه داشته می‌شود.

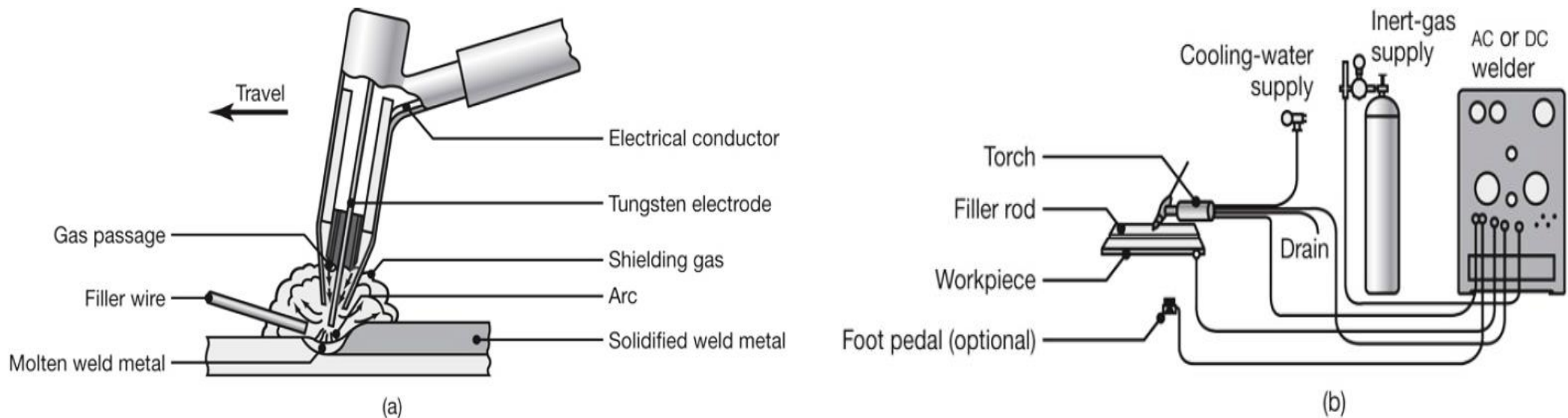


Figure 12.12

(a) Gas tungsten arc welding process, formerly known as TIG welding (for tungsten inert gas). (b) Equipment for gas tungsten arc welding operations.

توان منبع تغذیه (شکل قبل b) بین ۸ تا ۲۰ کیلو وات است و جریان DC در A ۲۰۰ یا جریان AC در A ۵۰۰، بسته به فلزات پایه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به طور کلی، AC برای آلومینیوم و منیزیم ترجیح داده می‌شود، زیرا اثر تمیزکردن قوس (Arc cleaning) اکسیدها را حذف می‌کند و کیفیت جوش را بهبود می‌بخشد. الکترودهای تنگستن ممکن است حاوی اکسید توریم یا زیرکونیم باشند تا خواص آنها را بهبود بخشد. آلودگی حوضچه جوش توسط الکترودهای تنگستن می‌تواند یک مشکل مهم در این فرآیند، به ویژه در کاربردهای حیاتی باشد، زیرا آلودگی می‌تواند باعث ناپیوستگی در جوش شود، بنابراین تماس الکتروده با حوضچه جوش باید اجتناب شود.

فرآیند GTAW برای طیف وسیعی از کاربردها و فلزات، به ویژه آلومینیوم، منیزیم، تیتانیوم و فلزات دیرگداز قابل استفاده است؛ به خصوص برای مقاطع نازک مناسب است. هزینه گاز خنثی این فرآیند را گران‌تر از SMAW می‌کند، اما جوش‌های با کیفیت بسیار بالا و سطح را فراهم می‌کند؛ با این حال، این یک فرآیند دستی است، که نیاز به نیروی کار ماهر برای تولید جوش‌های با کیفیت بالا دارد.

جوشکاری قوس پلاسما (Plasma Arc Welding-PAW)

پلاسما گاز داغ یونیزه شده است که تعداد الکترون‌ها و یون‌ها در آن برابر است. در جوشکاری قوس پلاسما (PAW) که در دهه ۱۹۶۰ توسعه یافت، یک قوس پلاسما متمرکز تولید می‌شود و ناحیه جوش را مورد هدف قرار می‌دهد. در این فرآیند، قوس بسیار پایدار بوده و به دمای بالای ۳۳۰۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. جریان‌های مورد استفاده معمولاً کمتر از ۱۰۰ A است، اما برای کاربردهای ویژه می‌تواند بیشتر باشد. پلاسما بین الکتروود تنگستن و نازل موسوم به Orifice با استفاده از یک قوس اولیه کم جریان آغاز می‌شود. برخلاف قوس در سایر پروسه‌های اتصال، قوس پلاسما متمرکز می‌شود، زیرا از طریق یک روزنه نسبتاً کوچک مجبور به عبور می‌شود. محافظت از قوس و محل جوش از طریق یک حلقه محافظت‌کننده‌ی خارجی، با استفاده از آرگون، هلیوم یا مخلوطی از این گازها تامین می‌شود.

دو روش جوشکاری قوس پلاسما وجود دارد. در **روش قوس انتقالی** (شکل زیر a)، فلز پایه بخشی از مدار الکتریکی است؛ بنابراین قوس از الکترود به قطعه کار منتقل می‌شود. از آنجایی که یک قوس منتقل شده دارای **دانشسته انرژی بالا** است، این روش معمولاً برای **برش فولادهای زنگ‌زن و آلیاژهای غیر آهنی** استفاده می‌شود. در **روش غیر انتقالی** (شکل زیر b)، قوس بین الکترودها و نازل Orifice است و گرما به وسیله **گاز پلاسما** به قطعه کار منتقل می‌شود.

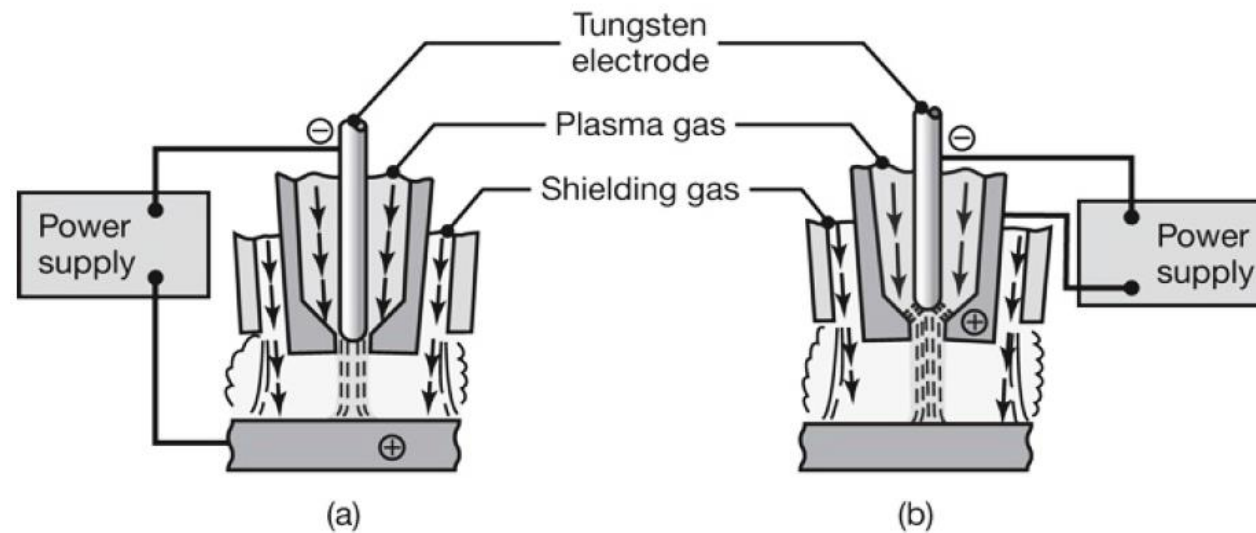
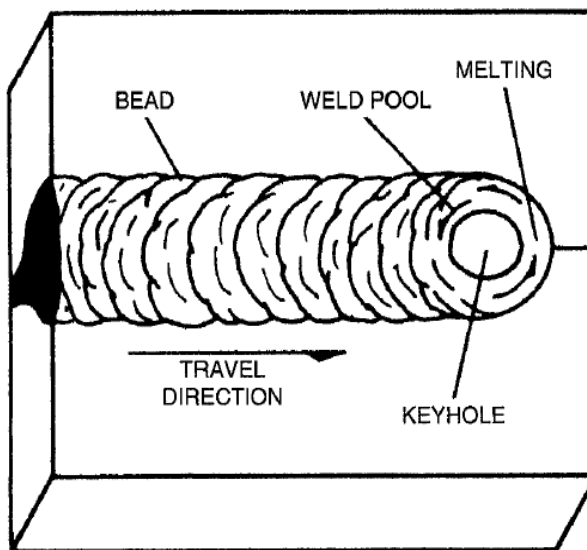


Figure 12.13

در مقایسه با سایر فرآیندهای جوشکاری قوسی، در جوشکاری قوس پلاسما (الف) دانسیته انرژی بسیار بالا است، بنابراین جوش‌های عمیق‌تر و با عرض کمتر می‌توان ایجاد کرد؛ (ب) پایداری قوس بهتر؛ (ج) اعوجاج حرارتی کمتر؛ و (د) سرعت جوشکاری بالاتر (نظیر ۱۲۰-۱۰۰۰ میلی‌متر بر دقیقه) است.

انواع فلزات با ضخامت به طور کلی کمتر از ۶ میلی‌متر (۰/۲۵ اینچ) توسط این فرآیند قابل جوشکاری است. دانسیته حرارت بالاتر می‌تواند باعث نفوذ کامل تا ضخامت ۲۰ میلی‌متر (۰/۸ اینچ) برای برخی از آلیاژهای تیتانیوم و آلومینیوم شود (تکنیک سوراخ کلیدی). در این تکنیک، نیروی قوس پلاسما، فلز مذاب را جا به جا می‌کند و یک سوراخ راه به در درون حوضچه جوش ایجاد می‌کند. جوشکاری قوس پلاسما به دلیل دانسیته انرژی بالا، ثبات قوس بهتر و سرعت جوشکاری بالاتر، برای اتصالات لب به لب (Butt) و لبه روی لبه (Lap) استفاده می‌شود.



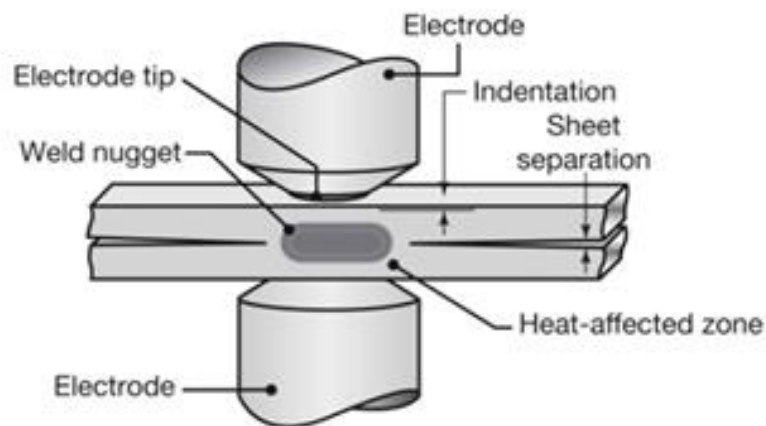
Schematic Representation of the Keyhole in Plasma Arc Welding

(۵) جوشکاری مقاومتی (Resistance Welding)

عملیات جوشکاری مقاومتی (RW) شامل چندین فرآیند است که در آن‌ها گرما مورد نیاز برای جوشکاری، به وسیله **مقاومت الکتریکی** بین دو جزئی که قرار است اتصال داده شوند، تولید می‌شود. مزایای عمده این فرآیندها شامل این واقعیت است که هیچ الکتروود مصرفی، گاز محافظ یا فلاکس **نیاز ندارند**. گرما تولید شده در جوشکاری مقاومتی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$H = RI^2t \quad (12.9)$$

که در رابطه‌ی فوق، H حرارت تولید شده به ژول (وات.ثانیه)، I جریان به آمپر، R مقاومت به اهم و t زمان عبور جریان به ثانیه است. این معادله به منظور تعیین انرژی گرمایی واقعی ایجاد شده، با استفاده از یک عامل K که نشان دهنده **تلفات انرژی** از طریق **تابش** و **هدایت** است، به طور کلی اصلاح می‌شود. لذا معادله فوق به $H = RI^2tK$ تبدیل می‌شود، که در آن مقدار K کمتر از واحد است. **مقاومت الکتریکی** کل در این فرآیندها، مانند جوش نقطه‌ای مقاومتی در شکل رو به رو، مجموع چهار گام زیر است:



(۱) مقاومت الکتروودها؛

(۲) مقاومت‌های تماس قطعه کار-الکتروود؛

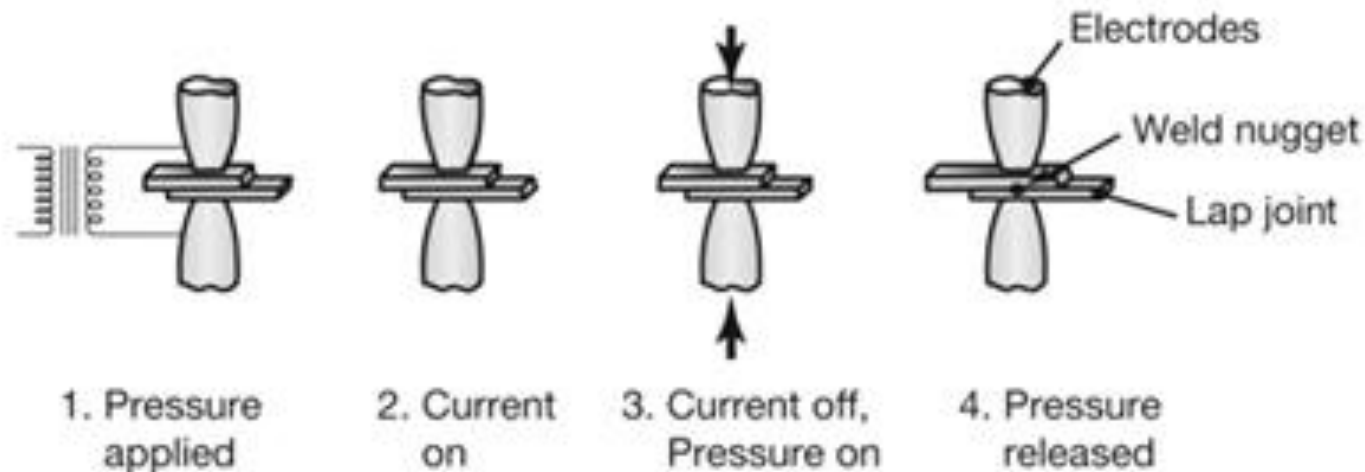
(۳) مقاومت قطعه کار؛

(۴) مقاومت‌های تماس قطعه کار-قطعه کار (سطوح تماس).

