



بسم الله الرحمن الرحيم

آشنایی با فرآیندهای ساخت

فصل پنجم: اتصال مواد (۱)

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 فرایند جوشکاری

(۱) مقدمه‌ای بر روش‌های اتصال

اتصال (Joining)، یک اصطلاح عمومی و همه جانبه برای فرآیندهای متعددی است که در ساخت، مهم و کاربردی هستند. با بررسی محصولات مختلف مانند اتومبیل‌ها، دوچرخه‌ها، بردهای مدارهای چاپی، ماشین‌آلات و لوازم خانگی می‌توان به ضرورت اتصال‌دهی و مونتاژ قطعات پی برد. **اتصال‌دهی ممکن است برای یک یا چند دلایل زیر ترجیح داده شود:**

(۱) **تولید محصول بصورت یکپارچه، غیرممکن یا از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نباشد؛**

(۲) **تولید محصول بصورت مونتاژ، ساده‌تر و یا ارزان‌تر باشد؛**

(۳) **ممکن است محصول جهت تعمیر و نگهداری در طول عمر سرویس، از هم جدا شود؛**

(۴) **خواص مختلف ممکن است برای عملکرد محصول مورد نیاز باشد؛** به عنوان مثال، سطوحی که تحت

اصطکاک و سایش قرار می‌گیرند، یا در معرض خوردگی و حملات محیطی هستند، به طور معمول نیازمند ویژگی‌های متفاوتی نسبت دیگر اجزا هستند؛

(۵) **حمل و نقل محصول بصورت منفصل و مونتاژ بعدی آنها ممکن است آسان‌تر و ارزان‌تر از انتقال آن به**

عنوان یک محصول واحد باشد.

دسته‌بندی‌های زیادی برای فرآیندهای اتصال‌دهی وجود دارد. در این فصل، فرآیندهای اتصال طبق اصول مشترک عملیاتی آنها دسته‌بندی خواهند شد. اتصالات تولید شده (مواد اتصال) معمولاً تحت تغییرات متالورژیکی و فیزیکی قرار می‌گیرند که به نوبه خود تأثیرات مهمی در خواص و عملکرد اجزای جوش دارد.

۱- جوشکاری ذوبی (**Fusion welding**) شامل ذوب کردن و یکپارچه‌سازی مواد از طریق گرما است که معمولاً توسط منابع الکتریکی و یا دیگر منابع تأمین می‌شود. این فرآیندها شامل جوشکاری اکسیژن-گاز سوختی (*oxy-fuel gas welding*)، جوشکاری قوس الکترود مصرفی یا غیرمصرفی (*Consumable-or Nonconsumable-electrode arc welding*)، جوشکاری مقاومتی (*Resistance welding*) و جوشکاری با پرتوی پرنرژی (*High energy beam welding*) است.

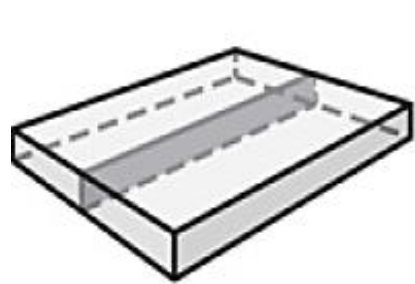
۲- جوشکاری حالت جامد (**Solid-state welding**) به فرآیندهایی اطلاق می‌شود که در برقراری اتصال توسط آنها، فاز مایع (ذوب) تشکیل نمی‌شود. این فرآیندها شامل جوشکاری سرد (*Cold welding*)، جوشکاری اولتراسونیک (*Ultrasonic welding*)، جوشکاری اصطکاکی (*Friction welding*)، جوشکاری انفجاری (*Explosion welding*) و جوشکاری نفوذی (*Diffusion welding*) هستند.

۳- **لحیم کاری سخت (Brazing)** و **لحیم کاری نرم (Soldering)** به دسته‌ای از فرآیندها اطلاق می‌شود که در آنها، اتصال از طریق ذوب فلز پرکننده (ماده پرکننده) و توزیع آن بین سطوح در تماس (غالباً با فاصله بسیار اندک) با استفاده از نیروی موئینگی (**Capillary action**) انجام می‌شود. در لحیم کاری سخت، دمای لیکوئیدوس ماده پرکننده **بالای 450°C** و زیر دمای سالییدوس فلز پایه و در لحیم کاری نرم، دمای لیکوئیدوس ماده پرکننده **زیر 450°C** و زیر دمای سالییدوس فلز پایه است. **بنابراین در هر دو، ذوب فلز پایه رخ نخواهد داد.**

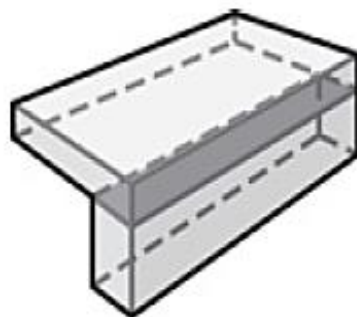
۴- **اتصال چسبی (Adhesive bonding)** بدلیل چندین مزیت منحصر به فرد آن در کاربردهایی که نیاز به استحکام خاص، آب‌بندی، عایق‌بندی، میرایی ارتعاش و **مقاومت در برابر خوردگی** بین فلزات همجنس یا غیرهمجنس دارد، تکنولوژی مهمی در صنعت بشمار می‌رود.

۵- **اتصال مکانیکی (Mechanical fastening)** به‌طور معمول شامل بکارگیری چفت و بست‌هایی نظیر پیچ و مهره‌ها، پرچ‌ها و خارها برای اتصال مواد پایه هستند. **اتصال مواد غیرفلزی** می‌تواند توسط ذوب کردن، نفوذ، اتصال چسبی و علی‌الخصوص اتصال‌دهی مکانیکی صورت گیرد.

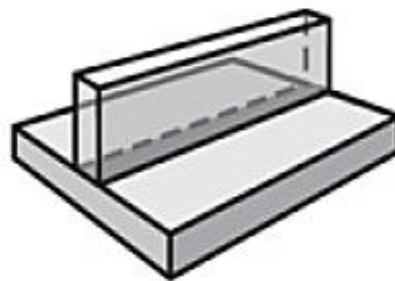
هر کدام از فرآیندهای اتصال دهی، چندین خصوصیات مهم شامل **طرح اتصال** (شکل زیر)، **شکل و اندازه قطعات اتصال**، **استحکام و میزان قابلیت اطمینان** (*Reliability*)، **هزینه، نگهداری تجهیزات و سطح مهارت نیروی کار** دارند (جداول در اسلاید بعد) که باید به آنها توجه کرد.



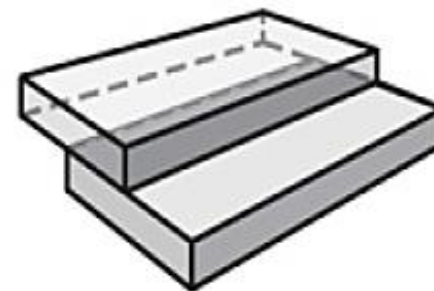
(a) Butt joint



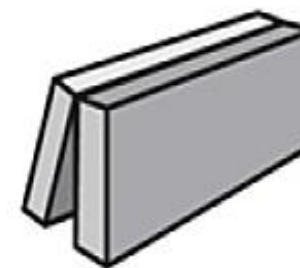
(b) Corner joint



(c) T joint



(d) Lap joint



(e) Edge joint

Examples of welded joints

Table a. Comparison of various joining methods

Method	Strength	Design variability	Small parts	Large parts	Tolerances	Reliability	Ease of maintenance	Visual inspection	Cost
Arc welding	1	2	3	1	3	1	2	2	2
Resistance welding	1	2	1	1	3	3	3	3	1
Brazing	1	1	1	1	3	1	3	2	3
Bolts and nuts	1	2	3	1	2	1	1	1	3
Riveting	1	2	3	1	1	1	3	1	2
Fasteners	2	3	3	1	2	2	2	1	3
Seaming, crimping	2	2	1	3	3	1	3	1	1
Adhesive bonding	3	1	1	2	3	2	3	3	2

Note: 1, very good; 2, good; 3, poor

Table b. General characteristics of joining processes

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

*1, highest; 5, lowest

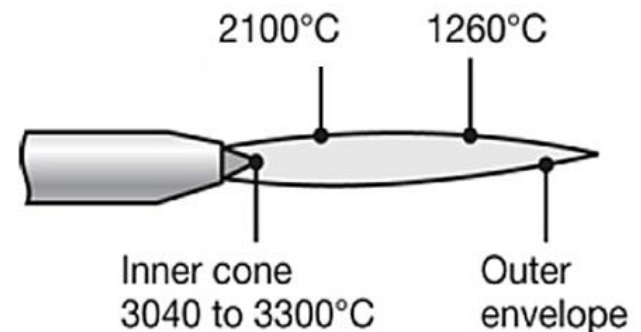
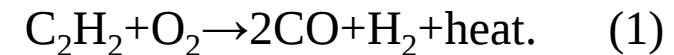
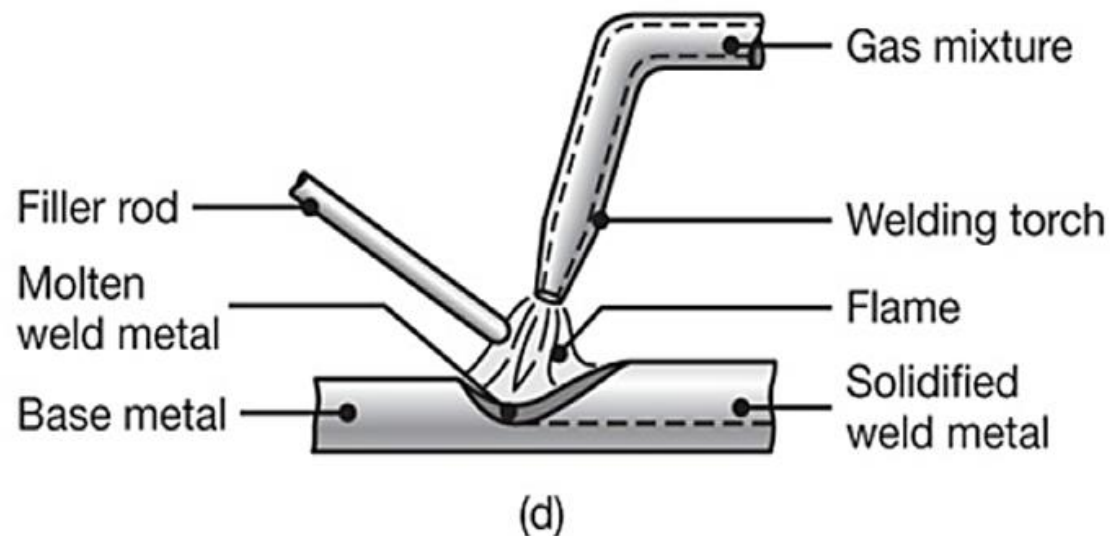
(۲) جوشکاری با روش‌های شیمیایی

جوشکاری اکسیژن-گاز سوختی (Oxyfuel Gas Welding)

در اوایل دهه ۱۹۰۰ توسعه یافت. جوشکاری اکسیژن-گاز سوختی (OxyFuel Gas Welding (OFW)) یک اصطلاح عمومی برای توصیف هر فرآیند جوشکاری است که با استفاده از **یک گاز سوختی همراه با اکسیژن** برای تولید شعله به عنوان **منبع گرما** مورد نیاز برای ذوب کردن فلزات در اتصال مورد استفاده قرار می‌گیرد.