بزرگی جریان در عملیات جوشکاری مقاومتی ممکن است تا 100000 A باشد و ولتاژ معمولاً $5/0-10\text{ V}$ است.

افزایش دمای واقعی در اتصال به **گرمای ویژه** و **هدایت حرارتی** فلزات مورد نظر برای متصل بستگی دارد. برای مثال فلزات مانند آلومینیوم و مس، از آنجا که هدایت حرارتی بالایی دارند، نیاز به گرمایی ورودی بالاتری در جوشکاری مقاومتی دارند.

مواد الکترودها باید دارای رسانندگی حرارتی بالا و استحکام در دمای بالا باشند؛ که معمولاً از آلیاژهای پایه مس ساخته می‌شوند.



جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای (Resistance Spot Welding-RSW)

در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای (RSW)، نوک دو الکتروود توپرِ مدورِ مقابل هم، با سطوح اتصال لبه‌روی هم دو ورق فلزی، تماس داده شده و گرمای مقاومت الکتریکی یک جوش نقطه‌ای ایجاد می‌کند (شکل زیر a). جریان معمولاً بسته به مواد پایه و ضخامت آن‌ها، بین ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ آمپر است. برای به دست آوردن یک اتصال خوب در **دکمه جوش (weld nugget)** (شکل زیر b)، **فشار** به طور مداوم تا زمانی که جریان قطع شود، اعمال می‌شود. بنابراین کنترل دقیق و زمان جریان الکتریکی و فشار ضروری است. به طور کلی **قطر دکمه جوش** تا ۱۰ میلی‌متر می‌رسد و سطح نقطه جوش دارای فرورفتگی با تغییر رنگ است. قدرت اتصال به **زبری سطح** و **پاکیزگی سطوح** اتصال بستگی دارد. **لایه‌های اکسید ضخیم، روغن، رنگ** باید قبل از جوشکاری حذف شوند.

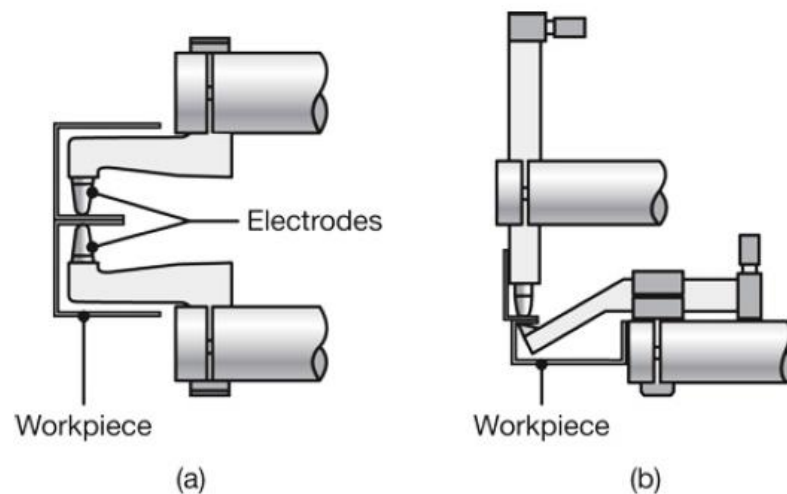


Figure 12.36

Two types of electrode designs for easy access in spot welding operations for complex shapes.

جوشکاری مقاومتی نواری/درزی (Resistance Seam Welding-RSEW)

جوشکاری مقاومتی نواری (RSEW) اصلاحی از جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای است که در آن الکترودها با **چرخ** یا **غلتک** جایگزین می‌شوند (شکل زیر). با یک منبع تغذیه **AC پیوسته**، الکترودهای هادی جریان الکتریکی و در عین حال چرخان، جوش‌های نقطه‌ای پیوسته را هر زمان که جریان به سطح کافی در چرخه جریان متناوب می‌رسد، تولید می‌کنند. جوش‌های تولید شده، در واقع جوش‌های نقطه‌ای هستند که همپوشانی دارند و می‌توانند یک اتصال **آب‌بند در برابر مایعات و گازها** را ایجاد کنند (شکل زیر b). سرعت جوشکاری معمولی ۱/۵ متر بر دقیقه برای ورق نازک است. با استفاده از **جریان منقطع**، یک سری از جوش‌های نقطه‌ای در فواصل مختلف می‌تواند در امتداد طول درز ایجاد کرد (شکل زیر c)، این روش **جوشکاری نقطه‌ای غلتکی** نامیده می‌شود.

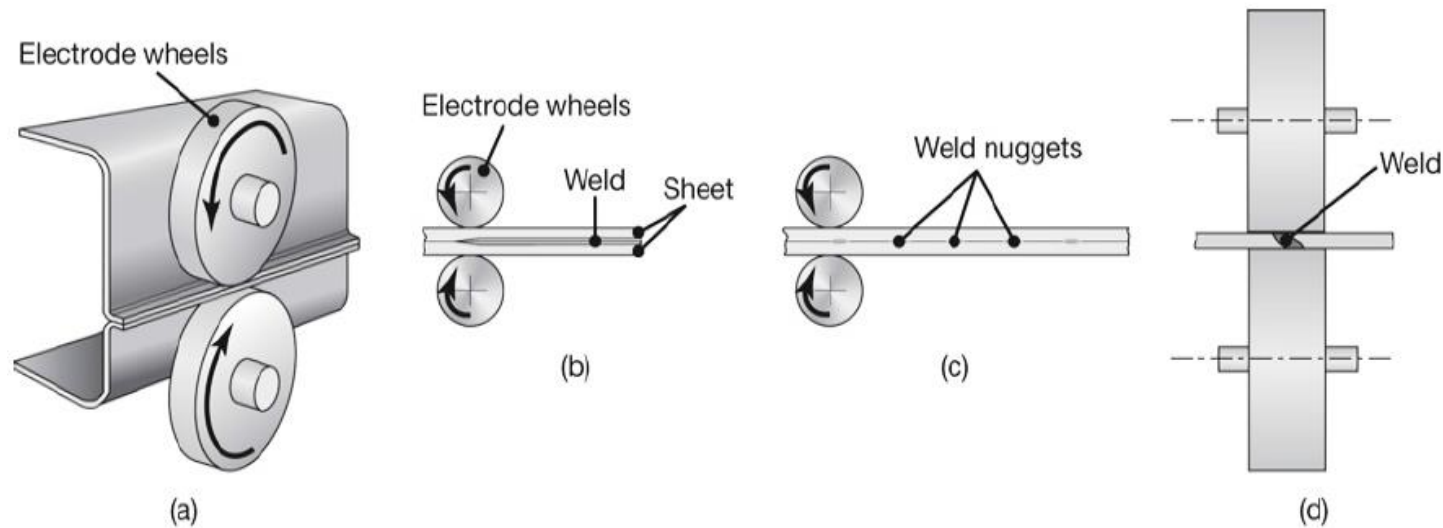


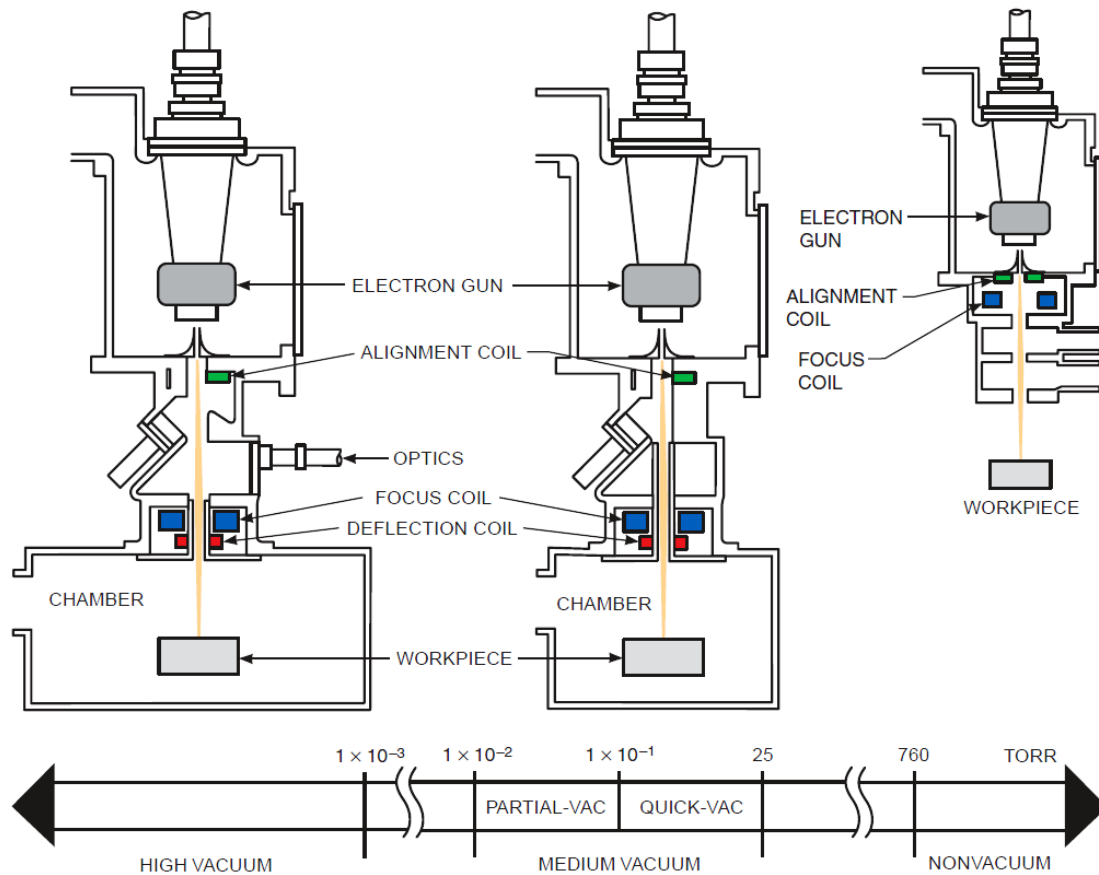
Figure 12.37

(a) Illustration of the seam welding process, with rolls acting as electrodes. (b) Overlapping spots in a seam weld. (c) Cross section of a roll spot weld. (d) Mash seam welding.

۶) جوشکاری با پرتو پر انرژی (High Energy Beam Welding)

جوشکاری پرتوی الکترونی (Electron-Beam Welding-EBW)

فرآیند EBW که در دهه ۱۹۶۰ توسعه یافت. در جوشکاری پرتوی الکترونی (EBW)، گرما از طریق پرتو باریک و با سرعت بالای الکترون‌ها تولید می‌شود. انرژی جنبشی الکترون‌ها زمان برخورد به قطعه کار به گرما تبدیل می‌شود. این فرآیند نیاز به تجهیزات خاصی دارد تا پرتو را بر روی قطعه کار، در خلاء متمرکز کند. ظرفیت تفنگ‌های پرتو الکترونی تا ۱۰۰ کیلو وات محدود می‌شود. خلاء بالاتر، منجر به نفوذ عمیق‌تر پرتو در قطعه کار شده و نسبت عمق به عرض جوش بیشتری را می‌توان بدست آورد. سطح خلاء به صورت HV (خلاء بالا) یا MV (خلاء متوسط) تعریف می‌شود، که هر دو به طور معمول مورد استفاده قرار می‌گیرند. NV (بدون خلاء) می‌تواند در برخی از مواد، عمدتاً جوشکاری مس استفاده شود. تقریباً تمام فلزات همجنس یا غیرهمجنس را می‌توان به صورت لب به لب یا لبه‌روی هم با ضخامت‌های مختلف از فویل (حدود ۲۰۰ میکرون) تا پللیت‌های ضخیم ۱۵۰ میلی‌متری به این روش جوشکاری کرد. به طور کلی در این روش، گاز محافظ، فلاکس و یا فلز پرکننده لازم نیست. این فرآیند قادر به تولید جوش با کیفیت بالا، عمیق و باریک با دیواره‌های جوش تقریباً موازی و مناطق کوچک متأثر از حرارت است. نسبت عمق به عرض بین ۱۰ تا ۳۰ (شکل بعد) است. متغیرهای جوش را می‌توان دقیقاً کنترل کرد و با سرعت تا ۱۲ متر بر دقیقه جوشکاری نمود. اعوجاج و انقباض در منطقه جوش حداقل است و جوش خلوص بسیار بالایی دارد.



Basic Variations of Electron Beam Welding, with Corresponding Vacuum Scale (WHB-3).

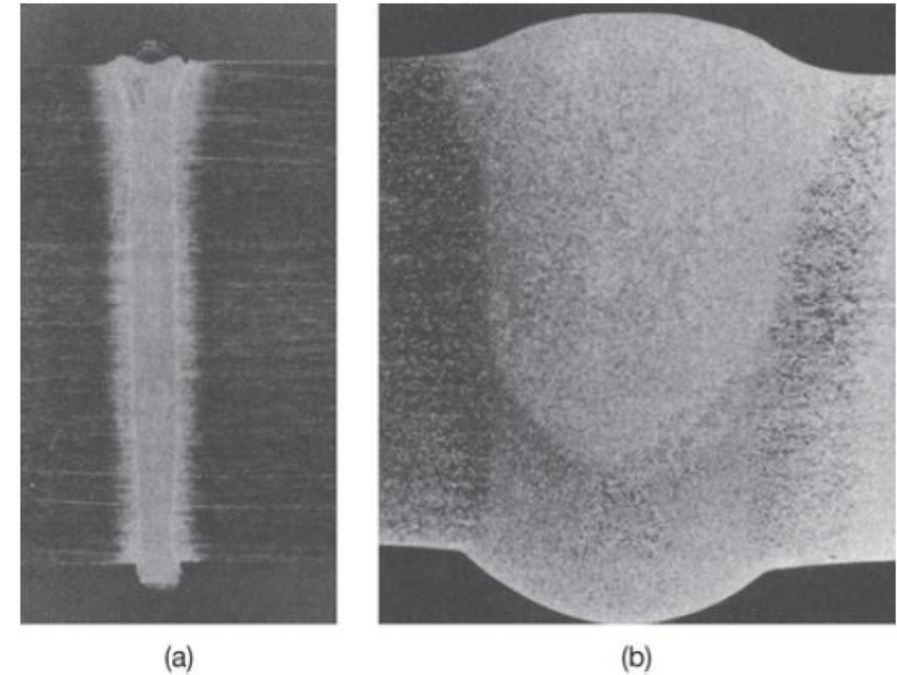


Figure 12.14
Comparison of the size of weld beads in (a) electron-beam or laser-beam welding with that in (b) conventional (tungsten arc) welding.

کاربردهای معمول عبارتند از جوش هواپیما، موشک، هسته‌ای و قطعات الکترونیکی و همچنین ابزار و شفت برای صنعت خودرو. از آنجا که تجهیزات EBW تولید اشعه ایکس می‌کنند، نظارت مناسب و نگهداری دوره‌ای ضروری است.

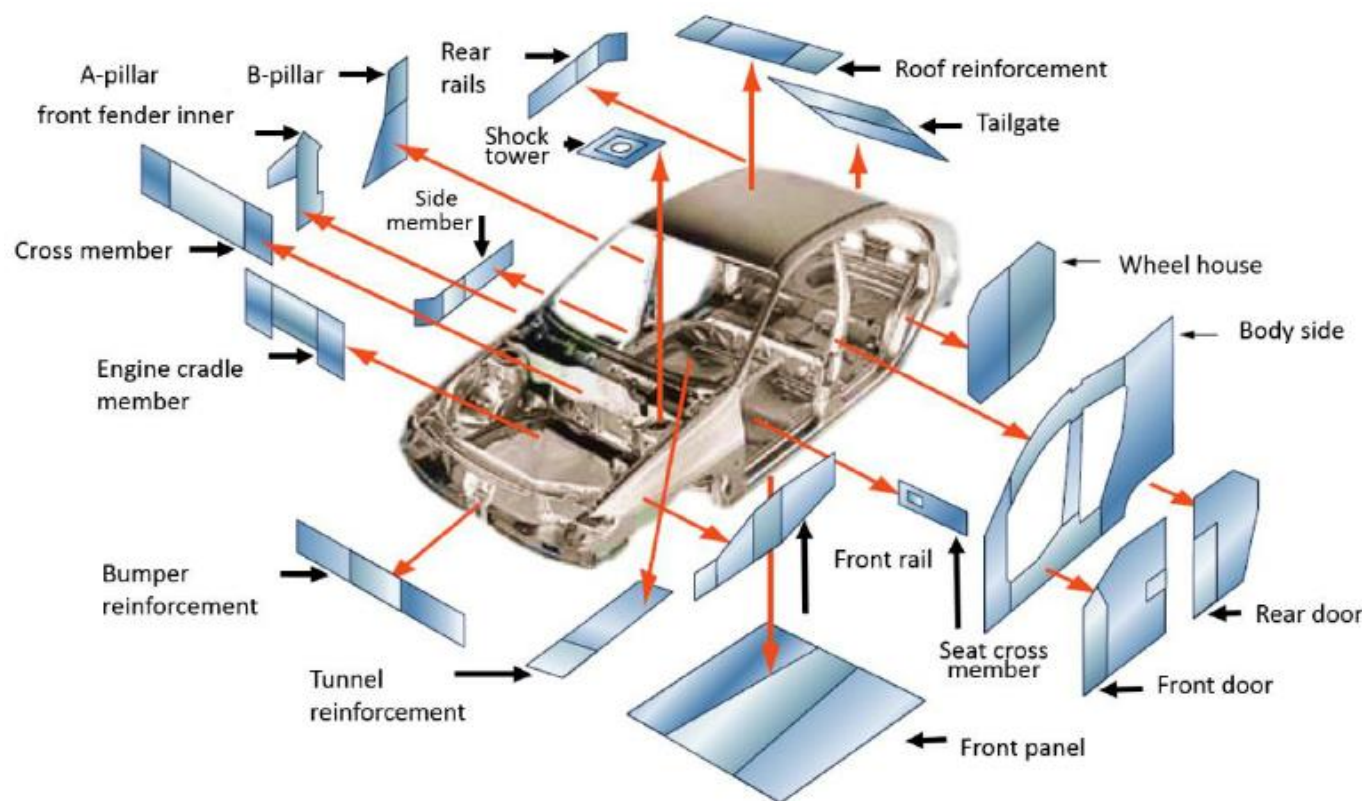
جوشکاری پرتوی لیزر (Laser-Beam Welding-LBW)

در جوشکاری پرتوی لیزر (LBW) از لیزر با توان بالا به عنوان منبع گرما برای تولید جوش ذوبی استفاده می‌شود. از آنجا که پرتو لیزر می‌تواند بسیار متمرکز شود، به عنوان مثال تا $10\text{ }\mu\text{m}$ ، دارای چگالی انرژی بالا و قابلیت نفوذ عمیق است. بنابراین این فرایند به ویژه برای ایجاد جوش‌های عمیق و باریک، با نسبت عمق به عرض معمولاً از ۴ تا ۱۰، مناسب است.

پرتو لیزر ممکن است برای کاربردهایی مانند جوشکاری نقطه‌ای ورق‌های نازک با سطوح توان تا ۱۰۰ وات به صورت پالسی (میلی ثانیه) استفاده شود. سیستم‌های لیزر پیوسته چند کیلوواتی برای جوش‌های عمیق در قطعات ضخیم استفاده می‌شود. بازده این فرآیند با افزایش بازتابی مواد قطعه کار کاهش می‌یابد.

فرآیند LBW می‌تواند به صورت اتوماتیک و با انواع مواد مختلف با ضخامت تا ۲۵ میلی‌متر (۱ اینچ) استفاده شود. این روش به ویژه در جوشکاری قطعه‌های نازک مؤثر است. فلزات و آلیاژهای معمول جوش داده شده به این روش عبارتند از آلومینیوم، تیتانیوم، فلزات آهنی، مس و فلزات دیرگداز. سرعت‌های جوشکاری برای فلزات نازک از $2/5\text{ m/min}$ تا مقادیر بالا در حدود 80 m/min می‌تواند بکار گرفته شود.

به علت ماهیت فرآیند، جوشکاری می‌تواند در مکان‌های غیر قابل دسترس انجام شود. ایمنی به دلیل خطرات شدید چشم و پوست بسیار مهم است و لیزرهای حالت جامد (YAG) به ویژه مضر هستند. روش جوشکاری پرتو لیزر، جوش‌های با کیفیت خوب را با حداقل انقباض و اعوجاج تولید می‌کند. جوش‌های حاصل دارای استحکام خوبی هستند و به طور کلی شکل‌پذیر و بدون تخلخل هستند. در صنایع خودروسازی، از این فرآیند برای جوش قطعات انتقال توان و ورق‌های تکه دوزی شده استفاده می‌شود؛ در میان بسیاری از کاربردهای دیگر جوش قطعات نازک برای قطعات الکترونیکی مشاهده می‌شود.



مزایای اصلی LBW نسبت به EBW عبارتند از:

- پرتو لیزر می‌تواند از طریق هوا منتقل شود، از این رو مشابه جوشکاری پرتو الکترونی لازم نیست خلاء باشد.
- از آنجا که پرتوهای لیزر را می‌توان شکل داد، دستکاری کرد و به صورت نور متمرکز کرد (با استفاده از فیبرهای نوری)، فرآیند به راحتی می‌تواند خودکار باشد.
- بر خلاف پرتوهای الکترون، اشعه ایکس تولید نمی‌کند.
- کیفیت جوش بهتر از جوشکاری پرتو الکترونی است، با تمایل کمتر برای ذوب ناقص، پاشش، تخلخل و اعوجاج.

جوشکاری لیزر - قوس فلز گاز (Laser-GMAW)

این یک تکنولوژی جوشکاری ترکیبی است که منطقه متأثر از حرارت باریک جوشکاری لیزر را با میزان بالای رسوبدهی جوشکاری قوس فلز گاز ترکیب می‌کند. در این فرآیند، که در شکل زیر نشان داده شده، لیزر روی قطعه کار جلوتر از قوس GMAW، قطعه کار را گرم کرده و در نتیجه نفوذ عمیق و سرعت جوشکاری را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، این فرآیند می‌تواند شکاف‌های بزرگتری را نسبت به جوشکاری لیزر معمول پر کند و کیفیت متالورژیکی جوش به علت حضور گاز محافظ بهبود می‌یابد.

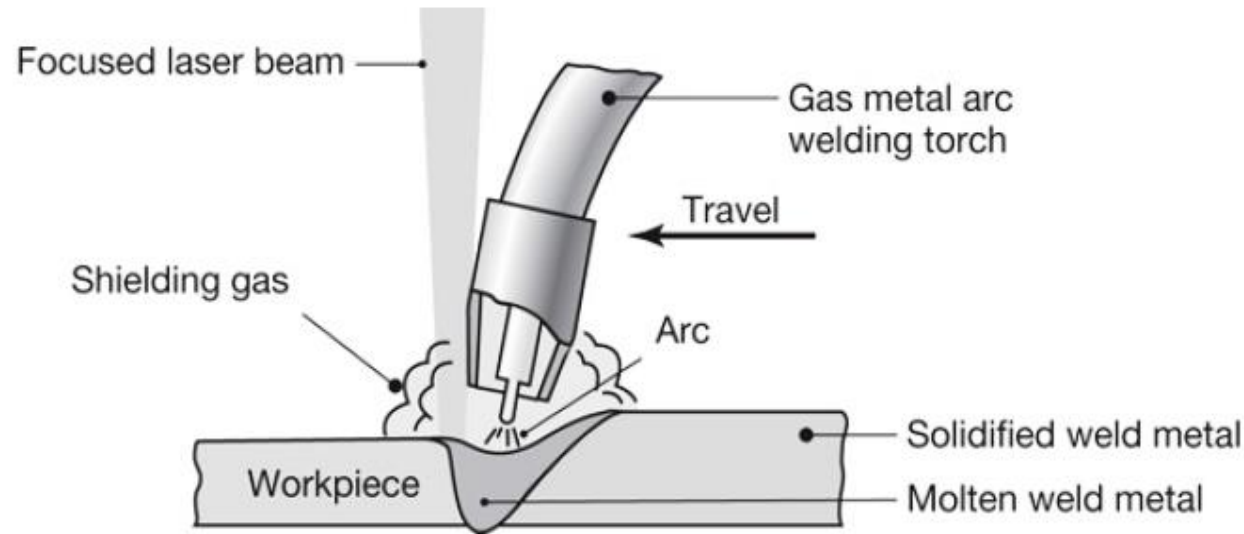


Figure 12.15
Schematic illustration of the Laser GMAW hybrid welding process.