رایج‌ترین گاز سوختی مورد استفاده، **گاز استیلن** است؛ این فرآیند به عنوان جوشکاری اکسی‌استیلن (OAW) شناخته می‌شود و معمولاً برای ساخت سازه‌ها، فریم‌های خودرو و کارهای متنوع تعمیراتی استفاده می‌شود.

گرما تولید شده در OAW نتیجه احتراق گاز استیلن (C_2H_2) با اکسیژن، مطابق با **یک جفت واکنش شیمیایی** است. **احتراق اولیه** که در هسته داخلی شعله اتفاق می‌افتد (شکل زیر). این واکنش **استیلن را به منواکسید کربن و هیدروژن تجزیه می‌کند و حدود دو سوم کل حرارت تولید شده** در شعله را تولید می‌کند. فرآیند احتراق ثانویه نیز وجود دارد. این واکنش حدود **یک سوم کل گرما** را تولید می‌کند. باید توجه داشت که **واکنش، بخار آب** نیز تولید می‌کند. این بخش (بیرونی) عمل محافظت را هم انجام می‌دهد. درجه حرارت در شعله می‌تواند به **۳۳۰۰ درجه سانتیگراد** برسد.



انواع شعله

نسبت استیلن و اکسیژن در مخلوط گاز عامل مهمی در جوشکاری اکسی استیلن است. در نسبت ۱:۱ (زمانی که اکسیژن اضافی وجود ندارد)

شعله خنثی است (شکل a). پرکاربردترین نوع شعله است. با مصرف اکسیژن بیشتر، شعله اکسیدی خواهد شد (شکل b) و می تواند به خصوص

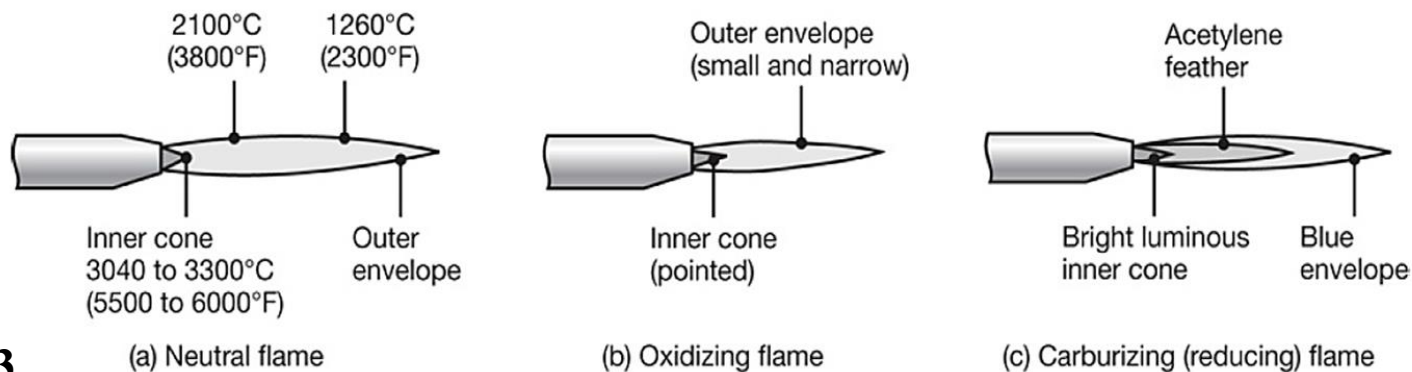
برای فولادها مضر باشد. تنها در جوشکاری مس و آلیاژهای پایه مس یک شعله اکسید کننده مطلوب است، زیرا یک لایه حفاظتی نازک از

سرباره (ترکیبات اکسیدهای مختلف، فلاکس، مواد پوشش الکتروود) روی فلز مذاب شکل می گیرد. هنگامی که اکسیژن برای احتراق کامل کافی

نیست (داشتن استیلن بیش از حد)، شعله احیایی و یا اصطلاحاً یک شعله کربوره کننده شناخته خواهد شد (شکل c)؛ دمای این شعله پایین تر

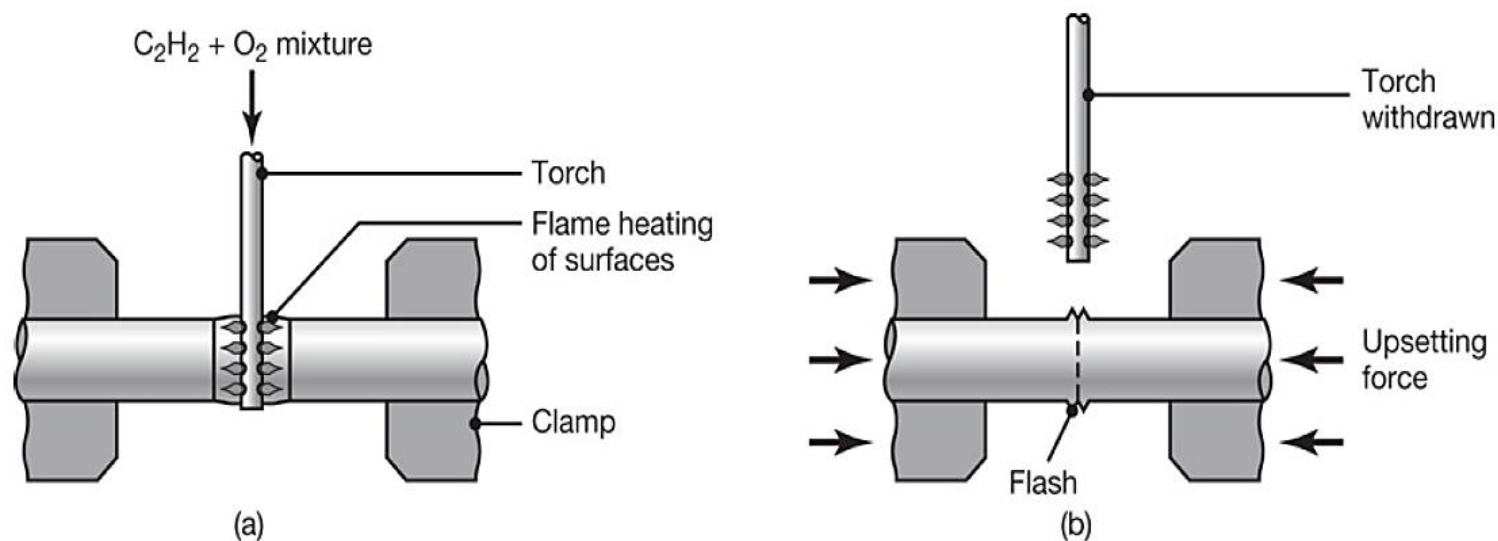
است، بنابراین شعله های کربوره کننده برای کاربردهایی که حرارت کمی نیاز دارند، مانند لحیم کاری سخت، لحیم کاری نرم و عملیات

سخت کاری سطح توسط شعله، مناسب هستند.



جوشکاری فشار گاز (Pressure gas welding)

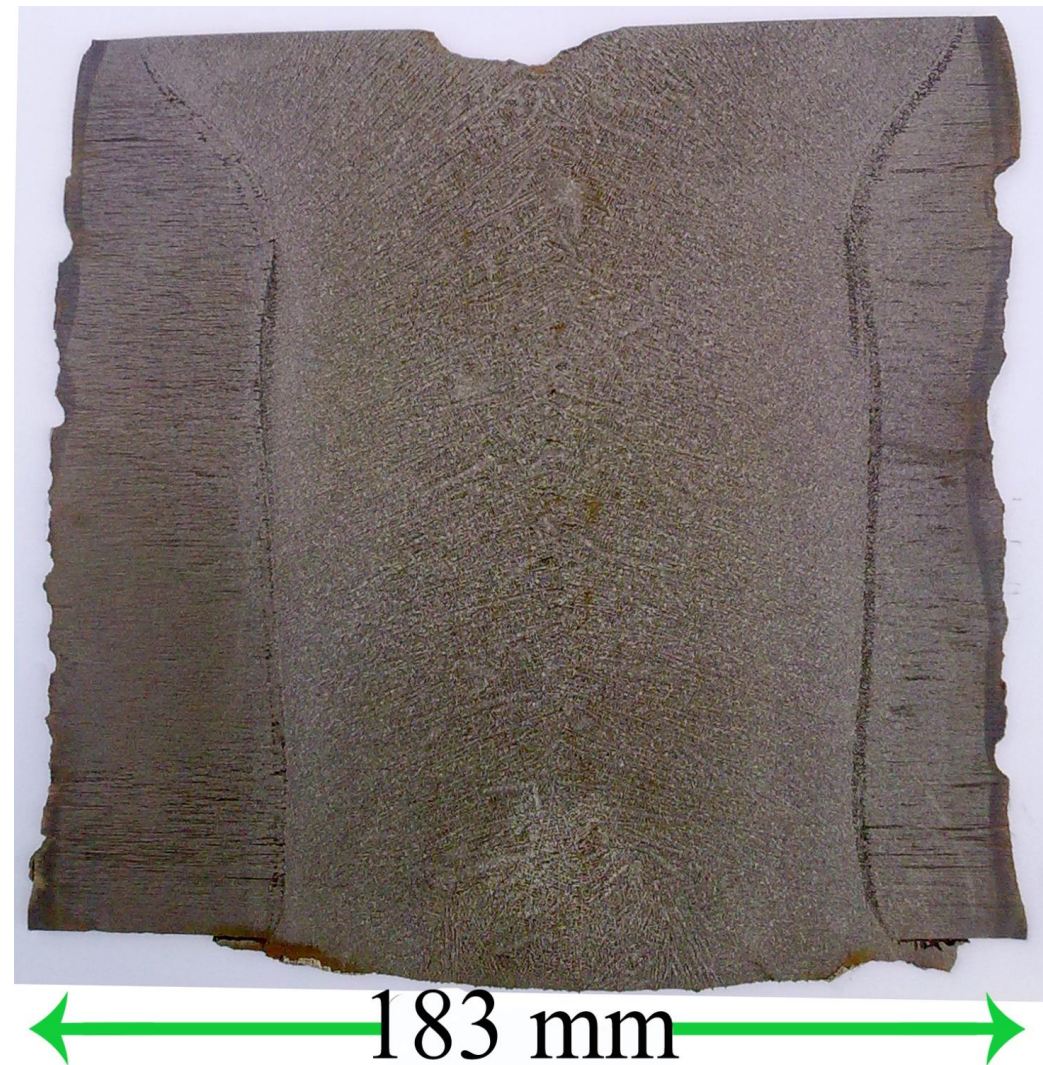
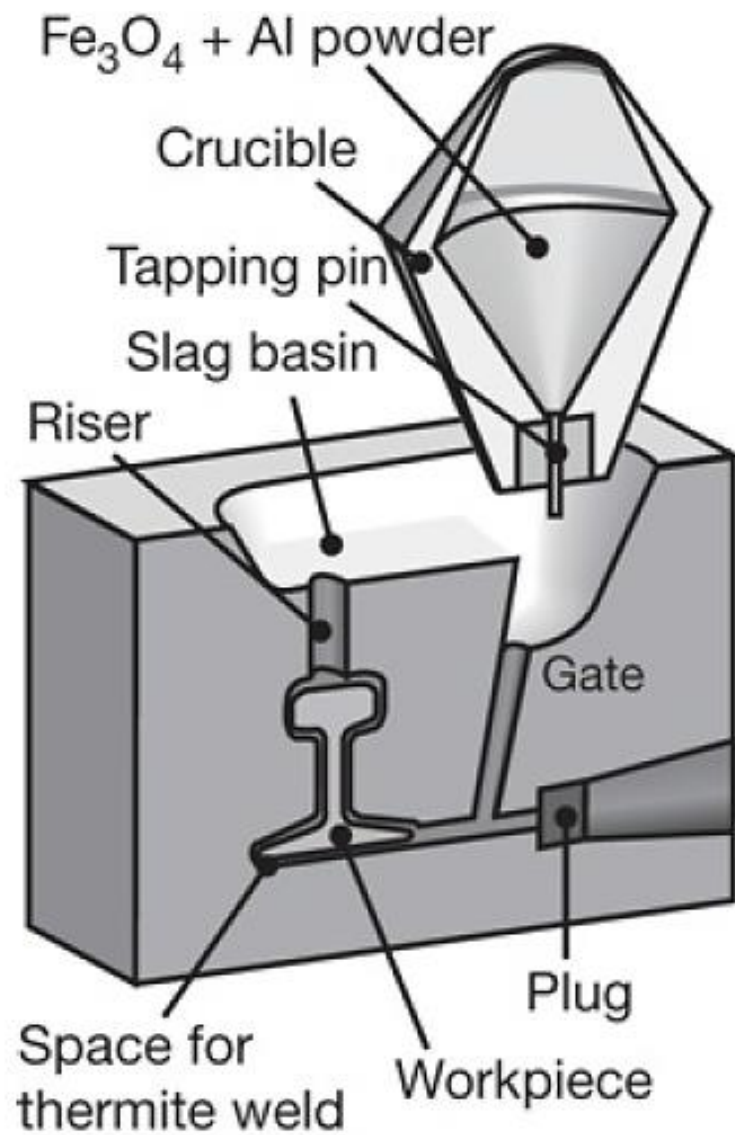
در این روش، فصل مشترک دو جزئی که قرار است جوش داده شوند با استفاده از یک مشعل گرم می‌شوند، معمولاً با استفاده از یک مخلوط گاز اکسی‌استیلن (شکل a). هنگامی که فصل مشترک شروع به ذوب شدن می‌کند، مشعل خارج می‌شود و جهت فشار دادن دو جزء به هم نیروی محوری اعمال می‌شود. (شکل b). این نیرو تا زمانی که فصل مشترک جامد شود، حفظ می‌شود.



Schematic illustration of the pressure gas welding process; (a) before, and (b) after. Note the formation of a flash at the joint, which can later be trimmed off.

جوشکاری ترمیت (Thermit welding)

همچنین به عنوان جوشکاری گرمازا (*Exothermic welding*) شناخته شده و در سال ۱۸۹۵ توسعه یافت. این فرآیند شامل مخلوط کردن یک پودر فلزی با اکسید فلزی، با استفاده از منبع احتراق دمای بالا برای ایجاد واکنش احیا-اکسیداسیون است (شکل بعد). یک روش معمول در این فرآیند استفاده از پودر اکسید آهن (زنگ آهن) در ترکیب با پودر آلومینیوم است. پس از شروع احتراق بوسیله شعله منیزیم، واکنش شیمیایی، اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) و آهن را تشکیل می‌دهد. ترکیب چند پودر و اکسید می‌تواند در جوش ترمیت استفاده شود، اما پودر آلومینیوم همراه با اکسید آهن، به علت استفاده گسترده در اتصال ریل راه آهن، متداول‌ترین هستند. برخی از اکسیدهای مس و منیزیم اغلب برای بهبود اشتعال‌پذیری افزوده می‌شوند. کاربردهای دیگر این فرآیند شامل جوشکاری سیم‌های مسی با قطر بزرگ و تعمیر تجهیزات بزرگ، مانند فریم‌های محور لوکوموتیو است.



۳) جوشکاری قوس الکتریکی با الکتروود (سیم جوش) مصرفی

در جوشکاری قوسی، که در قرن ۱۹ توسعه یافته، گرما مورد نیاز از **قوس الکتریکی** به دست می‌آید. با استفاده از یک میله مصرفی یا غیرمصرفی یا یک الکتروود سیمی، قوس بین نوک الکتروود و قطعات جوشکاری با استفاده از منبع تغذیه AC یا DC تولید می‌شود.

۳-۱) حرارت در جوشکاری قوسی: حرارت ورودی در جوشکاری قوسی می‌تواند از طریق معادله ۳ محاسبه شود. در این معادله فوق H حرارت ورودی بر حسب ژول، l طول جوش، V ولتاژ اعمال شده، I جریان به آمپر و v سرعت جوشکاری است. e بازده فرآیند است و از حدود ۷۵٪ برای جوشکاری قوس الکتروود دستی تا ۹۰٪ برای فرآیند جوشکاری زیر پودری متفاوت است. بازده فرآیند نشان می‌دهد که تمام انرژی قوس برای ذوب مواد استفاده نمی‌شود و مقداری از گرمای ایجاد شده از طریق قطعه کار و مقداری نیز از طریق تابش و همرفت به محیط اطراف، هدر خواهد رفت. همچنین حرارت ورودی بیان شده در معادله ۳ می‌تواند به صورت معادله ۴ نیز توصیف شود که در آن، u گرمای ویژه مورد نیاز برای ذوب (در واحد حجم) و A مساحت مقطع عرضی جوش است. مقادیر u معمول در جدول بعد آمده است.

$$H/l = eVI/v \quad (3)$$

$$u = \frac{H}{Al} = \frac{eVI}{Av} \quad (4)$$

Table c. Approximate specific energies required to melt a unit volume of commonly welded metals

Material	Specific Energy, u	
	J/mm ³	BTU/in ³
Aluminum alloys	2.9	41
Cast irons	7.8	112
Copper	6.1	87
Bronze	4.2	59
Magnesium	2.9	42
Nickel	9.8	142
Steels	9.7	137
Stainless steels	9.4	135
Titanium	14.3	204

اگرچه این معادلات برای **جوشکاری قوسی** توسعه یافته‌اند، روابط مشابهی می‌توان برای دیگر فرآیندهای **جوشکاری ذوبی**، با در نظر گرفتن تفاوت‌ها در هندسه منطقه جوش و بازدهی فرآیند، بدست آورد. u به خواص **ترموفیزیکی** ماده بستگی دارد.

مثال ۱: یک فرآیند جوشکاری با ولتاژ ۲۰ V و شدت جریان ۱۰۰ A در حال انجام است که مساحت مقطع عرضی دکه جوش ۳۰ mm² است. اگر قطعه کار و الکترود از جنس (a) آلومینیوم، (b) فولاد ساده کربنی، و (c) تیتانیوم باشند، سرعت جوشکاری را برای هر حالت تخمین بزنید. بازدهی فرآیند را ۷۵٪ در نظر بگیرید.

Solution:

For aluminum, note from Table c that the specific energy required is $u = 2.9 \text{ J/mm}^3$. From Eq. (12.5) then:

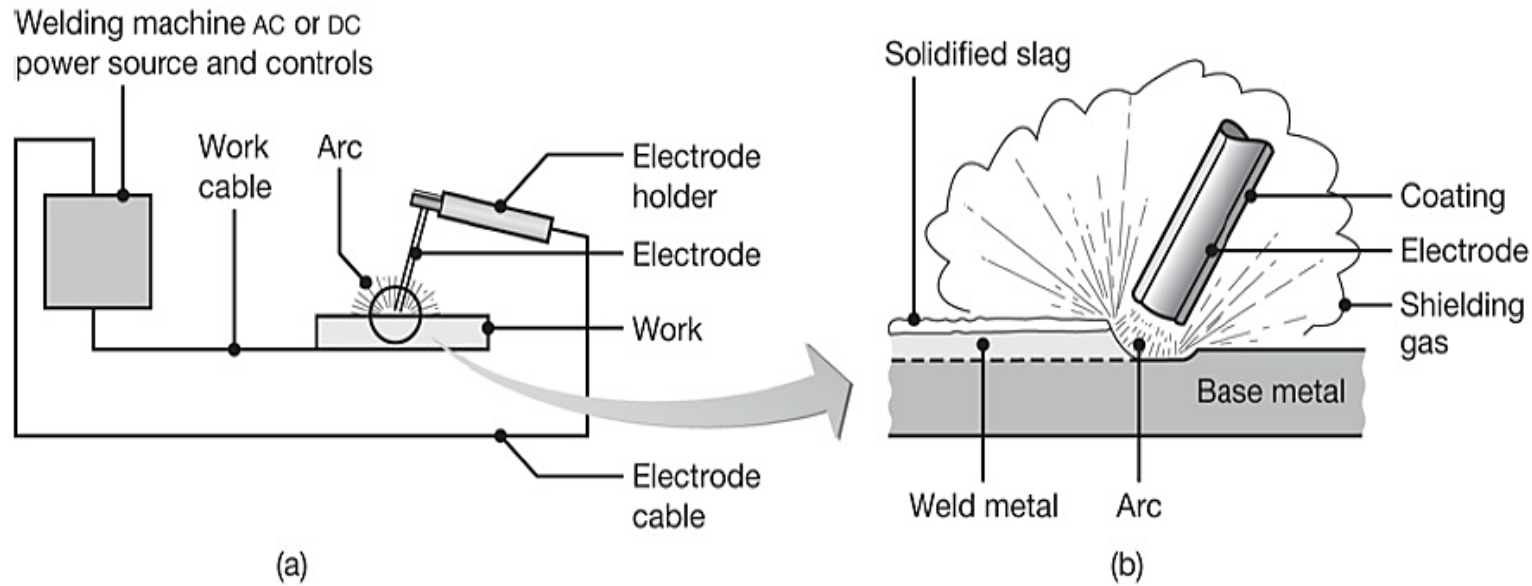
$$v = eVI/uA = (0.75)(20)(200)/(2.9)(30) = 34.5 \text{ mm/s}.$$

Similarly, **for carbon steel**, u is taken from Table c as 9.7 J/mm^3 , leading to $v = 10.3 \text{ mm/s}$.