۷) جوشکاری حالت جامد (Solid State Welding)

جوشکاری سرد (Cold Welding)

در جوشکاری سرد (CW)، فشار روی سطوح در تماس قطعات از طریق قالب یا غلتک اعمال می‌شود. از آنجا که تغییر شکل پلاستیک باید رخ دهد، لازم است حداقل یکی، اما ترجیحاً هر دو، از قطعات در تماس به اندازه کافی شکل‌پذیر باشد. محل تماس قبل از جوشکاری معمولاً توسط سیم یا برس تمیز می‌شود. در اتصال دو فلز غیرهمجنس که به طور متقابل محلول هستند؛ با این حال، ترکیبات بین فلزی ترد ممکن است تشکیل شوند و در نتیجه یک اتصال ضعیف و شکننده ایجاد می‌شود. به عنوان مثال اتصال آلومینیوم و فولاد، جایی که یک ترکیب بین‌فلزی ترد در فصل مشترک شکل می‌گیرد. بهترین استحکام و شکل‌پذیری اتصال در جوشکاری سرد دو ماده مشابه بدست می‌آید. این فرآیند را می‌توان برای اتصال قطعه‌کارهای کوچک ساخته شده از فلزات نرم و شکل‌پذیر استفاده کرد. کاربردها شامل اتصالات الکتریکی است.

اتصال دهی با نورد (Roll bonding)

در اینجا، فشار مورد نیاز برای جوش سرد از طریق یک جفت غلتک اعمال می‌شود (شکل زیر). یک کاربرد متداول این روش در ساخت برخی از **سکه های دو فلزی** ایالات متحده، با استفاده از نوارهای فلزی پیوسته است. کاربرد متداول دیگر تولید نوارهای دو فلزی برای **ترموستات ها** و کنترل های مشابه با استفاده از دو لایه از مواد با **ضرایب انبساط حرارتی** مختلف است. آماده سازی سطح برای استحکام فصل مشترک مهم است. با لایه نشانی یک ماده جداکننده مانند گرافیت یا سرامیک به نام **stop-off**، اتصال می‌تواند فقط در **مناطق منتخب** از یک فصل مشترک انجام شود. اتصال دهی با نورد همچنین می‌تواند برای افزایش استحکام فصل مشترک در دماهای بالا (**نورد گرم**) نیز انجام شود. مثال های معمول شامل **روکش آلومینیوم** خالص بر ورق آلیاژ آلومینیوم رسوب سخت شده و **فولاد زنگ نزن** روی فولاد کم کربن برای مقاومت در برابر خوردگی است.

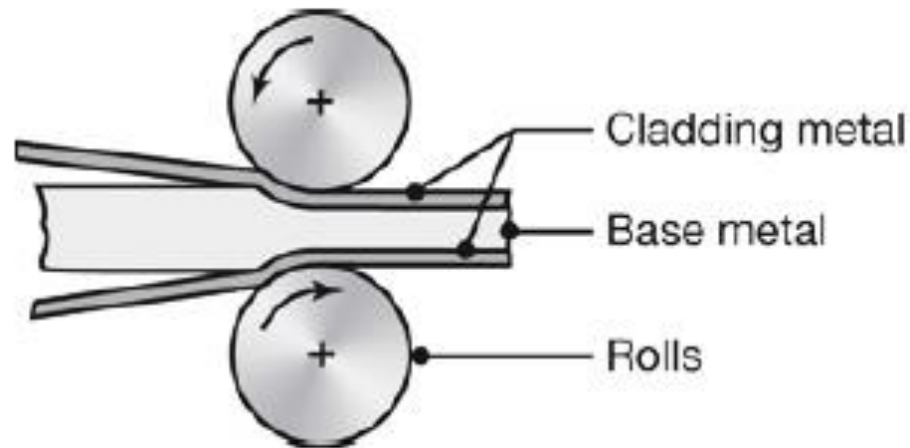


Figure 12.30

Schematic illustration of the roll-bonding, or cladding, process.

جوشکاری اولتراسونیک (Ultrasonic Welding)

در جوشکاری اولتراسونیک (USW)، سطوح تماس دو عضوی که قرار است به یکدیگر اتصال داده شوند، تحت تنش‌های **استاتیکی عمودی** و **نوسانی مماسی** (برشی) قرار می‌گیرند. تنش‌های برشی توسط **نوک مبدل** اعمال می‌شود (شکل زیر a)، مشابه آنچه برای ماشین‌کاری اولتراسونیک استفاده می‌شود. فرکانس نوسانات به طور کلی از ۱۰ تا ۷۵ کیلوهرتز متغیر است. انرژی مورد نیاز در این فرآیند با افزایش **ضخامت** و **سختی** موادی که قرار است به هم متصل شوند، افزایش می‌یابد. اتصال مناسب بین مبدل و نوک برای اتصال مؤثر مهم است. برای جوشکاری نواری یا درزی که یکی از اجزای آن می‌تواند یک ورق یا فویل باشد، نوک جوشکاری را می‌توان با **دیسک‌های چرخان** جایگزین کرد (شکل زیر b).

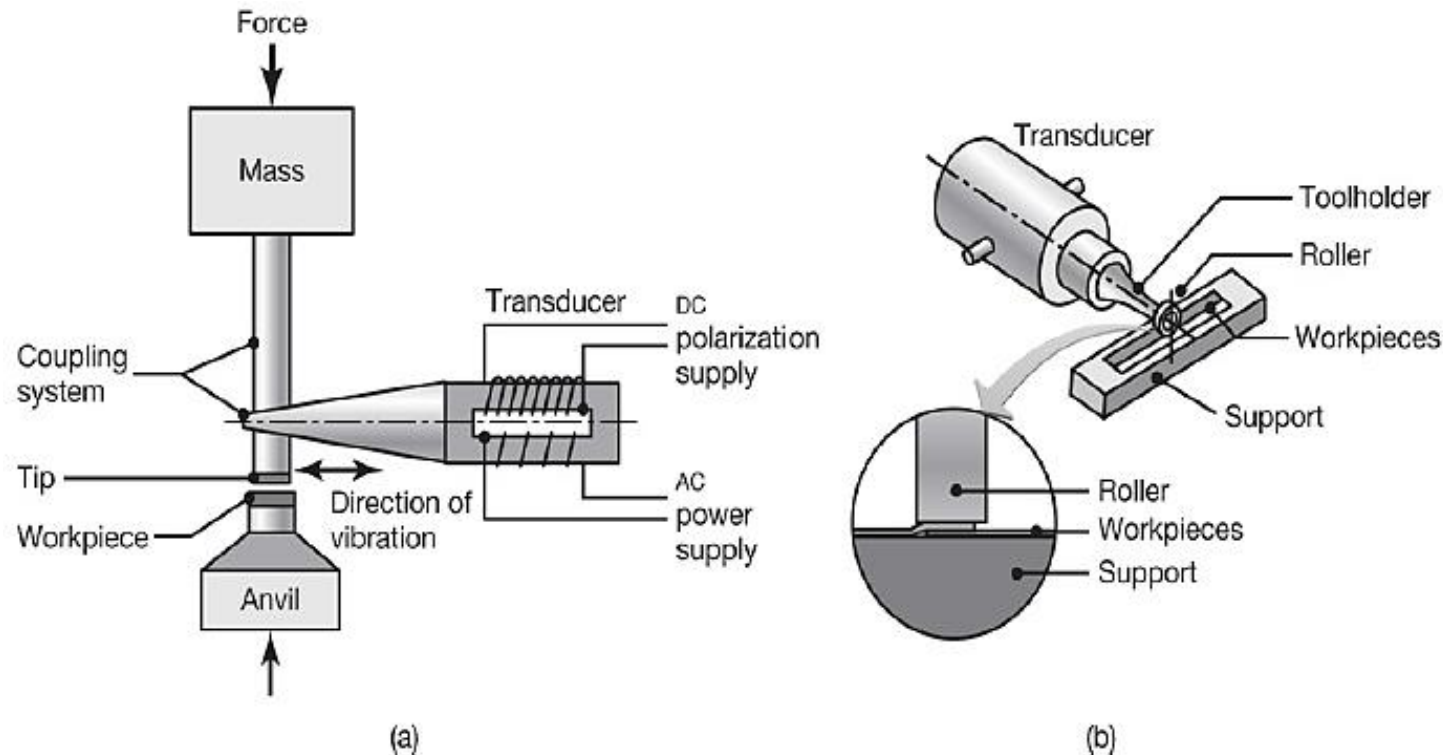


Figure 12.31

(a) Components of an ultrasonic welding machine for lap welds. (b) Ultrasonic seam welding using a roller.

تنش‌های برشی باعث تغییر شکل پلاستیک در مقیاس کوچک در فصل مشترک، شکستن فیلم‌های اکسید و آلودگی‌ها می‌شوند و امکان تماس خوب و ایجاد اتصال حالت جامد را فراهم می‌کنند. دمای تولید شده در منطقه جوش در محدوده یک سوم تا یک دوم نقطه ذوب (در مقیاس مطلق) فلزات قرار گرفته است، بنابراین ذوب صورت نمی‌گیرد. با این حال، در برخی شرایط، درجه حرارت می‌تواند به اندازه کافی زیاد باشد که باعث ایجاد تغییرات قابل توجه متالورژی در منطقه جوش شود.

فرآیند جوشکاری اولتراسونیک انعطاف‌پذیر و قابل اعتماد است و می‌توان از آن برای اتصال انواع مواد فلزی و غیرفلزی از جمله اتصال فلزات غیرهمجنس در ساخت نوارهای دو فلزی استفاده کرد. این فرآیند برای اتصال پلاستیک‌ها و در صنایع خودروسازی و الکترونیک، برای جوشکاری لبه روی هم ورق، فویل و سیم نازک و در بسته‌بندی با فویل بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. مکانیزم اتصال مواد ترموپلاستیک با جوشکاری اولتراسونیک با فلزات متفاوت است و ذوب بین سطوح به دلیل دمای ذوب بسیار پایین پلاستیک‌ها صورت می‌گیرد.

جوشکاری اصطکاکی (Friction Welding)

در جوشکاری اصطکاکی، حرارت مورد نیاز برای جوشکاری از طریق اصطکاک در فصل مشترک دو عضو در حال اتصال تولید می‌شود. در فرآیند جوشکاری اصطکاکی، یکی از اعضا در یک مرغک، گیره یا یک قید مشابه قرار می‌گیرد و با **سرعت ثابت بالایی چرخانده** می‌شود. **عضو دیگر ثابت** است. سرعت چرخش ممکن است به اندازه **۹۰۰ دور بر دقیقه** باشد. سپس این دو عضو تحت یک نیروی محوری در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند (شکل زیر). اعضا باید کاملاً محکم بسته شوند تا در برابر نیروهای **گشتاور** و **محوری** مقاومت کنند بدون اینکه در قیدهایشان دچار لغزش شوند. پس از برقراری تماس سطحی کافی، ابتدا عضو چرخان به حالت ناگهانی متوقف می‌شود و سپس نیروی محوری برای **ادغام اعضا در یکدیگر** اعمال می‌شود.

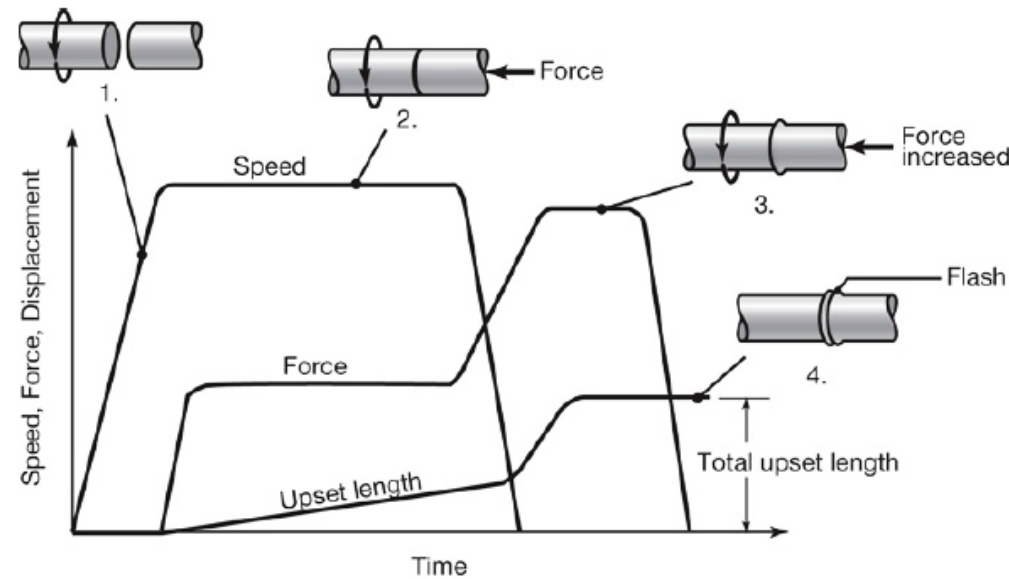


Figure 12.32

Sequence of operations in the friction welding process. (1) The part on the left is rotated at high speed. (2) The part on the right is brought into contact under an axial force. (3) The axial force is increased, and the part on the left stops rotating; flash begins to form. (4) After a specified upset length or distance is achieved, the weld is completed. The upset length is the distance the two pieces move inward during welding after their initial contact; thus, the total length after welding is less than the sum of the lengths of the two pieces.