For titanium, $u=14.3 \text{ J/mm}^3$, so that $v = 7.0 \text{ mm/s}$.

جوشکاری قوسی فلز محافظت شده یا الکتروود دستی (Shielded Metal Arc Welding-SMAW)

جوشکاری قوسی فلز محافظت شده (SMAW) یکی از قدیمی‌ترین، ساده‌ترین و فراگیرترین فرآیندهای اتصال است. امروزه **نیمی از جوشکاری‌های صنعتی** توسط این فرآیند انجام می‌شود. قوس الکتریکی با تماس نوک یک الکتروود پوشش‌دار با قطعه کار ایجاد می‌شود و سپس الکتروود به سرعت به یک فاصله کافی جهت پایداری قوس به عقب کشیده می‌شود (شکل a). **گرمای ایجاد شده بخشی از نوک الکتروود، پوشش آن و فلز پایه در مجاورت قوس را ذوب می‌کند.** فلز جوش پس از انجماد فلز مذاب (مخلوطی از فلز پایه، فلز الکتروود و پوشش الکتروود) در ناحیه جوشکاری شده، شکل می‌گیرد. پوشش الکتروود علاوه بر اکسیدزدایی، گازی محافظ برای محافظت از این ناحیه در برابر اکسیژن محیط، فراهم می‌کند.



در این فرآیند، بخش بدون پوشش انتهای الکترود به یک ترمینال منبع انرژی متصل می‌شود، در حالی که ترمینال دیگر به قطعه‌ای که قرار است جوش داده شود، متصل می‌شود (شکل b). جریان معمولاً بین ۵۰ تا ۳۰۰ آمپر است و توان آن معمولاً کمتر از ۱۰ کیلو وات است. **جریان بیش از حد پایین باعث ذوب ناقص می‌شود و جریان بیش از حد بالا می‌تواند پوشش الکترود را تخریب کند و تاثیرگذاری آن را کاهش دهد. رابطه شدت جریان با قطر الکترود و پوزیشن جوشکاری؟**

جریان ممکن است AC یا DC باشد؛ برای جوشکاری ورق فلزی، جریان DC به دلیل ایجاد قوس پایدار ترجیح داده می‌شود.

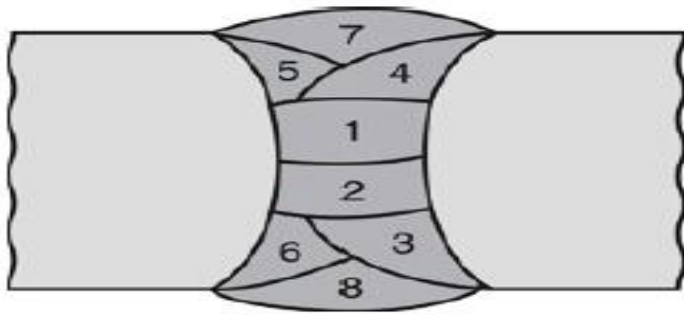
قطبیت (جهت جریان) جریان DC به عواملی مانند نوع الکتروود (مصرفی یا غیرمصرفی)، فلز پایه و عمق نفوذ مطلوب بستگی دارد.

در قطبیت مستقیم DCEN (straight polarity)، قطعه کار مثبت و الکتروود منفی است؛ این قطبیت به دلیل عمق نفوذ عمیق تر برای جوشکاری ورق های ضخیم ترجیح داده می شود.

در قطبیت معکوس DCEP (reverse polarity)، الکتروود مثبت و قطعه کار منفی است و نفوذ جوش کم تر است.

هنگامی که جریان AC است، قوس به سرعت نوسان می کند و شرایطی است که برای جوشکاری قطعات ضخیم، با استفاده از الکتروودهای با قطر بزرگتر و جریان الکتریکی بالاتر مناسب است.

فرآیند SMAW در ساختمان‌سازی، کشتی‌سازی، ایجاد خطوط لوله و همچنین برای کارهای تعمیر و نگهداری استفاده می‌شود، زیرا تجهیزات آن قابل حمل هستند و می‌توانند به راحتی حفظ و نگهداری شوند. این فرآیند برای کار در مناطق دور افتاده بسیار مفید است، چرا که ژنراتورهای سوختی (fuel-powered generators) قابل حمل می‌توانند به عنوان منبع تغذیه مورد استفاده قرار گیرند. این فرآیند برای جوشکاری قطعه‌کارهایی با ضخامت ۳-۲۰ میلی‌متر مناسب است، هرچند این محدوده به راحتی می‌تواند با استفاده از تکنیک جوشکاری چندپاسه گسترش یابد (شکل ۱۲.۶). باید توجه کرد که پاک‌کردن سرباره پس از تکمیل هر مهره جوشکاری در فرآیند SMAW امری ضروری است. در صورتی که به طور کامل برداشته نشود، سرباره جامد شده می‌تواند باعث ایجاد خوردگی شدید منطقه جوش شود و سپس به شکست سازه جوشی منجر شود. لذا هزینه‌های کارگر همانند هزینه‌های مواد در SMAW می‌تواند نسبتاً بالا است.



A weld zone showing the build-up sequence of individual weld beads in deep welds.

مثال ۲: یک عملیات جوشکاری به روش SMAW با الکتروود فولادی و ولتاژ ۲۰ ولت منبع تغذیه، روی یک قطعه کار فولادی انجام شده است. اگر جوشی با مقطع عرضی مثلثی شکل و ساق جوش ۱۰ mm ایجاد شده باشد، جریان مورد نیاز برای جوشکاری با سرعت ۱۰ mm/s را محاسبه نمایید (بازده جوشکاری ۷۵٪ در نظر گرفته شود).

Solution:

The cross-sectional area of the weld is calculated from the given geometry as:

$$A = \frac{bh}{2} = \frac{(10)(10)}{2} = 50 \text{ mm}^2.$$

The specific energy needed to melt the steel electrode is taken from Table 12.3 as 10.3 J/mm². Therefore, Eq. (12.5) yields:

$$v = eVI/uA \rightarrow I = vuA/eV = (10)(10.3)(50)/(0.75)(20) = 343 \text{ A}.$$

الکترودهای مصرفی برای جوشکاری قوسی الکترو دستی

الکترو دو بخش دارد: هسته فلزی و پوشش سرامیکی. هنگام جوشکاری، هسته ذوب شده و پس از اختلاط با فلز پایه، فلز جوش را ایجاد می‌کند. هسته فلزی با خمیری سرامیکی پوشش داده می‌شوند که شامل چسب‌های سیلیکاتی و مواد پودری مانند اکسید، کربنات، فلوراید، مواد فلزی و سلولز هستند. پوشش، که معمولاً شکننده است و در هنگام جوشکاری برهمکنش پیچیده‌ای با فلز پایه دارد.

وظایف پوشش یا روکش الکترو

۱. قوس را پایدار می‌کند؛ ۲. گازهایی تولید می‌کند که به عنوان محافظ در برابر محیط اطراف عمل می‌کند؛ گازهای تولید شده عبارتند از دی اکسید کربن و بخار آب، و مونوکسید کربن و هیدروژن در مقادیر کم؛ ۳. کنترل نرخ ذوب؛ ۴. عمل کردن به عنوان یک فلاکس برای محافظت از جوش در برابر تشکیل اکسید، نیتريت و سایر موارد؛ سرباره تولید شده همچنین از جوش محافظت می‌کند؛ ۵. عناصر آلیاژی را به جوش اضافه می‌کند تا خواص آن بهبود یابد.



طبقه بندی الکترودهای فولادساده کربنی برای جوشکاری (SMAW) براساس استاندارد AWS

- الکتروده مصرفی فرآیندهای جوشکاری، بر اساس استحکام فلز جوش، نوع جریان قابل استفاده (AC یا DC) و نوع پوشش طبقه‌بندی می‌شوند. الکترودها به وسیله اعداد و حروف و یا رنگ مشخص می‌شوند. الکترودهای معمول بین ۱۵۰ تا ۴۵۰ میلیمتر طول و ۱/۵ تا ۸ میلیمتر قطر دارند. قطر الکتروده با ضخامت قطعه کار و جریان مورد نیاز و وضعیت جوشکاری متناسب است.
- حرف E معرف الکتروده است.

- دو رقم سمت چپ معرف حداقل استحکام کششی برحسب KSI است.
- دومین رقم از سمت راست وضعیت جوشکاری (Position) را نشان می‌دهد.

عدد ۱ : تخت، افقی، عمودی رو به بالا، بالاسری

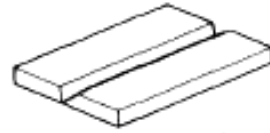
عدد ۲: تخت و افقی

عدد ۳: تخت

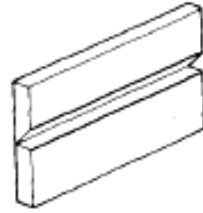
عدد ۴: تخت، افقی، عمودی رو به پایین، بالاسری

- رقم اول از سمت راست : نوع جریان، قطبیت، نوع روکش و مقدار نفوذ است.

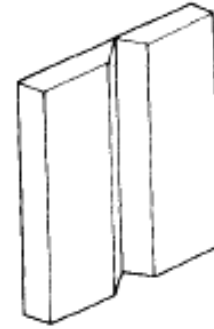




(a) 1G



(b) 2G



(c) 3G



(d) 4G



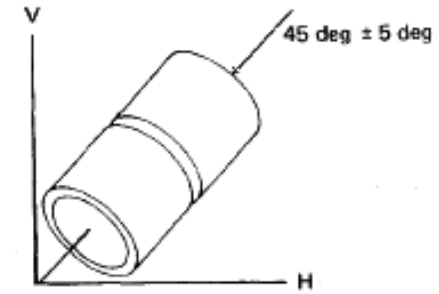
(a) 1G Rotated



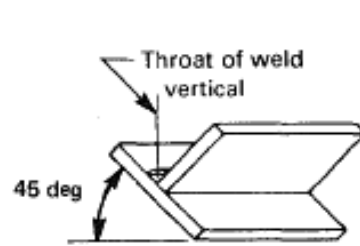
(b) 2G



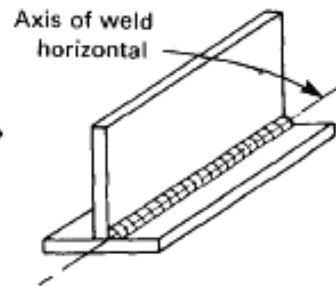
(c) 5G



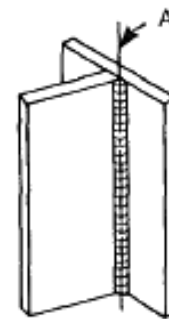
(d) 6G



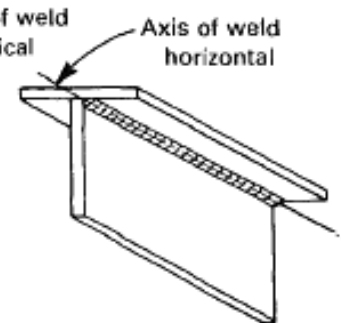
(a) 1F



(b) 2F



(c) 3F



(d) 4F

معرفی نوع پوشش الکترودها براساس نخستین عدد از سمت راست طبق استاندارد AWS

اولین عدد از سمت راست	نوع پوشش
۰	سلولزی با جریان مستقیم
۱	سلولزی با جریان مستقیم و متناوب
۲	رتیلی با جریان مستقیم
۳	رتیلی با جریان مستقیم و متناوب
۴	رتیلی
۵	قلیایی با جریان مستقیم
۶	قلیایی با جریان مستقیم و متناوب
۷	اسیدی
۸	قلیایی محتوی پودر آهن و در بعضی موارد پوشش های مرکب

جوشکاری قوسی زیر پودری (Submerged Arc Welding-SAW)

در جوشکاری قوسی زیر پودری (SAW)، قوس توسط فلاکس دانه‌ای (شامل آهک، سیلیس، اکسید منگنز، فلوراید کلسیم و دیگر عناصر) که از طریق یک نازل وارد جریان جوش می‌شود، محافظت خواهد شد (شکل زیر). لایه ضخیمی از فلاکس، فلز مذاب را پوشانده و محافظت می‌کند، از پاشش جوش و جرقه جلوگیری می‌کند و مانع از ساطع شدن شدید اشعه ماوراء بنفش و بخارات مضر می‌شود. فلاکس همچنین به عنوان یک عایق حرارتی عمل می‌کند و باعث نفوذ عمیق گرما به قطعه کار خواهد شد. فلاکس مصرف نشده نیز توسط یک لوله، جمع‌آوری و پس از بازیابی، دوباره استفاده می‌شود.

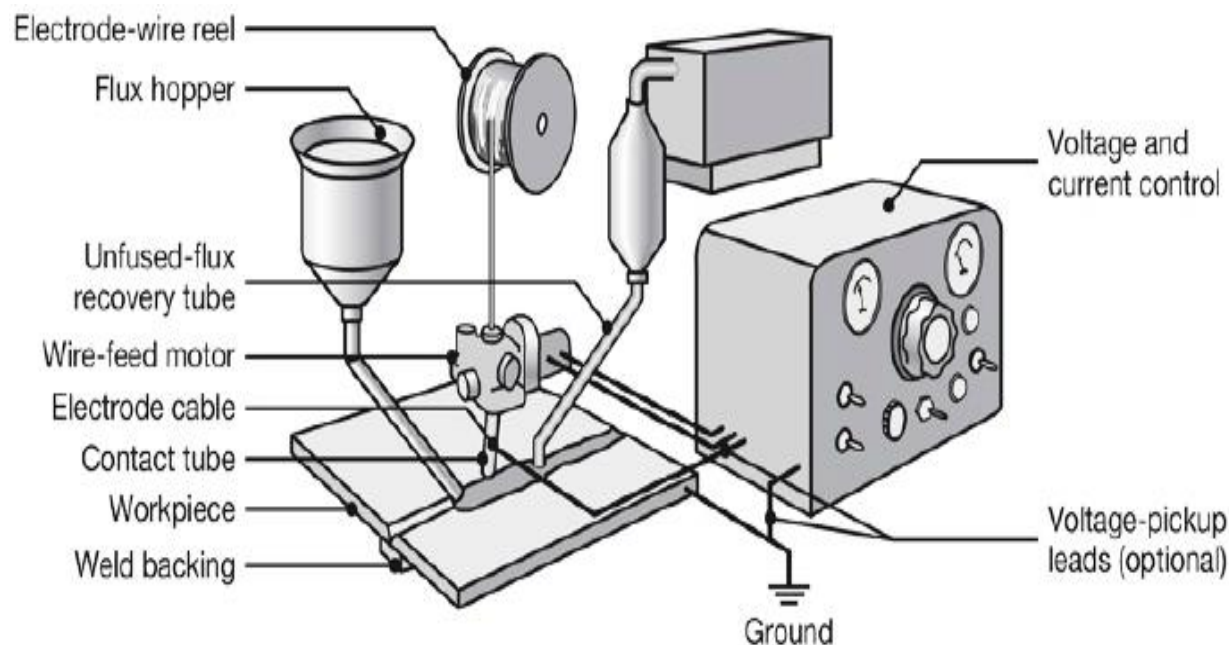


Figure 12.7

Schematic illustration of the submerged arc welding process and equipment.

سیم جوش مصرفی یک کویل از سیم بدون پوشش به قطر ۱/۵-۱۰ میلی‌متر است که از طریق یک لوله به طور خودکار تغذیه می‌شود. جریان الکتریکی معمولاً بین ۳۰۰ تا ۲۰۰۰ آمپر، معمولاً با یک منبع تغذیه تک یا سه فاز استاندارد تا ۴۴۰ ولت به کار گرفته می‌شود. از آنجا که فلاکس توسط گرانش تغذیه می‌شود، فرآیند SAW تا حدودی محدود به جوشکاری در موقعیت افقی یا تخت است همچنین در این فرآیند، معمولاً از یک قطعه پشتیبان (backing) به منظور اطمینان هم ترازی اتصال استفاده می‌شود. فرآیند SAW می‌تواند به صورت اتوماتیک و با سرعت‌هایی به بزرگی ۵ m/min انجام شود.

این فرآیند برای جوشکاری انواع مختلف ورق فولاد کربنی، فولاد آلیاژی و فولاد زنگ‌نزن قابل استفاده است. کاربردهای معمول آن عبارتند از: جوشکاری پلیت‌های ضخیم برای ساخت کشتی، ساخت لوله‌ها و مخازن تحت فشار و در صورتی که لوله‌ها در طول عملیات جوشکاری قابلیت چرخش را داشته باشند، جوش محیطی لوله‌ها نیز به این روش قابل انجام است. کیفیت جوش حاصل در این روش بسیار بالا بوده و از چقرمگی و انعطاف پذیری خوب و یکنواختی خواص برخوردار است. نرخ رسوب جوش در این فرآیند بسیار بالا است، به طوری که در مقایسه با فرآیند SMAW، ۴ تا ۱۰ برابر بیشتر است.

جوشکاری قوسی فلز گاز (Gas Metal Arc Welding-GMAW)

در جوشکاری قوسی فلز گاز (GMAW)، ناحیه جوش توسط منبع خارجی گاز مانند آرگون، هلیوم (Metal Inert Gas welding-MIG) یا دی اکسید کربن (Metal Active Gas welding-MAG) یا مخلوط گازهای مختلف، محافظت می‌شود (شکل بعد a). معمولاً ترکیبات احیاکننده در سیم جوش فلزی به منظور جلوگیری از اکسیداسیون حوضچه جوش حضور دارند. سیم جوش مصرفی به طور خودکار از طریق یک نازل به محل قوس جوشکاری تغذیه می‌شود (شکل بعد b)، و چندین لایه جوش را می‌توان در محل اتصال رسوب داد.

فرآیند GMAW که در دهه ۱۹۵۰ توسعه یافت، برای جوشکاری انواع فلزات آهنی و غیرآهنی مناسب است. به واسطه سرعت بالای فرآیند، منعطف و مقرون به صرفه بودن از لحاظ اقتصادی و نرخ رسوب جوش بالا که دو برابر فرآیند SMAW است، مورد بهره‌برداری گسترده در صنعت ساخت فلزی قرار گرفته است. علاوه بر این، به راحتی می‌توان آن را خودکار کرد و به راحتی با سیستم‌های رباتیک و تولید انعطاف‌پذیر قابل تطبیق است.