منطقه جوش معمولاً در یک منطقه باریک بسته به موارد زیر محدود می‌شود:

(الف) میزان گرمای تولید شده، (ب) هدایت حرارتی مواد؛ (ج) خواص مکانیکی مواد در دمای بالا و (د) زمان جوشکاری.

همانطور که در شکل زیر مشاهده می‌شود، شکل اتصال بستگی به سرعت چرخش و نیروی محوری اعمال شده دارد. برای به دست آوردن اتصال یکنواخت قوی باید عوامل گفته شده در بالا کنترل شود. حرکت شعاعی رو به بیرون فلز داغ در فصل مشترک (پلیسه) اکسیدها و سایر آلودگی‌ها را از فصل مشترک خارج می‌کند و باعث افزایش بیشتر استحکام اتصال می‌شود.

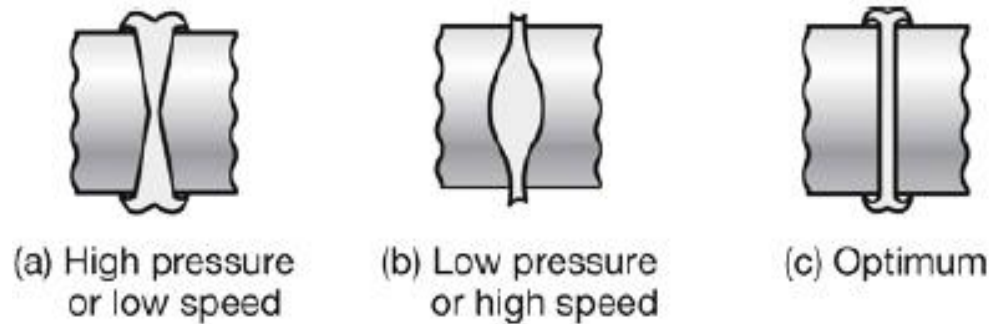


Figure 12.33

Shapes of the fusion zone in friction welding as a function of the force applied and the rotational speed.

جوشکاری اصطکاکی در دهه ۱۹۴۰ توسعه یافت و می‌تواند برای اتصال گسترده‌ای از مواد استفاده شود، **مشروط بر اینکه یکی از اجزای**

اتصال تقارن چرخشی داشته باشد. قطعات جامد و لوله‌ای با استحکام اتصال خوبی قابل اتصال هستند. میله‌های فولادی جامد به قطر ۱۰۰

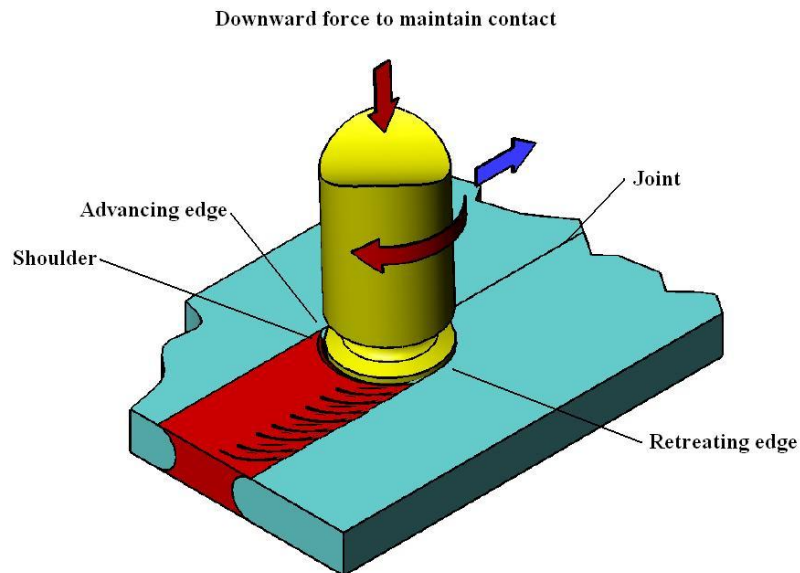
میلی‌متر و لوله‌هایی تا قطر خارجی ۵۰۰ میلی‌متر با موفقیت جوش داده شده‌اند. به دلیل ترکیب گرما و فشار، فصل مشترک در FRW با

تغییر شکل پلاستیک منطقه گرم شده، پلیسه ایجاد می‌کند. اگر مورد ایراد باشد، این پلیسه به راحتی با ماشینکاری یا سنگ‌زنی بعدی

(۱) جوشکاری اصطکاکی اینرسی (IFW)

(۲) جوشکاری اصطکاکی خطی (LFW)

(۳) جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW). در حالی که در جوشکاری اصطکاکی متداول، گرم شدن فصل مشترکها از طریق اصطکاک حاصل می‌شود، در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW)، یک ابزار چرخشی، در محل اتصال فرو می‌رود (شکل زیر). فشارهای تماسی و چرخش باعث گرم شدن اصطکاکی می‌شوند و درجه حرارت را در نوک ابزار چرخان بالا می‌برند و باعث گرمایش و سیلان واختلاط مواد در محل اتصال می‌شوند. ضخامت قطعات جوش داده شده می‌تواند به کوچکی ۱ میلی‌متر تا بزرگی ۳۰ میلی‌متر باشد. کیفیت جوش بالا، با ساختار یکنواخت مواد و با حداقل تخلخل است. جوشها با حرارت ورودی کم تولید می‌شوند و بنابراین اعوجاج کم و تغییرات ریزساختاری کمی دارند. علاوه بر این، هیچ دود یا پاششی تولید نمی‌شود. اجرای این فرآیند نسبتاً آسان و خودکار است.



جوشکاری انفجاری (Explosion Welding)

در جوشکاری انفجاری (EXW) فشار تماسی بسیار زیاد با منفجر کردن لایه‌ای از **مواد منفجره** که روی یکی از اجزای اتصال قرار می‌گیرد، (صفحه پرنده **flyer plate**)؛ شکل زیر) ایجاد می‌شود. فشار در مقیاس **10 GPa** است و انرژی جنبشی صفحه پرنده که به جزء دیگر اتصال داده می‌شود، یک فصل مشترک آشفته و **موج‌دار** ایجاد می‌کند. ضربه به شکل مکانیکی دو سطح در تماس را بهم قفل می‌کند (شکل بعد). در طراحی پیش از فرآیند، صفحه پرنده در یک **زاویه** مشخص قرار می‌گیرد، به طوری که هر **فیلم اکسیدی** موجود در فصل مشترک شکسته شده و از فصل مشترک بیرون می‌رود. در نتیجه، استحکام اتصال بسیار بالا است.

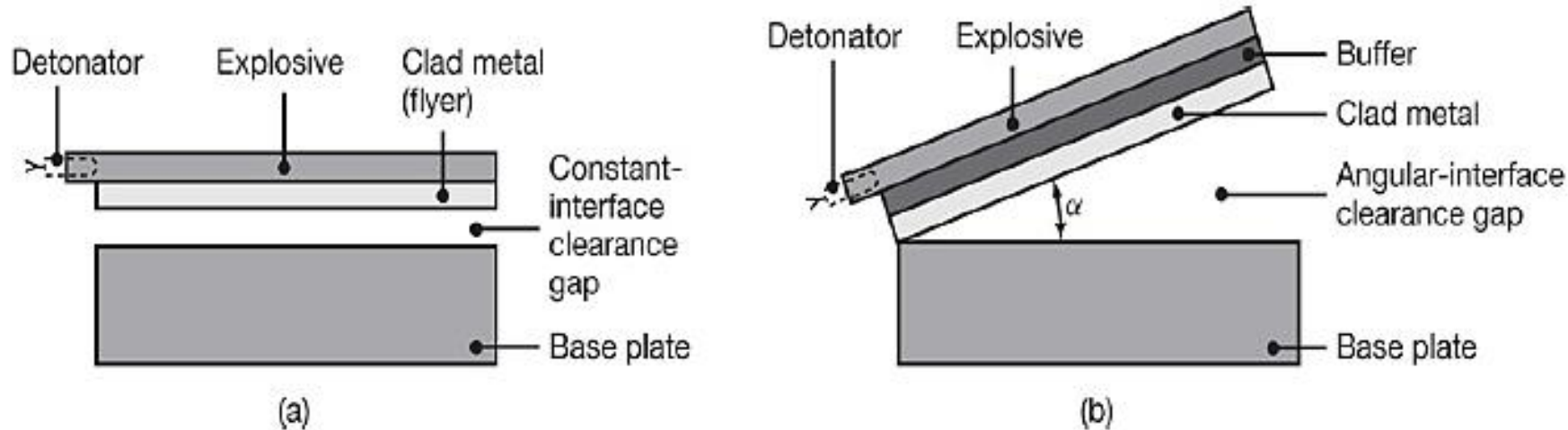


Figure 12.41

Schematic illustration of the explosion welding process: (a) constant interface clearance gap and (b) angular interface clearance gap.

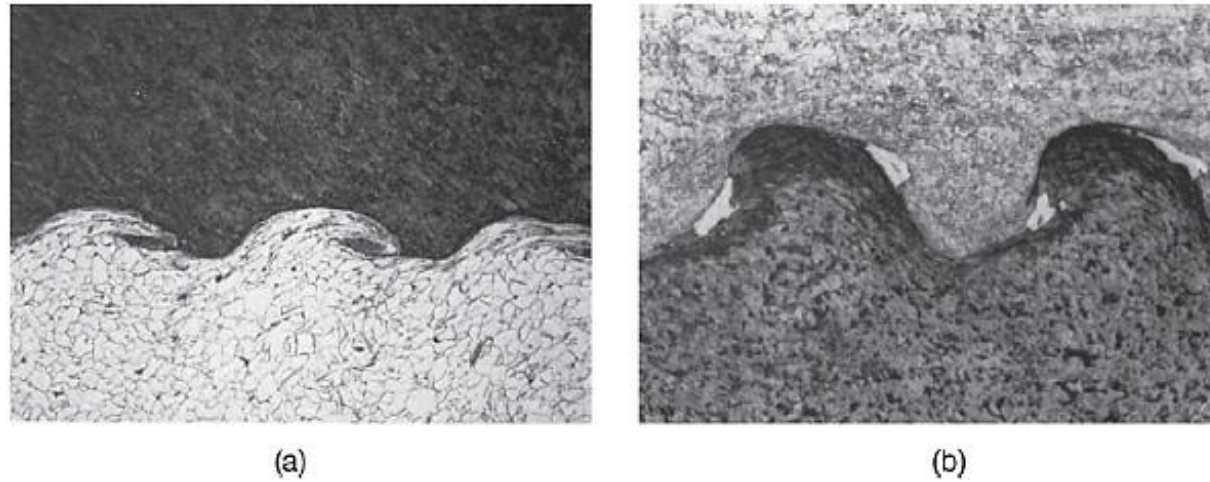


Figure 12.42

Cross sections of explosion welded joints: (a) titanium (top) on low-carbon steel (bottom) and (b) Incoloy 800 (iron-nickel-base alloy) on low-carbon steel. The wavy interfaces shown improve the shear strength of the joint. Some combinations of metals, such as tantalum and vanadium, produce a much less wavy interface. If the two metals have little metallurgical compatibility, an interlayer may be added that has compatibility with both metals.

مواد منفجره ممکن است به شکل ورق پلاستیکی **انعطاف پذیر**، **سیم**، **گرانول جامد** یا **مایع** باشد که روی صفحه پرنده ریخته شده یا فشرده شوند. بسته به نوع مواد منفجره و ضخامت لایه انفجاری، سرعت انفجار معمولاً **۲۴۰۰ تا ۳۶۰۰ متر بر ثانیه** است. انفجار با استفاده از یک رابط انفجاری تجاری انجام می شود. جوشکاری مواد منفجره برای **روکش کاری** صفحات و تختال ها با فلزات غیرهمجنس، بخصوص برای صنایع **شیمیایی** و **کاربردهای نظامی** مانند زره ها مناسب است. صفحات به بزرگی **۶×۲ متر** به طور انفجاری روکش کاری شده اند. در ادامه صفحات را می توان به مقاطع نازک تر نورد کرد. لوله ها اغلب با این روش به سوراخ های صفحه های هدر **بویلرها** و **مبدل های حرارتی** تیوبی متصل می شوند. مواد منفجره در داخل لوله قرار می گیرند و فشار ایجاد شده ناشی از انفجار لوله را **منبسط** می کند.