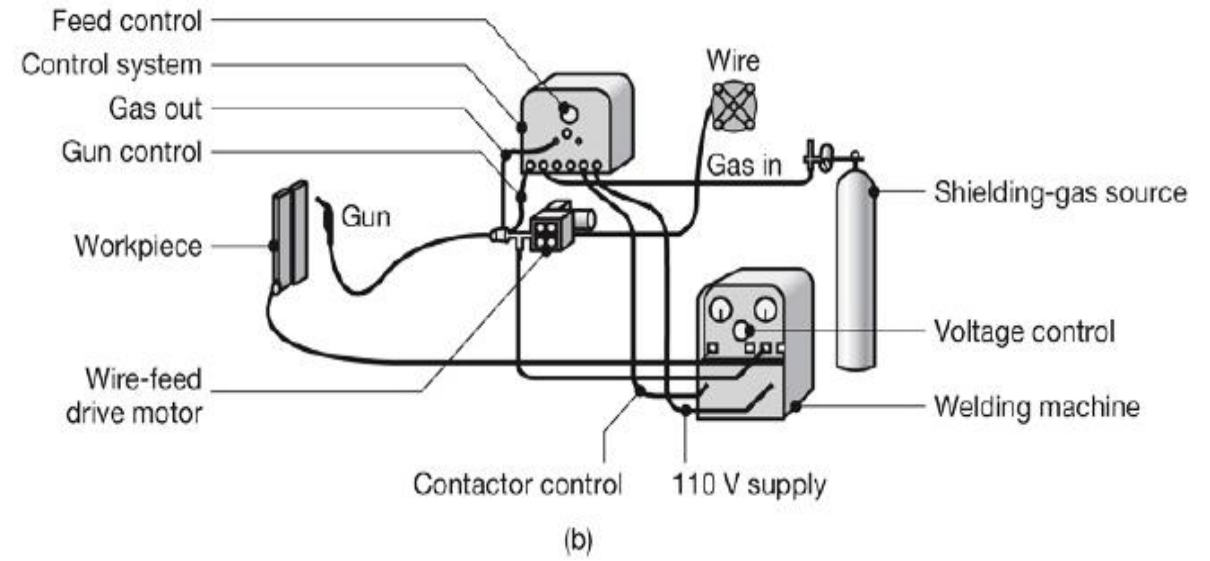
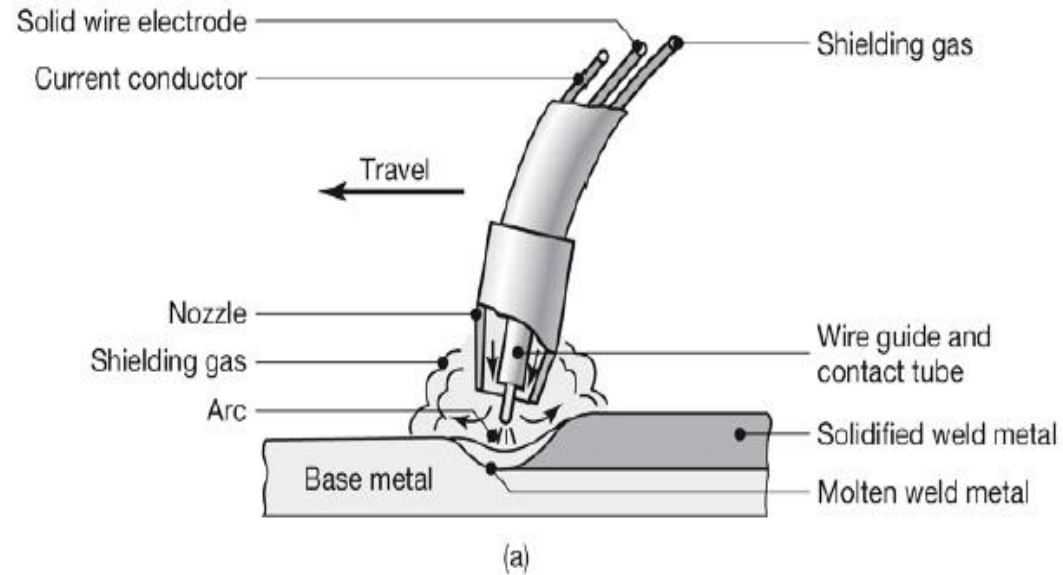
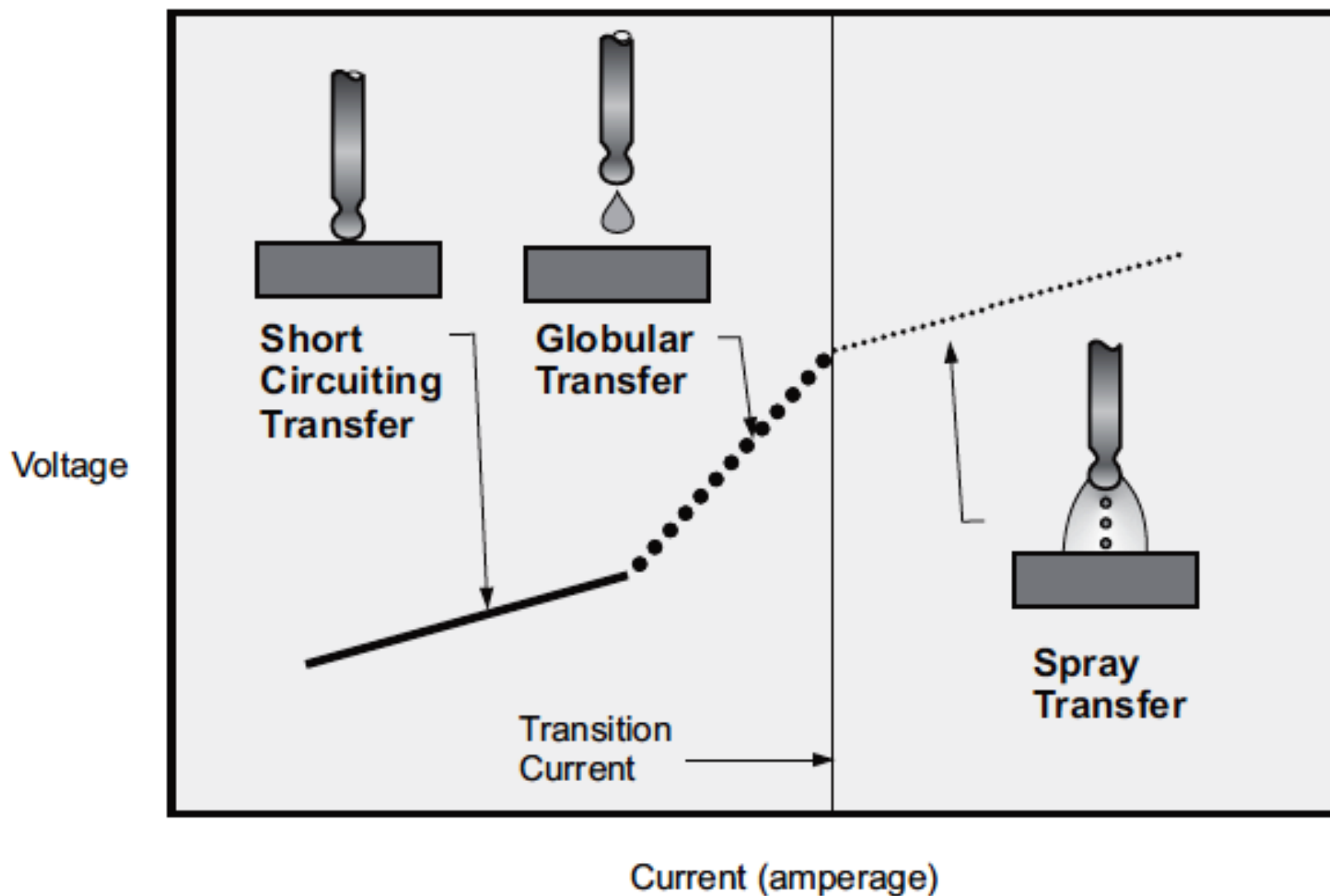


Figure 12.8

(a) Gas metal arc welding process, formerly known as MIG welding (for metal inert gas). (b) Basic equipment used in gas metal arc welding operations.

حالت انتقال قطرات مذاب از سیم جوش به حوضچه



فلز مذاب در این فرآیند به یکی از چهار روش زیر انتقال می‌یابد:

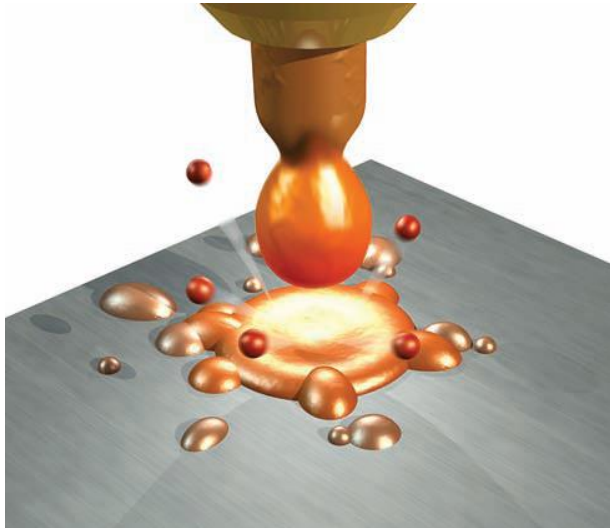
1. **اتصال کوتاه (Short circuiting).** زمانی که نوک الکتروود به حوضچه فلز جوش تماس داده و اتصال کوتاه حاصل می‌شود. در این مد انتقال، **از جریان و ولتاژ پایین**، به همراه گازهای غنی از دی اکسید کربن و الکترودهای با قطر کم استفاده می‌شود و توان مورد نیاز حدود ۲ کیلو وات است. **درجه حرارت توسعه یافته در اثر این روش نسبتاً کم است**، بنابراین این روش برای جوشکاری ورق‌های نازک (کمتر از ۶ میلی متر ضخامت) مناسب است و در ضخامت‌های بالاتر، ممکن است ذوب ناقص رخ دهد. این تکنیک بسیار آسان و یک روش معمول برای جوشکاری فلزات آهنی با ضخامت‌های کم است.

2. **انتقال گلبولی (Globular transfer).** با استفاده از گازهای غنی از دی اکسید کربن، **گلبول‌های فلز مذاب توسط نیروی قوس الکتریکی به محل جوش منتقل می‌شوند که این عملیات با پاشش قابل توجهی همراه است**. در این مد انتقال، جریان جوشکاری بالا است، که منجر به عمق نفوذ بیشتر جوش شده و امکان جوشکاری در سرعت‌های بالاتر را در مقایسه با حالتی که مد انتقال اتصال کوتاه به کار گرفته می‌شود، فراهم می‌کند.

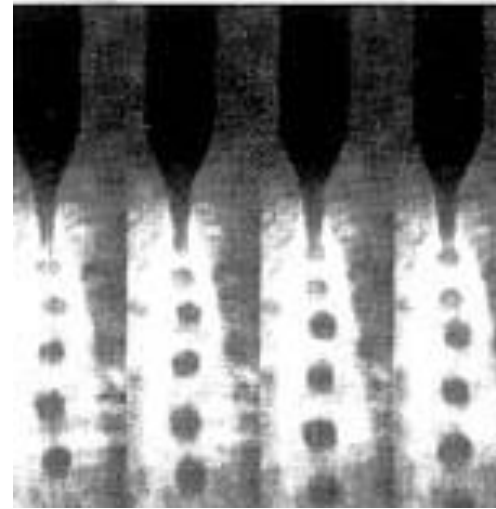
3. انتقال اسپری (Spray transfer). قطرات کوچک فلز مذاب با نرخ چند صد قطره در ثانیه از الکتروود، به منطقه جوش منتقل می‌شوند؛ انتقال بدون پاشش و بسیار پایدار است. برای دستیابی به این مد انتقال از جریان DC بالا، ولتاژ بالا و الکترودهای با قطر کم، به همراه گاز آرگون یا مخلوط‌های گازی غنی از آرگون، به عنوان گاز محافظ استفاده می‌شود. اگرچه، میانگین جریان مورد نیاز را میتوان با استفاده از قوس‌های پالسی کاهش داد. این حالت را میتوان در تمام موقعیت‌های جوشکاری استفاده کرد.

4. رسوب اسپری پالسی (Pulsed-spray deposition). نوعی از انتقال اسپری، رسوب اسپری پالسی است که یک جریان پالسی برای ذوب فلز پرکننده استفاده می‌شود. پالسی کردن جریان اجازه می‌دهد که جریان متوسط پایین‌تر باشد و منجر به کاهش اندازه منطقه متأثر از حرارت (HAZ) شود. رسوب اسپری پالسی را می‌توان برای جوشکاری قطعات نازک به کار برد.

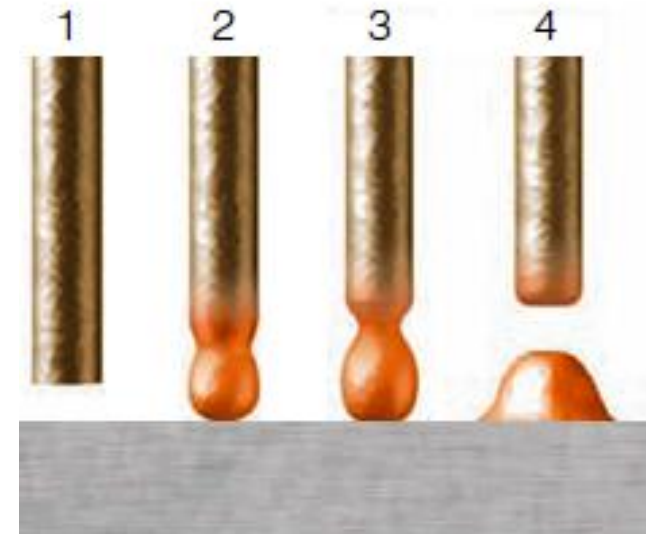
Globular Transfer



Axial Spray Transfer



Short-Circuiting Metal Transfer



جوشکاری قوسی توپودری (Flux-Cored Arc Welding-FCAW)

فرایند جوشکاری قوسی توپودری (FCAW) (شکل زیر) شبیه به جوشکاری قوسی فلز گاز (GMAW) است، با این تفاوت که الکتروود لوله‌ای شکل است و با فلاکس پر شده است (از این رو اصطلاح توپودری به آن اطلاق می‌شود). الکتروودهای توپودری قوس پایداری تولید می‌کنند و ساختار جوش و خواص مکانیکی اتصال را بهبود می‌بخشند. فلاکس بسیار انعطاف‌پذیرتر از پوشش شکننده روی الکتروودهای SMAW است، بنابراین الکتروودهای لوله‌ای را می‌توان به شکل سیم‌پیچ تولید کرد.