(۸) متالورژی جوشکاری (Welding Metallurgy)

ساختار معمول حاصل از جوشکاری ذوبی در شکل زیر نشان داده شده است، که در آن سه منطقه مجزا قابل تشخیص است:

۱. فلز پایه؛ Base Metal

۲. منطقه متأثر از حرارت (HAZ)؛

۳. فلز جوش، با یا بدون فلز پرکننده Filler Metal

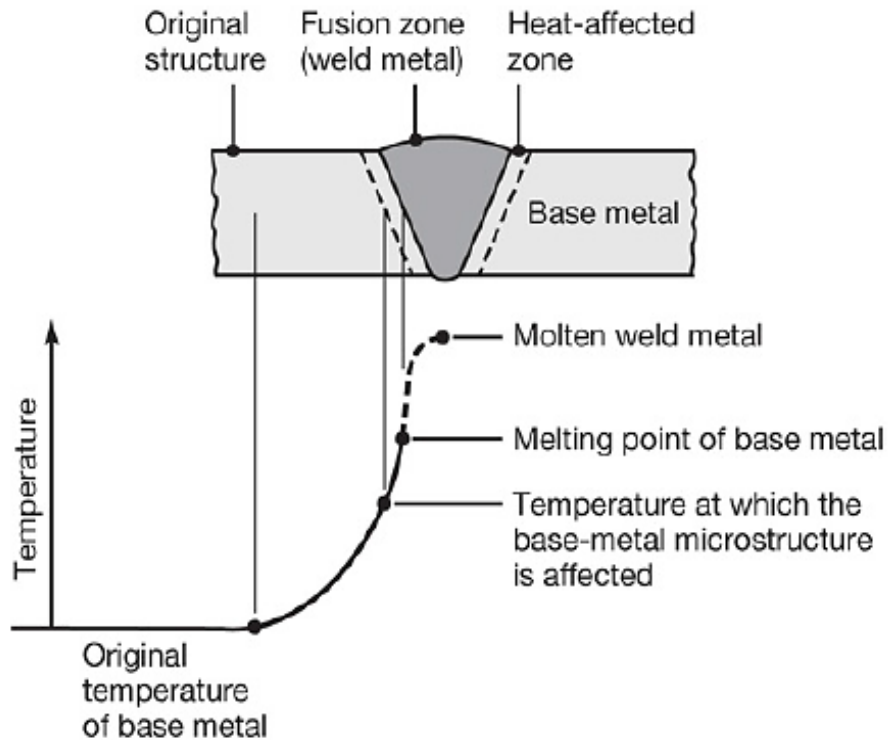


Figure 12.17

Characteristics of a typical fusion weld zone in oxyfuel gas welding and arc welding processes.

عوامل موثر بر متالورژی HAZ و W.M

(الف) فلزاتی که قرار است به هم متصل شوند (به عنوان مثال، تک فاز، چند فاز و یا غیرهمجنس باشند و خواص ترموفیزیکی).

(ب) فرآیند جوشکاری

(ج) فلز پرکننده مورد استفاده (در صورت وجود)

(د) متغیرهای فرآیندهای جوشکاری و هندسی قطعات که سرعت سرمایش را تعیین می کنند.

عوامل موثر بر خواص مکانیکی اتصالات

(الف) میزان حرارت اعمالی و خصوصیات حرارتی فلزات که میزان و توزیع دما در اتصال در هنگام جوشکاری را کنترل می کنند.

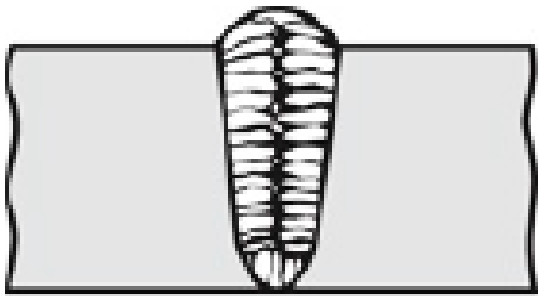
(ب) ریزساختار و اندازه دانه اتصال که بستگی به بزرگی گرمای اعمال شده، افزایش دما، میزان کار سرد قبلی فلزات و نرخ سرمایش پس از

اتمام جوش دارند.

(ج) کیفیت جوش که به عواملی مانند هندسه مهره جوش، وجود هرگونه ترک، تنش های پسماند، آخال ها و فیلم های اکسیدی بستگی دارد.

انجماد فلز جوش

پس از اعمال گرما و ورود فلز پرکننده (در صورت وجود)، فلز جوش شروع به خنک شدن و انجماد می‌کند. فرآیند انجماد مشابه فرآیند ریخته‌گری است و با تشکیل دانه‌های ستونی آغاز می‌شود. این دانه‌ها با طول نسبتاً زیاد و در جهت عکس جریان حرارت تشکیل می‌شوند. از آنجا که فلزات رسانای گرما بسیار بهتری نسبت به هوای اطراف هستند، دانه‌ها به موازات صفحه دو ورق جوشکاری شده قرار می‌گیرند (شکل زیر a). ساختار نهایی دانه‌ها و اندازه آن‌ها به نوع آلیاژ، متغیرهای فرآیند جوشکاری و فلز پرکننده بستگی دارند.



(a)



فلز جوش از ساختار ریختگی برخوردار است و از آنجا که به آرامی خنک می‌شود (در مواردی که حرارت ورودی بالاست)، معمولاً دارای دانه‌های درشت است. در نتیجه، فلز جوش از استحکام، سختی، چقرمگی و شکل‌پذیری نسبتاً کم برخوردار است (شکل زیر). با این وجود، با انتخاب مناسب ترکیب شیمیایی فلز پرکننده و با عملیات حرارتی بعدی اتصال می‌توان این خواص را بهبود بخشید. نتیجه این ملاحظات، به نوع آلیاژ و چرخه‌های حرارتی بستگی دارد. به عنوان مثال، ممکن است با پیشگرم منطقه جوش، قبل از جوشکاری، نرخ سرمایش کنترل و کاهش یابد. پیش گرم کردن از اهمیت ویژه‌ای برای فلزات با هدایت حرارتی بالا، مانند آلومینیوم و مس برخوردار است، زیرا در غیر این صورت گرما می‌تواند به سرعت در حین جوشکاری از بین برود.

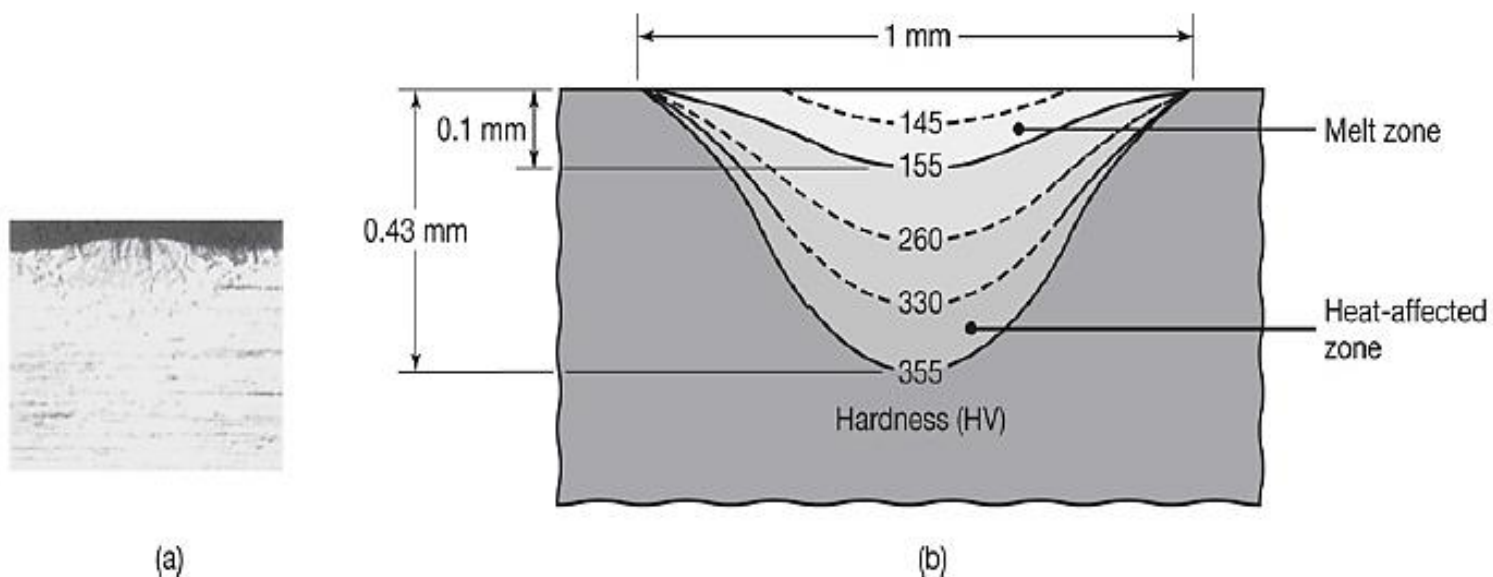


Figure 12.19

(a) Weld bead on a cold-rolled nickel strip produced by a laser beam. (b) Microhardness profile across the weld bead. Note the lower hardness of the weld bead as compared with the base metal.

منطقه متأثر از حرارت (HAZ)

ریزساختار این منطقه متفاوت از فلز پایه است، زیرا طی مدت زمان جوشکاری در معرض درجه حرارت بالا قرار دارد. نواحی از فلز پایه که از منبع گرما بسیار دور هستند، در هنگام جوشکاری هیچ تغییر ساختاری چشمگیری را متحمل نمی‌شوند. خصوصیات و ریزساختار HAZ به (الف) حرارت ورودی و نرخ سرمایش، (ب) ماکزیمم دمایی که حین جوشکاری در این منطقه تجربه شده است و (ج) اندازه دانه اولیه، جهت‌گیری دانه، میزان کار سرد قبلی و گرمای ویژه (C_p) و هدایت حرارتی (k) فلزات بستگی دارد.

استحکام و سختی منطقه متأثر از حرارت نیز تا حدودی به چگونگی توسعه استحکام و سختی آلیاژ موردنظر قبل از جوشکاری بستگی دارد. استحکام فلزات از طریق کار سرد، محلول جامد، رسوب‌سختی یا سایر روش‌های عملیات حرارتی بهبود می‌یابد. در بین فلزات تقویت شده با این روش‌ها، ساده‌ترین بررسی زمانی است که فلز پایه پیش از جوشکاری، تحت کار سرد قرار گرفته باشد، مانند نورد یا فورج سرد. حرارت اعمال شده در هنگام جوشکاری باعث تبلور مجدد دانه‌های کشیده شده فلز پایه کار شده می‌شود. دانه‌هایی که از فلز جوش دور هستند، به دانه‌های ریز هم‌محور مجدداً تبلور می‌یابند، اما آنهایی که نزدیک به فلز جوش هستند، در حالی که برای مدت زمان طولانی‌تری در معرض درجه حرارت بالا قرار گرفته‌اند، رشد خواهند کرد. رشد دانه باعث یک منطقه نرم‌تر و با استحکام پایین‌تر خواهد شد. این منطقه از HAZ ضعیف‌ترین ناحیه اتصال خواهد بود.

جوش پذیری (Weldability)

جوش پذیری معمولاً به عنوان **(الف)** توانایی فلز برای جوشکاری به یک سازه معین با خواص و ویژگی‌های مشخص و **(ب)** توانایی سازه جوشکاری شده برای برآورده کردن نیازهای سرویس تعریف می‌شود. جوش پذیری متغیرهای مختلفی را شامل می‌شود: **ویژگی‌های مواد** مانند عناصر آلیاژی، ناخالصی‌ها، آخال‌ها، ساختار دانه و تاریخچه فرآوری فلز پایه و فلز پرکننده، که همگی مهم هستند. عوامل دیگر عبارتند از: استحکام، چقرمگی، شکل پذیری، حساسیت به فاق، مدول الاستیک، گرمای ویژه، نقطه ذوب، انبساط حرارتی، خصوصیات کشش سطحی فلز مذاب و خوردگی.

آماده‌سازی سطح، با توجه به ماهیت و خواص فیلم‌های اکسیدی سطحی و گازهای جذب شده از اهمیت زیادی برخوردار است. **فاکتورهای دیگر (روش جوشکاری)**، گازهای محافظ، فلاکس‌ها، میزان رطوبت پوشش روی الکترودها، سرعت جوشکاری، موقعیت جوشکاری، سرعت سرد شدن، پیش گرم کردن و تکنیک‌های پسگرم (مانند کاهش تنش‌های پسماند و عملیات‌های حرارتی دیگر) هستند.

لیست زیر، به ترتیب حروف الفبا، جوش‌پذیری گروه‌های مختلف فلزات را به طور خلاصه بیان می‌کند. جوش‌پذیری آنها می‌تواند به طور قابل‌توجهی متفاوت باشد، با توجه به اینکه بعضی از آنها به تکنیک‌های مخصوص جوشکاری و کنترل مناسب کلیه متغیرهای فرآوری نیاز دارند.

(۱) آلیاژهای آلومینیوم: با نرخ بالایی از حرارت ورودی جوش‌پذیر هستند. آلیاژهای حاوی روی یا مس به طور کلی غیرقابل جوشکاری محسوب می‌شوند.

(۲) چدن‌ها: به طور کلی قابل جوشکاری است (با ملاحظات متعدد).

(۳) آلیاژهای مس: مشابه آلیاژهای آلومینیوم.

(۴) سرب: جوش‌پذیر.

(۵) آلیاژهای منیزیم: با استفاده از گاز محافظ و فلاکس محافظ جوش‌پذیر هستند.

(۶) مولیبدن: در شرایط کنترل شده جوش‌پذیر.

(۷) آلیاژهای نیکل: به کلی جوش‌پذیر جوش‌پذیر (با ملاحظات متعدد)

(۸) نایوبیوم (کلمبیوم): در شرایط کنترل شده جوش‌پذیر.

(۹) فولادهای زنگ‌نزن: جوش‌پذیر.

(۱۰) فولادهای گالوانیزه و از قبل روانکاری شده (Prelubricated): وجود پوشش روی و لایه روانساز به طرز منفی بر قابلیت جوشکاری

تأثیر می‌گذارد.

- (۱۱) فولادهای کربنی ساده: (الف) قابلیت جوشکاری عالی برای فولادهای کم کربن. (ب) قابل جوشکاری مناسب برای فولادهای کربن متوسط؛ (ج) جوش پذیری ضعیف برای فولادهای پر کربن.
- (۱۲) فولادهای کم آلیاژی: جوش پذیری متوسط تا خوب.
- (۱۳) فولادهای پرآلیاژی: به طور کلی جوش پذیری خوب در شرایط کنترل شده.
- (۱۴) تانتالوم: جوش پذیر در شرایط کنترل شده.
- (۱۵) قلع: جوش پذیر.
- (۱۶) آلیاژهای تیتانیوم: با استفاده از گازهای محافظ مناسب، جوش پذیر هستند.
- (۱۷) تنگستن: جوش پذیر در شرایط کنترل شده.
- (۱۸) روی: جوشکاری دشوار. لحیم کاری ارجح است.
- (۱۹) زیرکونیوم: با استفاده از گازهای محافظ مناسب جوش پذیر است.

(۹) عیوب جوش (Weld Defects)

عیب چیست؟ کیفیت یا کمیتی از ماده یا سازه است که مورد قبول استاندارد نباشد.

انواع عیوب جوشکاری: ۱- تکنیکی، ۲- متالورژیکی، ۳- مکانیکی

(۱) **تخلخل (Porosity)** در جوش‌ها ممکن است ناشی از (الف) گازهای به دام افتاده باشد که در حین ذوب منطقه جوش آزاد می‌شوند اما در هنگام انجماد منطقه جوش به دام افتاده‌اند. (ب) واکنش‌های شیمیایی که در هنگام جوش رخ می‌دهد. (ج) آلاینده‌های موجود در منطقه جوش. اغلب اتصالات جوش داده شده دارای مقداری تخلخل، عموماً به شکل **کروی** یا **حفره‌های کشیده** شده هستند. توزیع تخلخل‌ها ممکن است **تصادفی** باشد یا ممکن است در یک منطقه خاص **متمرکز** شود. وجود **هیدروژن** خصوصاً مهم است که ممکن است به دلیل استفاده از فلاکس **مرطوب** یا **رطوبت محیطی** باشد. تخلخل در جوش‌های **آلیاژ آلومینیوم**، مثالی از نتیجه این نوع ناپیوستگی است. تخلخل در جوش‌ها با روش‌های زیر قابل کاهش است:

(الف) انتخاب صحیح فلز پرکننده؛

(ب) پیش گرم کردن سطح جوش یا افزایش نرخ حرارت ورودی.

(ج) تمیز کردن منطقه جوش و جلوگیری از ورود آلاینده‌ها به منطقه جوش؛

(د) کاهش سرعت جوشکاری، جهت فرصت دادن به گازها برای خروج از جوش.

۲) آخال‌ها سرباره‌ای (Slag inclusions). این آخال‌ها ممکن است در ناحیه جوش به دام بیفتند. اگر گازهای محافظ استفاده شده مؤثر نباشند، آلودگی از محیط ممکن است در تشکیل آخال سرباره کمک کند. حفظ شرایط جوشکاری مناسب نیز مهم است. به عنوان مثال، وقتی از تکنیک‌های مناسب استفاده می‌شود، سرباره به سطح فلز جوش مذاب می‌رود و به دام نمی‌افتد. از آخال‌های سرباره یا سرباره گیرافاده ممکن است با روش‌های زیر جلوگیری شود:

(الف) تمیز کردن سطح مهره جوش قبل از رسوب لایه بعدی، به طور معمول با استفاده از یک برس سیمی.

(ب) تأمین گاز محافظ کافی؛

(ج) طراحی مجدد اتصال به نحوی که فضای کافی برای دستکاری (Manipulation) مناسب حوضچه فلز جوش مذاب وجود داشته باشد.

۳) ذوب ناقص و نفوذ ناقص (Incomplete fusion and incomplete penetration). ذوب ناقص (ذوب ناکافی)

مهره‌های جوش ضعیفی ایجاد می‌کند، مانند مواردی که در شکل زیر نشان داده شده است. جوشکاری عاری ذوب ناقص با روش‌های زیر حاصل می‌شود:

(الف) افزایش دمای فلز پایه؛ (ب) تمیز کردن محل جوش قبل از جوشکاری؛ (ج) اصلاح طرح اتصال؛ (د) تغییر نوع الکترود؛ (ه) تأمین گاز محافظ کافی.

نفوذ ناقص هنگامی اتفاق می‌افتد که عمق اتصال جوش داده شده کافی نباشد. نفوذ با روش‌های زیر قابل بهبود است:

(الف) افزایش ورودی حرارت؛ (ب) کاهش سرعت جوشکاری؛ (ج) اصلاح طراحی اتصالات؛ (د) حصول اطمینان از اینکه سطح‌هایی که باید بهم متصل شوند، به درستی در جای خود قرار گرفته باشند.

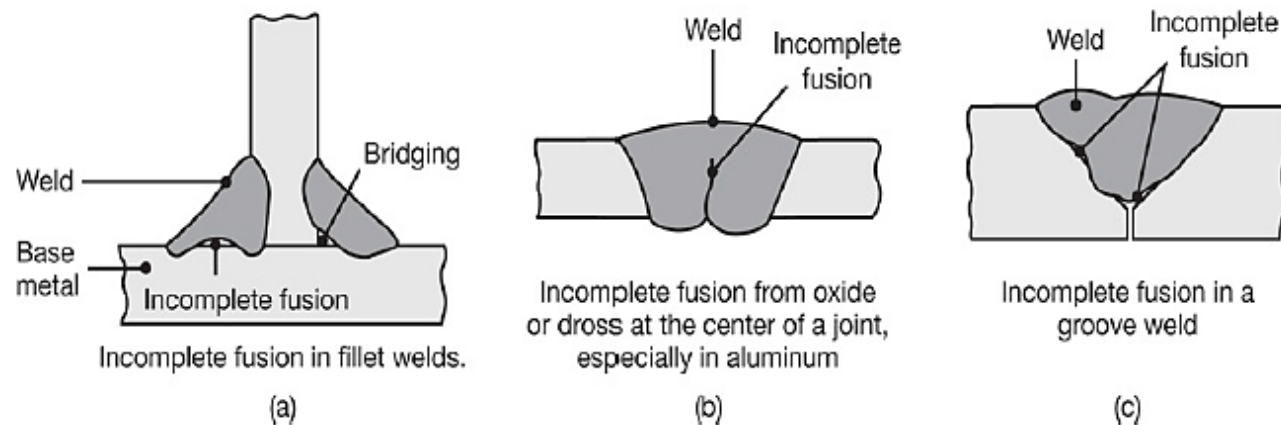


Figure 12.21

Examples of various incomplete fusion in welds.

۴- پر شدن ناکافی (Underfilling)، که در شکل زیر a نشان داده شده است، نتیجه عدم پر شدن اتصالات با مقدار مناسب فلز جوش است.

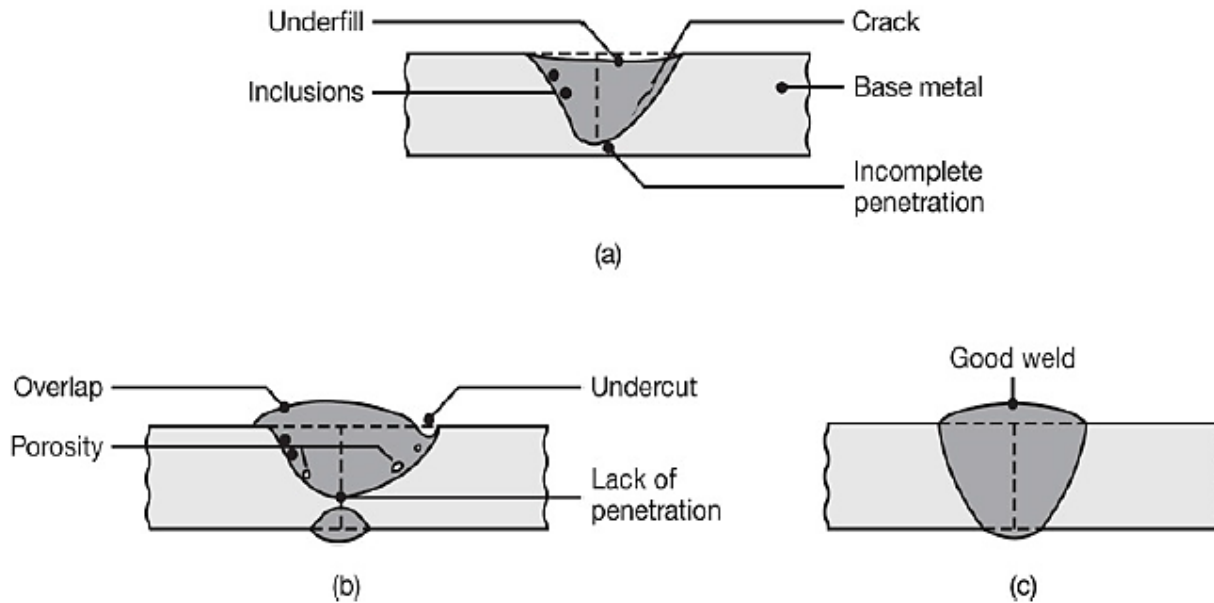


Figure 12.22

Examples of various defects in fusion welds.

۵- بریدگی لبه جوش (Undercutting) از ذوب شدن فلز پایه و توسعه بعدی شیار به شکل یک شکاف تیز حاصل می‌شود. اگر عمیق یا

تیز باشد، یک بریدگی لبه‌ی جوش می‌تواند به عنوان یک محل تمرکز تنش عمل کند و استحکام خستگی اتصال را کاهش دهد.

۶- همپوشانی (Overlap) (شکل فوق b) یک ناپیوستگی سطحی است که عموماً ناشی از عملکرد ضعیف جوشکاری و انتخاب نادرست

مواد درگیر در عملیات جوشکاری است. یک مهره جوش مناسب، بدون این نقص‌ها، در شکل فوق c نشان داده شده است.

۷- ترک‌ها (Cracks). ترک‌ها ممکن است در مکان‌ها و جهت‌های مختلف در مناطق مختلف جوش ایجاد شوند. انواع معمول

ترک‌ها عبارتند از: ترک‌های طولی، عرضی، دهانه جوش، زیر مهره و پنجه جوش (شکل زیر).

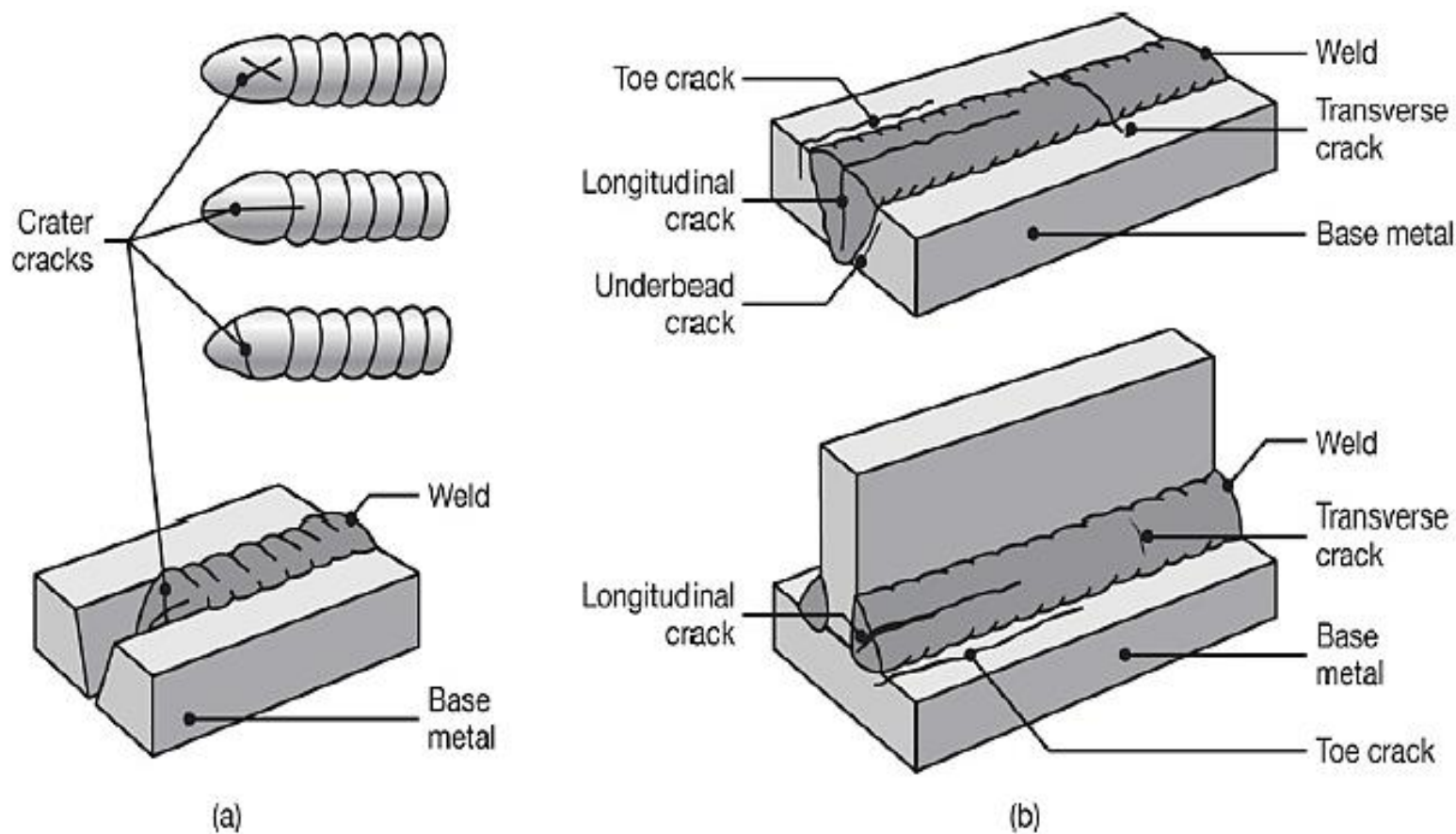


Figure 12.23

Types of cracks in welded joints. The cracks are caused by thermal stresses that develop during solidification and contraction of the weld bead and the welded structure: (a) crater cracks and (b) various types of cracks in butt and T joints.