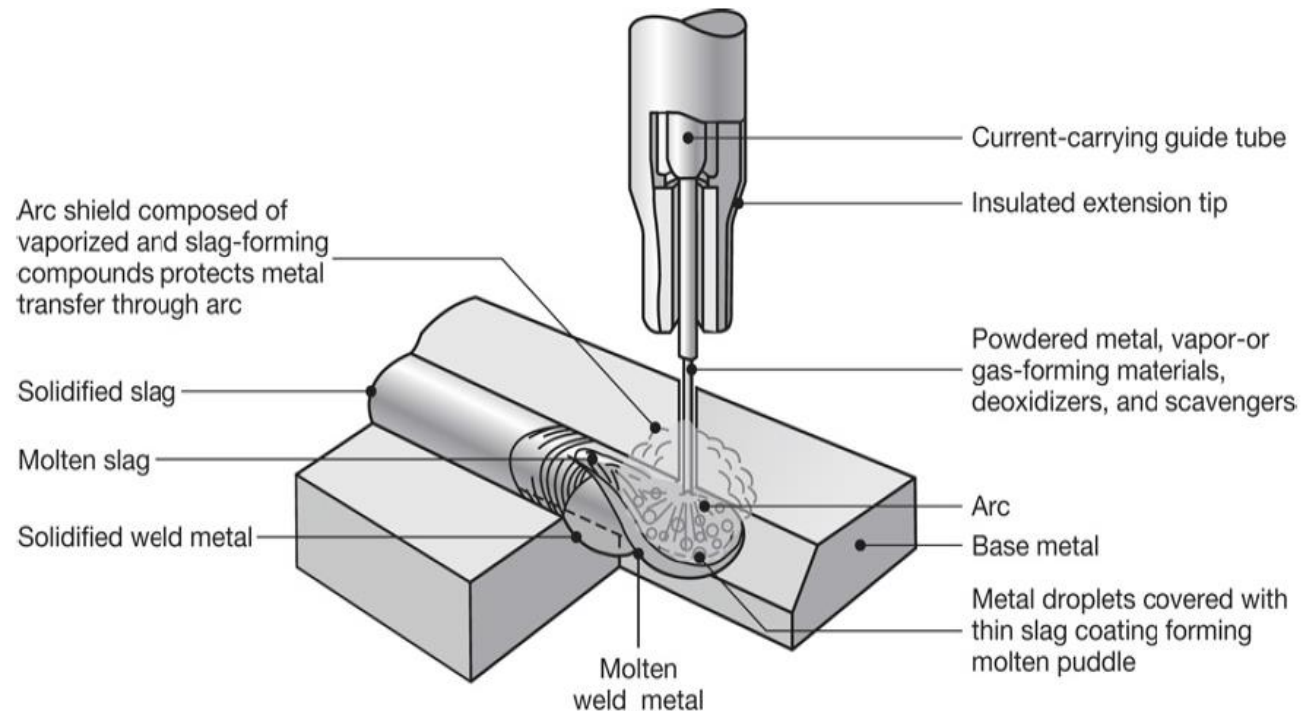


Figure 12.9

Schematic illustration of the flux-cored arc welding process; this operation is similar to gas metal arc welding.

الکترودها معمولاً به قطر ۰/۵ تا ۴ میلیمتر هستند.

الکترودهای کوچکتر برای جوشکاری مواد نازک استفاده می‌شوند و همچنین به آسانی می‌توان قطعات در موقعیت‌های دشوار را جوش داد.

شیمی فلاکس، جوشکاری فلزات پایه مختلف را امکان‌پذیر می‌سازد.

همچنین، **الکترودهای توپودری** خود محافظ (Self-shielded cored electrodes) نیز در دسترس هستند. این

دسته از الکترودها، حاوی فلاکس‌هایی با مواد نقطه تبخیر پایین هستند که منطقه جوش را در برابر محیط اطراف

محافظت می‌کنند و بنابراین نیازی به گاز محافظ خارجی ندارند.

عملیات جوشکاری قوسی توپودری ترکیبی از **تنوع فرآیند SMAW** با ویژگی **تغذیه‌ی پیوسته** و خودکار **GMAW** است.

این فرآیند مقرون به صرفه بوده و برای جوشکاری **انواع اتصالات با ضخامت‌های مختلف** مورد استفاده قرار می‌گیرد، عمدتاً برای فولادها، فولادهای زنگ‌نزن و آلیاژهای نیکل.

یک مزیت عمده FCAW، سهولت آن است که می‌توان **ترکیبات شیمیایی فلز جوش ویژه‌ای** را ایجاد نمود.

همچنین، با **اضافه کردن آلیاژ به هسته فلاکس**، تقریباً هر ترکیب آلیاژی می‌تواند توسعه یابد.

این فرآیند آسان برای **اتوماسیون و با کمک سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر و رباتیک** استفاده می‌شود.

جوشکاری سرباره الکتریکی (Electroslag Welding-ESW)

در جوشکاری سرباره الکتریکی (ESW)، قوس بین نوک الکترود و کف ناحیه اتصال شروع می‌شود. در ادامه، فلاکس اضافه می‌شود که توسط گرمای قوس ذوب می‌شود. پس از اینکه سرباره مذاب به نوک الکترود برسد، قوس خاموش می‌شود، در حالی که گرما به طور مداوم از طریق مقاومت الکتریکی سرباره مذاب تامین می‌شود. یک یا چند الکترود توپر یا توپودری ممکن است استفاده شود و لوله‌ی راهنما (نازل الکترود) نیز ممکن است غیر مصرفی (روش متعارف) یا مصرفی باشد.

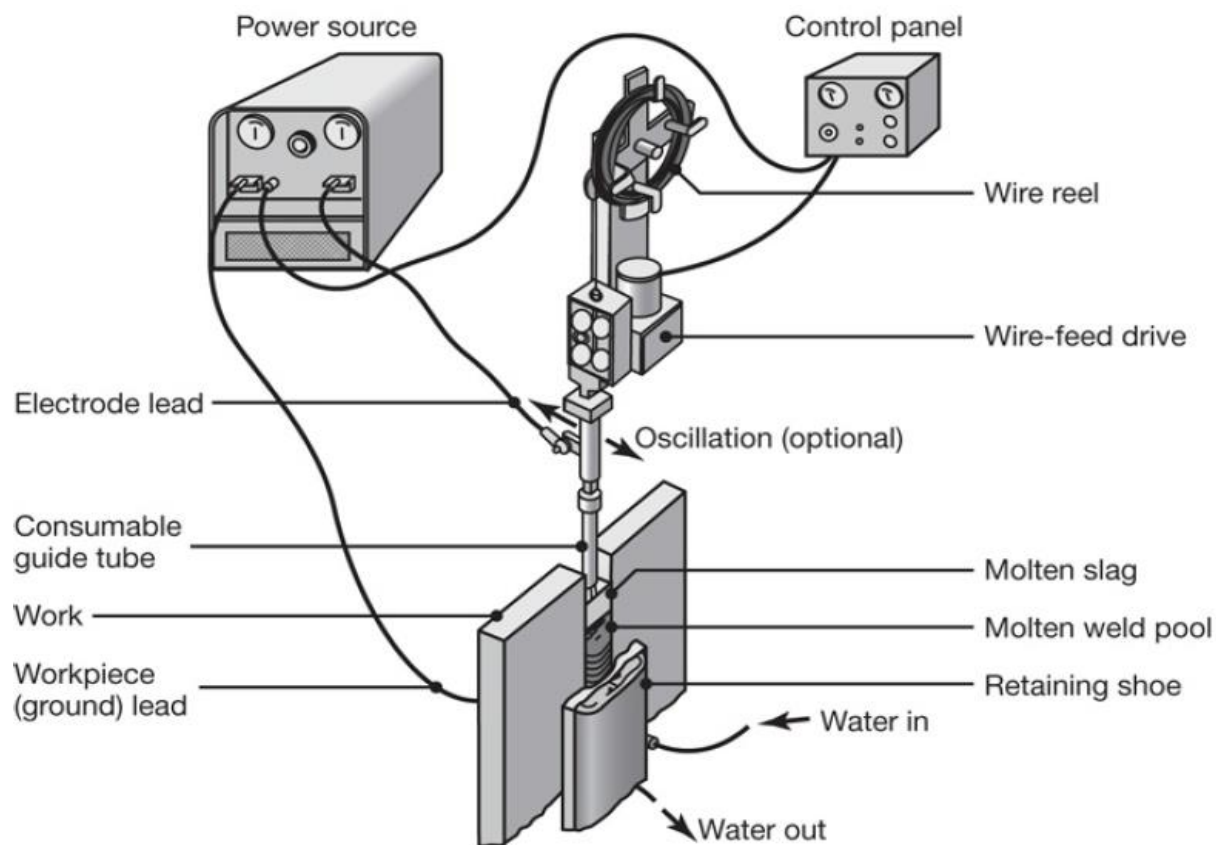
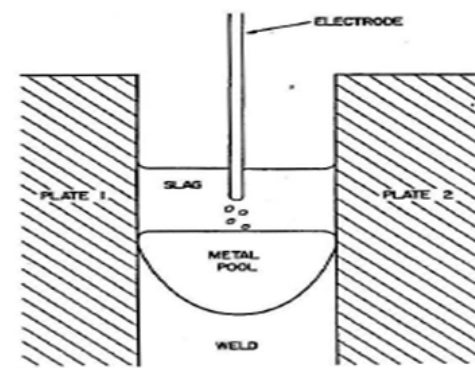
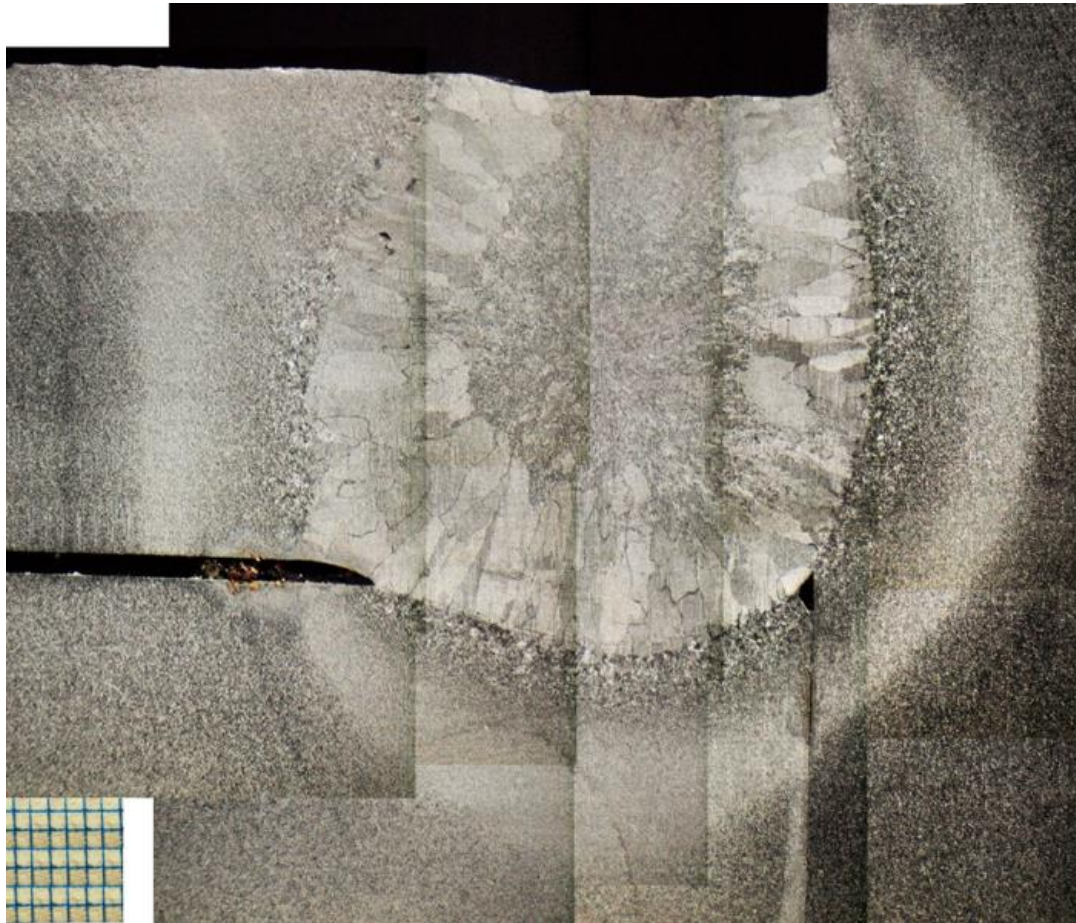