علت ایجاد ترک: عدم تحمل کرنش توسط ساختار با انعطاف کم

انواع ترک: ۱- گرم ۲- سرد

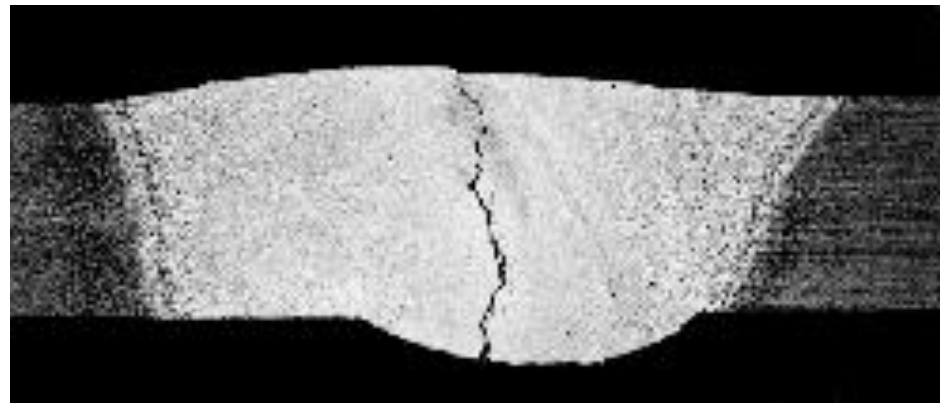
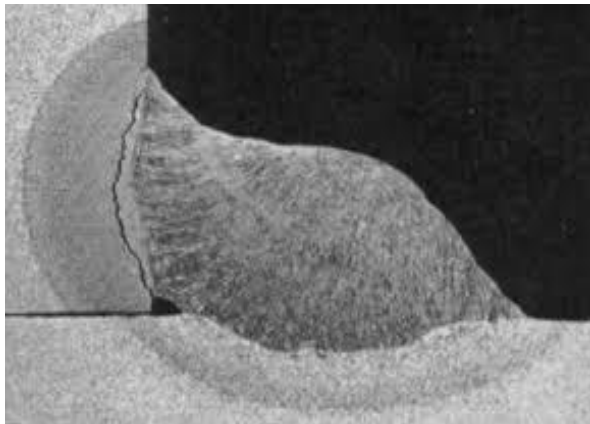
ترک‌ها در حالی با عنوان ترک‌های گرم (Hot cracks) طبقه‌بندی می‌شوند، که اتصالات هنوز در دمای بالا هستند و ترک‌ها توسعه پیدا می‌کنند. این در حالی است که ترک‌های سرد (Cold cracks) یا هیدروژنی پس از انجماد فلز جوش ایجاد می‌شوند. اقدامات پیشگیری از ترک عبارتند از:

الف) اصلاح طرح اتصال جهت به حداقل رساندن تنش‌های حرارتی ناشی از انقباض هنگام سرد شدن.

ب) تغییر متغیرهای فرآیند جوشکاری، رویه‌ها و توالی مراحل انجام شده؛

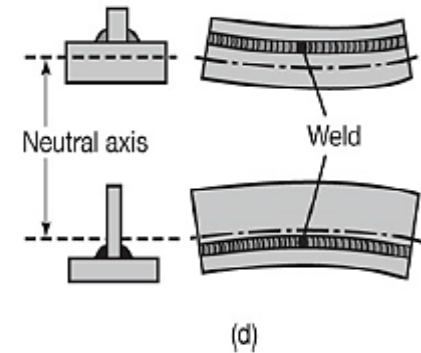
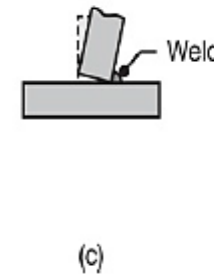
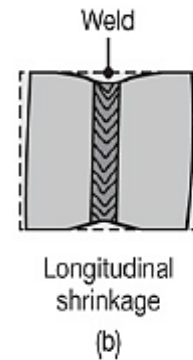
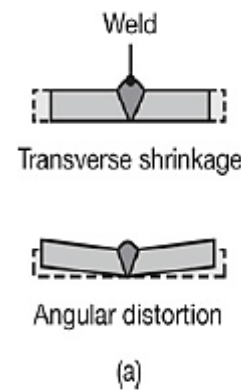
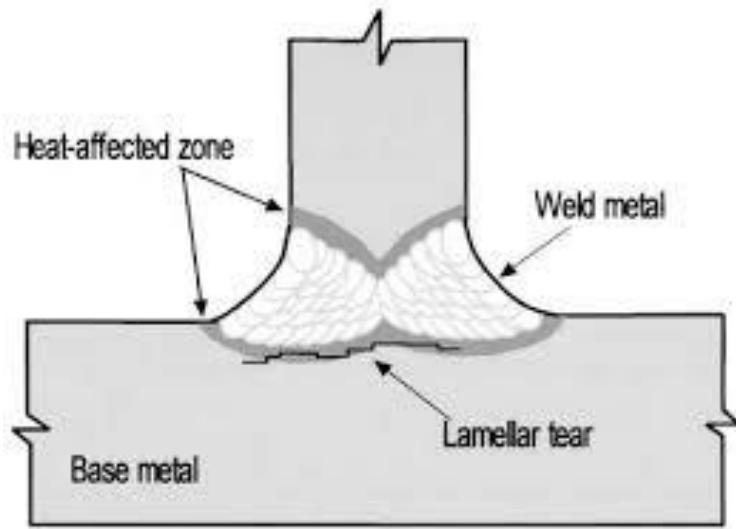
ج) پیش گرم کردن قطعاتی که قرار است جوش داده شوند؛

د) جلوگیری از سرد شدن سریع اجزاء اتصال بعد از جوشکاری.



۸- پارگی لایه‌ای (Lamellar tearing). به دلیل کشیدگی ناخالصی‌های غیرفلزی و آخال‌ها هنگام تغییر شکل پلاستیک فلزات، قطعه‌کار در یک جهت ضعیف‌تر از جهات دیگر است. این حالت که با عنوان Mechanical Fibering خوانده می‌شود، به ویژه در صفحات نورد و اشکال سازه‌ای یافت می‌شود. در جوشکاری چنین اجزایی، به دلیل انقباض اعضای مقید در سازه هنگام سرد شدن، ممکن است پارگی لایه‌ای ایجاد شود. با در نظرگیری انقباض اعضا یا اصلاح طرح اتصال به نحوی که مهره جوش تا حد بیشتری به عضو ضعیف نفوذ کند، می‌توان از این پارگی لایه‌ای جلوگیری کرد.

۹- تنش‌های پسماند (Residual stresses). به دلیل گرم و سرد شدن موضعی در هنگام جوشکاری، انبساط و انقباض ناحیه جوش باعث ایجاد تنش‌های پسماند می‌شود. تنش پسماند می‌تواند اثرات مخربی مانند: الف) اعوجاج، پیچ و تاب برداشتن قطعات جوشکاری شده (شکل زیر a-d). ب) ترک ناشی از خوردگی تنشی (SCC)؛ ج) کاهش عمر خستگی.



نوع و توزیع تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری: هنگامی که دو صفحه در حال جوشکاری هستند، یک منطقه باریک و طولانی در معرض دمای بالا قرار می‌گیرد، در حالی که کل صفحات در اصل در دمای محیط قرار دارند. با اتمام جوشکاری و گذشت زمان، گرمای ناحیه جوش به صورت جانبی درون صفحات توزیع می‌شود. صفحات سپس به طور طولی شروع به انبساط می‌کنند، در حالی که طول جوش داده شده شروع به انقباض می‌کند. این دو اثر متضاد باعث ایجاد تنش‌های پسماند می‌شوند که معمولاً مطابق شکل b توزیع می‌شوند. توجه داشته باشید که، همانطور که انتظار می‌رود، میزان تنش‌های پسماند فشاری در صفحات در محلی دور از منطقه جوش به صفر کاهش می‌یابند. از آنجا که هیچ نیروی خارجی روی صفحات جوش داده شده عمل نمی‌کند، نیروهای کششی و فشاری که توسط این تنش‌های پسماند نشان داده می‌شوند، باید یکدیگر را متعادل کنند.

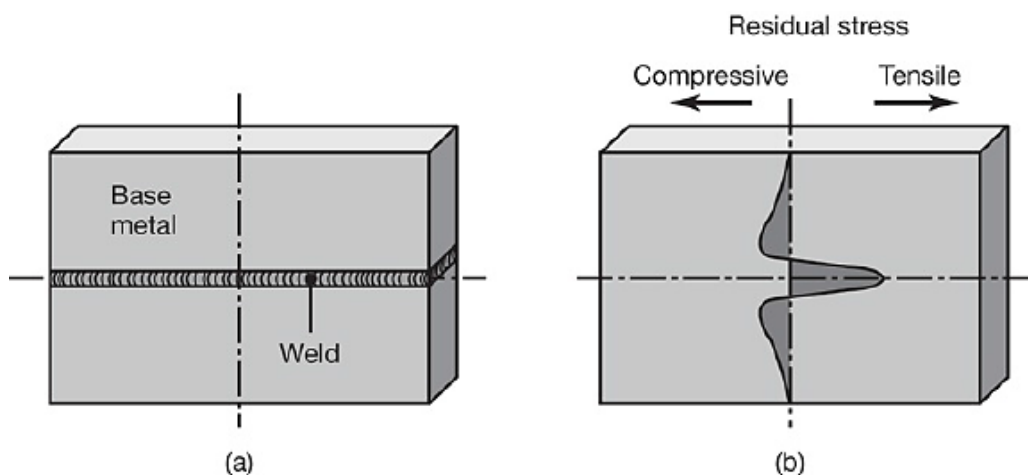


Figure 12.26
Residual stresses developed in a straight butt joint.

کاهش و آزاد کردن تنش‌های جوش (Stress relieving)

اثر تنش‌های پسماند مانند اعوجاج، کمانش و ترک خوردگی می‌تواند با پیش گرم کردن فلز پایه یا قطعاتی که قرار است جوشکاری شوند، کاهش یابد. پیش گرم کردن باعث کاهش اعوجاج از طریق کاهش سرعت سرد شدن و میزان تنش‌های حرارتی (با کاهش مدول الاستیک فلزات مورد جوشکاری) می‌شود. قطعات ممکن است در کوره یا به صورت شعله‌ای، الکتریکی یا القایی گرم شوند.

تنش پسماند می‌تواند از طریق آزاد کردن تنش از سازه جوش داده شده به روش تابکاری (Annealing) کاهش یابد. دما و زمان لازم برای کاهش تنش به نوع ماده و میزان تنش پسماند بستگی دارد.

روشهای دیگر کاهش تنش شامل ساچمه‌زنی، چکش زدن و نورد سطح مهره جوش است. برای جوش‌های چند پاسه، پاس‌های اول و آخر نباید ساچمه‌زنی شوند، زیرا ساچمه‌زنی ممکن است باعث آسیب به آن لایه‌ها شود.

مقدار کمی تغییر شکل پلاستیک نیز می‌تواند تنش‌های پسماند را کاهش داده یا از بین ببرد. این روش می‌تواند در مخازن تحت فشار جوش داده شده با اعمال فشار داخلی در مخازن و در نتیجه با تولید تنش‌های محوری و محیطی استفاده شود.

(۱۱) انتخاب فرآیند جوشکاری

1. جنس قطعه
2. ابعاد قطعه به خصوص ضخامت
3. وضعیت جوشکاری
4. محیط جوشکاری
5. طرح اتصال
6. دسترسی به محل جوش
7. شکل قطعه
8. خواص جوش حاصل
9. تعداد قطعات
10. امکانات موجود
11. آماده سازی قطعات قبل جوشکاری
12. هزینه جوش
13. سرعت عمل یا زمان
14. پیچیدگی و تاب و تنش های پسماند.