Figure 12.11
Equipment used for electroslag welding operations.



این فرآیند قادر به جوشکاری صفحات با ضخامت‌های بین ۵۰ تا ۹۰۰ میلی‌متر است و جوشکاری معمولاً در یک پاس انجام می‌شود. جریان مورد نیاز حدود A ۶۰۰ در ولتاژ ۷۰-۵۰ است، اگر چه جریان‌های بالاتر برای صفحات ضخیم استفاده می‌شود. سرعت پیشروی جوش در این فرآیند ۱۲-۳۶ میلی‌متر بر دقیقه است. فرآیند ESW برای قطعات فولاد سازه‌ای سنگین مانند ماشین‌آلات سنگین و مخازن راکتور هسته‌ای استفاده می‌شود و کیفیت جوش نسبتاً خوب است.



جوشکاری الکتروگاز (Electrogas Welding-EGW)

جوشکاری الکتروگاز (EGW) عمدتاً برای جوشکاری طرح اتصال لب به لب (Butt joint) در یک پاس استفاده می‌شود. این فرآیند به عنوان یک فرآیند جوشکاری مکانیزه طبقه‌بندی می‌شود، چرا که به تجهیزات خاص نیاز دارد (شکل ۱۲.۱۰). این فرآیند شبیه الکترواسلگ است با ۲ تفاوت: به جای سرباره از گاز محافظ استفاده می‌شود و اساس آن از اول تا آخر با قوس الکتریکی است. کاربردهای این روش شبیه به جوشکاری الکترواسلگ است. فلز جوش به داخل فاصله‌ی بین دو قطعه‌ای که قرار است به یکدیگر متصل شوند، رسوب داده می‌شود. این فاصله، توسط دو سد (کفشک) مسی مجهز به سیستم گردش آب، احاطه شده تا مانع خروج فلز مذاب شوند و با پیشرفت جوشکاری، کفشک‌ها به صورت مکانیکی به سمت بالا حرکت داده می‌شوند. جوش‌های محیطی نیز با چرخش قطعه کار طی جوشکاری، مثلاً برای لوله‌ها توسط این فرآیند ممکن است.

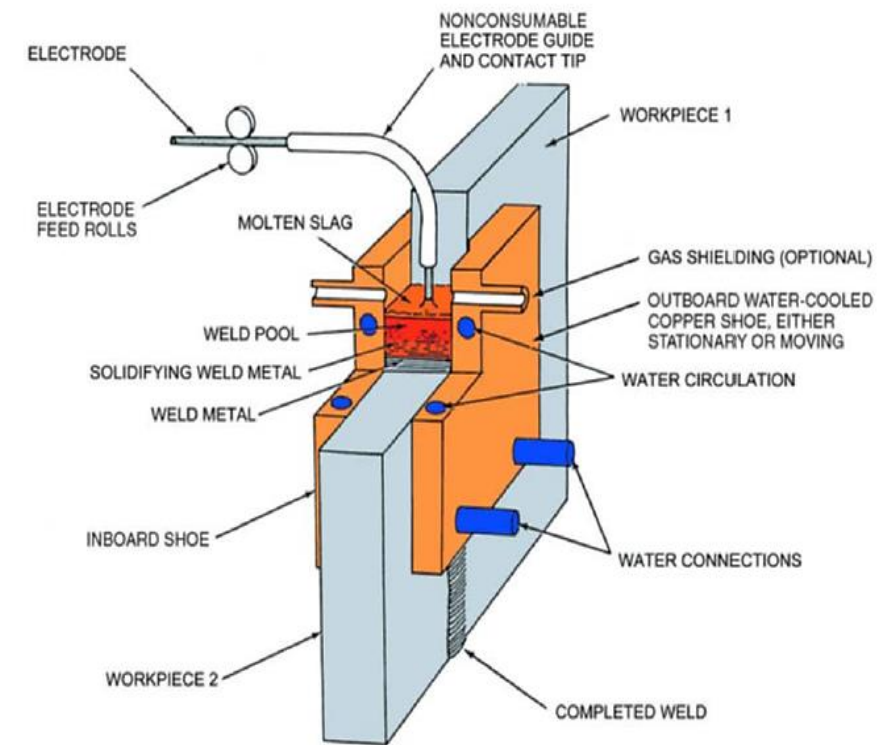
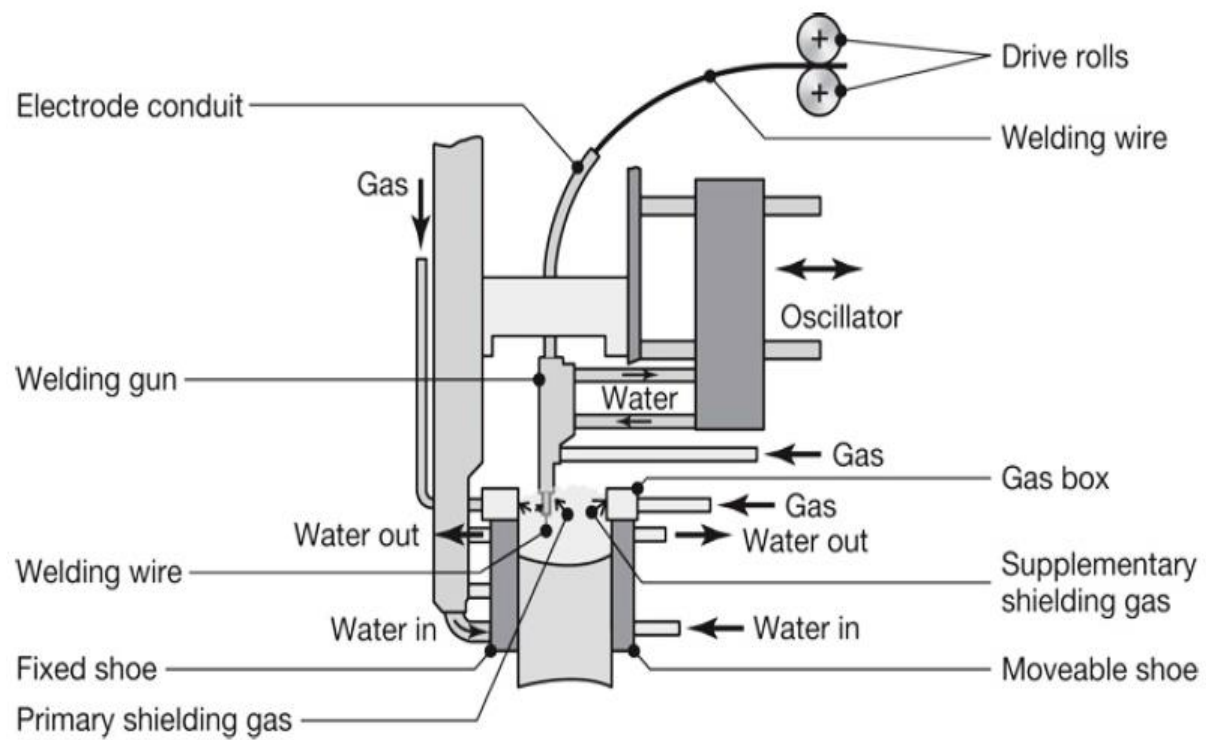


Figure 12.10
Schematic illustration of the electrogas welding process.

یک یا چند الکتروود از طریق یک لوله تغذیه می‌شوند و یک قوس مداوم با استفاده از الکتروودهای توپودری (flux cored) و جریان تا ۸۰۰ A یا الکتروودهای توپر (solid) در جریان ۴۰۰ A ایجاد می‌شود. در این فرآیند، توان مورد نیاز حدود ۲۰ کیلو وات است.

محافظت توسط یک گاز خنثی، مانند دی اکسید کربن، آرگون یا هلیوم، بسته به نوع ماده‌ای که قرار است جوش داده شود، فراهم می‌شود. گاز ممکن است از یک منبع خارجی تامین شود یا ممکن است از یک الکتروود توپودری یا هر دو تولید شود.

ضخامت جوش از ۱۲ تا ۷۵ میلی‌متر روی فولادها، تیتانیوم و آلیاژهای آلومینیوم متغیر است.

کاربردهای معمول این فرآیند، در ساخت پل‌ها، کشتی‌ها، مخازن تحت فشار، مخازن ذخیره‌سازی و لوله‌های با قطر بالا و ضخیم قابل رؤیت است.